

ПРОДУКЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС И АЗОТНОЕ ПИТАНИЕ
РАСТЕНИЙ КАПУСТЫ КИТАЙСКОЙ *BRASSICA CHINENSIS* L.
ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ПОД СВЕТОДИОДНЫМ ОБЛУЧАТЕЛЕМА.И. ЗНАМЕНСКИЙ¹, О.С. ЯКОВЛЕВА¹, С.О. СМОЛЯНИНА²,
Ю.А. БЕРКОВИЧ², И.Г. ТАРАКАНОВ¹(¹РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; ²Институт медико-биологических проблем РАН)

В двух сериях экспериментов с капустой китайской *Brassica chinensis* L. была исследована продуктивность посевов и распределение сухого вещества и пула нитратов по органам и тканям растений при выращивании в гидропонной нециркуляционной проточной установке. Растения выращивали под белыми и красными светодиодами на питательных растворах с различными концентрациями азота (нитратный – от 40 до 150 мг/л; аммонийный – от 0 до 70 мг/л). В опытах установлена положительная корреляция между накоплением сухой массы растениями и концентрацией азота в питательном растворе в диапазоне от 40 до 120 мг/л. Установлено, что при выбранном режиме освещения концентрация нитратного азота в растворе не должна превышать 70 мг/л. Частичное замещение нитратной формы азота аммонийной позволило уменьшить накопление нитратов в побегах без потери продуктивности.

Ключевые слова: капуста китайская (*Brassica chinensis* L.), азотное питание, нитраты, световой режим, светодиодные облучатели, нециркуляционная гидропонная установка.

Введение

Данная работа является частью проекта по разработке технологии выращивания листовых овощных культур в витаминной космической оранжерее на российском сегменте Международной космической станции. На борту пилотируемых космических аппаратов электроэнергия является наиболее дорогим ресурсом, поэтому ее эффективное использование на освещение растений определяет эффективность работы всей оранжереи. Известно, что красный свет является наиболее энергетически выгодным для фотосинтеза, но, вместе с тем, он мало проникает в нижние слои посева, что может привести, в частности, к уменьшению активности фермента нитратредуктазы в нижних листьях [4]. Кроме того, красный свет может способствовать нефотоактивному открытию устьиц и тем самым усиливать транспирацию [2]. Эти факторы могут привести к усиленному накоплению нитратов в тканях растений.

Целью работы явилось изучение особенностей роста растений и распределения сухого вещества, а также нитратов по органам и тканям в зависимости от концентрации и формы азота в питательном растворе при выращивании в светокультуре с повышенной долей красного света в спектре используемых облучателей.

Материалы и методы исследований

Опыты проводили в Лаборатории искусственного климата РГАУ-МСХА в контролируемых условиях климатической камеры. Растения облучали светильником,

выполненным на базе теплых белых (цветовая температура 4000К) и красных (660 нм) светодиодов (СД). Опыты проводили при круглосуточном освещении, плотности потока фотонов (ППФ) $430 \pm 20 \mu\text{M}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, непрерывном характере излучения и доле красного света в спектре 73% (с учетом красной составляющей в излучении белых СД). Выбор режима освещения был основан на результатах многофакторных экспериментов, проведенных ранее [5]. Посадочные устройства (в космической биологии их принято называть корневыми модулями) представляли собой полые трубки из мелкопористого титана диаметром 16 мм или плоские кюветы размерами $200 \times 50 \times 10$ мм с двойным дном, верхнее из которых было выполнено из мелкопористого титана. Трубки оборачивали 5-мм слоем волокнистого почвозаменителя БИОНА-К5-АК22™ (ИФОХ НАН, Беларусь) и свето-, водонепроницаемым чехлом с посадочной щелью. Кюветы заполняли 5-мм слоем агроперлита и накрывали пластиковыми крышками с отверстиями для посева семян. Корневые модули соединяли с резервуарами с питательным раствором, представляющими собой сосуды Мариотта (рис. 1). При герметичном соединении корневых модулей с сосудами Мариотта раствор удерживается за счет капиллярных сил. Такая конструкция стенда позволяет стабилизировать водный потенциал в течение всего периода вегетации на заданном уровне, что обеспечивает желаемый водно-воздушный режим в корнеобитаемой зоне. Корневые модули и светодиодные светильники устанавливали в климатические камеры Fi-totron 600H (Великобритания) с регулируемыми условиями среды. Площадь светящей поверхности над каждым корневым модулем составила $0,2 \text{ м}^2$.

В качестве объекта экспериментов была выбрана китайская капуста *Brassica chinensis* L., сорт Веснянка селекции ВНИИССОК. Посев проводили пророщенными семенами, на 5-е сутки проводили прореживание всходов, оставляя по 5 растений в каждом корневом модуле. Растения выращивали при температуре воздуха $(31 \pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $(43 \pm 9)\%$ в течение 24 суток.

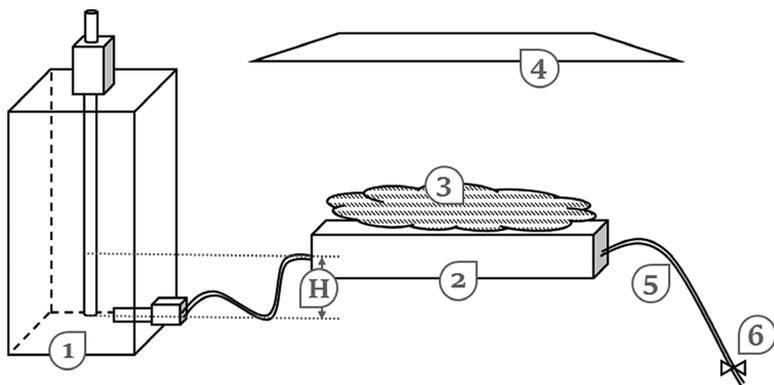


Рис. 1. Схема стенда для выращивания растений:

- 1 – сосуд Мариотта, 2 – корневой модуль, 3 – посев, 4 – облучатель,
5 – соединительные шланги, 6 – зажим на сливном шланге, Н – высота столба
питательного раствора, задающая водный потенциал в корнеобитаемой зоне

В рамках данной работы было проведено 2 серии экспериментов. В первой серии растения выращивали на питательном растворе, содержащем азот исключительно в нитратной форме. Во второй серии растения выращивали при смешанном (нитратно-аммонийном) азотном питании (табл. 1).

Концентрации остальных элементов в растворе, мг/л, составляли: Ca^{2+} – 60, Mg^{2+} – 20, PO_4^{3-} – 32, K^+ – 250. Микроэлементы добавляли согласно прописи Кюпа, при этом рН растворов составлял 5,5–6,0.

Условия в соответствии с вариантами эксперимента

Серия опытов, №	Вариант, №	Концентрация N-NO ₃ в растворе, мг/л	Концентрация N-NH ₄ в растворе, мг/л
1	1	40	0
	2	70	0
	3	120	0
	4	150	0
2	1	70	50
	2	70	105

В ходе вегетации проводили наблюдения за ростом растений, сроками появления листьев и динамикой транспирации. Количество транспирируемой воды оценивали ежедневно, в период с 14-х по 24-е сутки вегетации, по убыли питательного раствора в сосуде Мариотта. Затем растения срезали, взвешивали индивидуально, после чего объединяли биомассу, измельчали и отбирали по 3 навески для определения содержания нитратов (1,0 г) и сухого вещества (2,0 г). Содержание сухого вещества определяли, высушивая навески при 80°C до постоянного веса. Нитраты экстрагировали из растительных тканей в 1%-м растворе алюмокалиевых квасцов в течение суток. Содержание нитратов в экстрактах определяли фотоколориметрическим методом [3]. Продуктивность посева определяли, взвешивая надземную биомассу на корневом модуле и пересчитывая на 1 м² светящей поверхности.

Результаты и их обсуждение

Результаты первой серии экспериментов представлены в таблице 2. Продуктивность посевов возрастала по мере увеличения содержания азота в питательном растворе до 120 мг/л, после чего она достоверно не менялась. Однако при использовании в питательном растворе исключительно нитратной формы азота максимум продуктивности был отмечен при более высоком содержании азота в тканях, что превышало предельно допустимую концентрацию нитратов в побегах.

Анализ распределения сухого вещества по органам растения показал, что доля корня в сухой массе растения монотонно возрастала по мере нарастания дефицита азота в корнеобитаемой зоне, но распределение сухого вещества внутри побега отличалось высокой стабильностью: более 60% сухой биомассы растения было сосредоточено в паренхиме сформировавшихся листьев (табл. 3).

Напротив, распределение пула нитратов в растении отличалось лабильностью. При благоприятном уровне азотного питания (120 мг/л) практически весь пул нитратов был сосредоточен в сформировавшихся листьях и был относительно равномерно распределен между проводящей системой (жилками листьев) и паренхимными тканями (табл. 4).

При умеренном дефиците азота в питательном растворе (70 мг/л) пул нитратов в растениях уменьшился почти в 4 раза, причем около 70% нитратов находилось в проводящей системе сформировавшихся листьев. Такое распределение нитратов свидетельствует, что в наших опытах скорость поступления нитратного азота в паренхимные клетки, где в основном происходит восстановление нитрат-анионов

нитратредуктазой, превышала скорость восстановления нитратов при содержании азота в питательном растворе выше 70 мг/л. Это приводило к формированию вакуолярного пула нитратов в паренхимных клетках листьев, недоступного для восстановления [1]. При выраженном дефиците азота в питательном растворе (40 мг/л) основная доля нитратов была сосредоточена в паренхиме сформированных листьев, при этом общее количество нитратов в растениях снизилось в 70 раз по сравнению с благоприятным уровнем азотного питания.

Таблица 2

Продуктивность посевов и концентрация нитратов в побегах китайской капусты в зависимости от содержания нитратного азота в питательном растворе

Показатели	Содержание нитратного азота в питательном растворе, мг/л			
	40	70	120	150
Сухая масса посева, г/м ²	172±8	230±30	295±44	325±60
Концентрация нитратов, мг/г сухой массы	1,5±0,2	22±2	70±4	60±6
Концентрация нитратов, мг/кг сырой массы	285±15	2424±140*	4553±450*	4505±455*

Примечание. Звездочками отмечены варианты, в которых концентрация нитратов в побегах превысила ПДК для листовых овощных культур.

Таблица 3

Распределение сухого вещества, г/м² освещаемой поверхности посева

Органы растений	Первая серия, варианты			Доли сухого вещества в растении, %
	1	2	3	
Неразвитые листья	10.7	24.6	27.7	8.9
Паренхима листьев	115.2	142.3	173.5	63.7
Центральная жилка	27.7	44.1	60.9	19.0
Корневая система	18.3	18.8	17.5	8.4

Таблица 4

Распределение пула нитратов, г/м² освещаемой поверхности посева

Органы растений	Первая серия, варианты		
	1	2	3
Неразвитые листья	0.0	0.3	0.4
Паренхима листьев	0.2	1.2	9.6
Центральная жилка	0.1	3.4	8.8
Корневая система	0.0	0.1	0.1

Полученные данные показали, что у выбранной культуры в проводящей системе побега сосредоточено основное количество нитратного азота, содержащегося в растении, за исключением условий жесткого азотного голодания. Проводящая система побегов китайской капусты содержит малую долю (3–5%) сухого вещества, которое в значительной мере представлено мертвыми клетками ксилемы, в которых восстановление нитрат-анионов не происходит. Учитывая, что на долю проводящей системы приходится не менее 30% сырой массы побега, скорость поступления азота в растения при достаточном обеспечении экзогенным азотом всегда будет опережать скорость его дальнейшей ассимиляции. При наличии в питательном растворе только нитратного азота это приведет к усиленной аккумуляции нитратов в побегах.

Результаты второй серии экспериментов представлены на рисунке 3. Как видно из представленных данных, продуктивность посевов, выращенных на питательных растворах с содержанием азота 120 мг/л, была практически одинакова независимо от того, в какой форме (нитратной или нитратно-аммонийной) азот был представлен в растворе (рис. 3а). Вместе с тем в условиях нитратно-аммонийного питания концентрация нитратов в побегах была на 30% ниже, чем у растений в варианте с нитратным питанием при равном общем содержании азота в питательном растворе (рис. 3б). Следует отметить, что увеличение содержания азота выше 120 мг/л за счёт аммонийной формы азота не привело к повышению продуктивности растений.

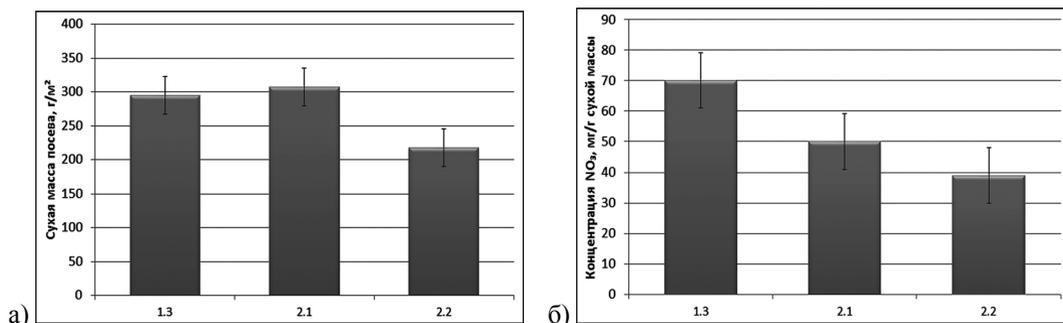


Рис. 2. Зависимость продуктивности посева китайской капусты (а) и концентрации нитратов в побегах (б) от содержания и формы азота в питательном растворе. Пояснение. 1.3 – первая серия, третий вариант; 2.1 – вторая серия, первый вариант; 2.2 – вторая серия, второй вариант.

Выводы (заключение)

1. При выращивании китайской капусты под светодиодным облучателем на основе белых и красных светодиодов при среднем уровне ППФ 430 $\mu\text{M}/(\text{m}^2 \cdot \text{c})$ и доле красного света в спектре 73% оптимальная концентрация азота в питательном растворе составила 120 мг/л.

2. При выращивании китайской капусты на питательном растворе, содержащем азот исключительно в нитратной форме, растения накапливают значительное количество нитратов в проводящей системе побега (центральная жилка), что приводит к повышению концентрации нитратов в побегах выше предельно допустимой нормы для листовых овощных культур.

3. Выращивание растений на питательном растворе, содержащем как нитратную, так и аммонийную формы азота, позволяет значительно уменьшить концентрацию нитратов в побегах без потери продуктивности по сравнению с вариантами чисто нитратного питания.

4. Распределение пула нитратов в листе может выступать в качестве индикатора обеспеченности растений нитратным азотом. При избыточном уровне нитратного азота в питательном растворе поступающие нитраты будут равномерно распределены в побеге между паренхимными и проводящими тканями. При сбалансированном питании нитраты преимущественно будут находиться в проводящей системе (в жилках), а при дефиците нитратов – в паренхимной ткани.

Библиографический список

1. Измайлов С.Ф. 1986. Азотный обмен в растениях. М: Наука, 320 с.
2. Baroli I., Price G., Badger M., Caemmerer S. 2008. The Contribution of Photosynthesis to the Red Light Response of Stomatal Conductance // *Plant Physiology* V. 146, pp. 737–747.
3. Cataldo D.A., Harron M., Schrader L.E., Young V.L. 1975. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid // *Soil Sci. Plant Anal.* V. 6. № 1. P. 71–80.
4. Massa G., Graham T., Haire T., Flemming C., Newsham G., Wheeler R. 2015. Light-emitting Diode Light Transmission through Leaf Tissue of Seven Different Crops // *Hortscience*. V. 50(3). P. 501–506.
5. Коновалова И.О., Смолянина С.О., Яковлева О.С., Беркович Ю.А., Тараканов И.Г. и др. 2015. Влияние параметров светового режима на накопление нитратов в надземной биомассе капусты китайской (*Brassica chinensis* L.) при выращивании со светодиодными облучателями // *Агрехимия*, 2015 № 10 С. 65–72.

PLANT PRODUCTION PROCESSES AND NITROGEN METABOLISM OF CHINESE CABBAGE (*BRASSICA CHINENSIS* L.) WHEN GROWN UNDER LED ILLUMINATION

A.I. ZNAMENSKIY¹, O.S. YAKOVLEVA¹, S.O. SMOLYANINA²,
YU.A. BERKOVICH², I.G. TARAKANOV¹

(¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy;
² RAS Institute of Biomedical Problems)

*The paper describes two series of experiments with Chinese cabbage (*Brassica chinensis* L.). The authors studied the productivity of crops and distribution of dry matter and nitrate pool in plant tissues. Plants were grown in a non-circulating passive hydroponic installation under white and red LEDs in nutrient solutions with various nitrogen concentrations (nitrate – from 40 to 150 mg/l, ammonia – from 0 to 70 mg/l). The study found positive correlation between the accumulation of dry weight of plants and the nitrogen concentration in the nutrient solution in the range from 40 to 120 mg/l. It was established that with the selected lighting mode, the concentration of nitrate nitrogen in the solution should not exceed 70 mg / l. Partial replacement of an ammonium nitrate form of nitrogen allowed to reduce nitrate concentration in the shoots without any loss of their productivity.*

Key words: Chinese cabbage (*Brassica chinensis* L.), nitrates, nitrogen nutrition, light mode, LED illuminators, non-circulating passive hydroponic installation.

References

1. Izmailov S.F. 1986. Azotny obmen v rasteniyah. [Nitrogen metabolism in plants]. M: Nauka, 320 p.
2. Baroli I., Price G., Badger M., Caemmerer S. 2008. The Contribution of Photosynthesis to the Red Light Response of Stomatal Conductance // *Plant Physiology*, Vol. 146, pp. 737–747.

3. *Cataldo D.A., Harron M., Schrader L.E., Young V.L.* 1975. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid // *Soil Sci. Plant Anal.* Vol. 6. No. 1. Pp. 71–80

4. *Massa G., Graham T., Haire T., Flemming C., Newsham G., Wheeler R.* 2015. Light-emitting Diode Light Transmission through Leaf Tissue of Seven Different Crops // *HortScience*. V. 50(3). Pp. 501–506.

5. *Konovalova I.O., Smolyanina S.O., Yakovleva O.S., Berkovich Yu.A., Tarakanov I.G. et al.* 2015. Vliyanie parametrov svetovogo reghima na nakoplenie nitratov v nadzemnoi biomasse kapusty kitaiskoi (*Brassica chinensis* L.) pri vyraschivanii so svetodionymi obluchateliami [Influence of the parameters of the light mode on the accumulation of nitrates in the aboveground biomass of Chinese cabbage (*Brassica chinensis* L.) when grown under LED illuminators] // *Agrokimiya*, 2015. No. 10, pp. 65–72.

Знаменский Артём Игоревич – магистрант кафедры физиологии растений РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49; e-mail: znart3@gmail.com).

Яковлева Ольга Сергеевна – к.б.н., доц. кафедры физиологии растений РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49; e-mail: O_S_yakovleva@mail.ru).

Смолянина Светлана Олеговна – к.б.н., ст. науч. сотр. Института медико-биологических проблем РАН (123060, г. Москва, Хорошёвское ш., д. 76А; e-mail: q666666@ya.ru).

Беркович Юлий Александрович – д.т.н., зав. лабораторией Института медико-биологических проблем РАН (123060, г. Москва, Хорошёвское ш., д. 76А; e-mail: q666666@ya.ru).

Тараканов Иван Германович – д.б.н., зав. кафедрой физиологии растений РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49; e-mail: plantphys@timacad.ru).

Artyom I. Znamenskiy – MSc student, the Department of Plant Physiology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127550, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49, e-mail: znart3@gmail.com).

Olga S. Yakovleva – PhD (Bio), Associate Professor, the Department of Plant Physiology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127550, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49, e-mail: O_S_yakovleva@mail.ru).

Smolyanina Svetlana Olegovna – PhD (Bio), Senior Researcher, the RAS Institute of Biomedical Problems (123060, Moscow, Khoroshevskoye sh., 76A, e-mail: q666666@ya.ru).

Yuliy A. Berkovich – DSc (Eng), Head of the Laboratory, Institute of Biomedical Problems RAS (123060, Moscow, Khoroshevskoye sh., 76A, e-mail: q666666@ya.ru).

Ivan G. Tarakanov – DSc (Bio), Head of the Department of Plant Physiology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127550, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49, e-mail: plantphys@rgau-msha.ru).