^{1,2}А. И. Кузин, к.с.-х.н., доцент,
¹Ю. В. Трунов, д.с.-х.н., профессор,
¹А. В. Соловьев, к.с.-х.н., доцент,
¹Б. И. Смагин, д.э.н., профессор
¹ФГБОУ ВО «Мичуринский ГАУ»,
г. Мичуринск
²ФГБНУ «ФНЦ им. И. В. Мичурина»,
г. Мичуринск
kuzin@mgau.ru

УДК 634.11:631.816:631.559.2:632.16

DOI 10.31676/2073-4948-2018-53-147-156

НЕДЕСТРУКТИВНАЯ ДИАГНОСТИКА КАЛИЙНОГО ПИТАНИЯ ЯБЛОНИ С ПОМОЩЬЮ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПЕКТРОФОТОМЕТРИИ

Резюме. На разном фоне обеспеченности растений калийным питанием изучена динамика содержания валового калия в листьях и динамика спектров отражений листьев яблони. Выявлена тесная корреляция между коэффициентом отражения света листовой пластинкой и содержанием калия при длине волны 550 нм в течение всего вегетационного периода, что позволяет использовать эти результаты для разработки методов неdestructивной диагностики калийного питания яблони.

Ключевые слова: яблоня, удобрение, листовая диагностика, обеспеченность калием, анализ спектр отражения листа, неdestructивная диагностика.

Summary. The dynamics of the total potassium in apple leaves and the dynamics of reflection spectra of them were studied on the different background of the potassium supply. A close correlation was found between the light reflection coefficient of leaves and the potassium content at the wavelength of 550 nm during the whole vegetation period, which makes it possible to use these results to develop methods for non-destructive diagnosis of potassium nutrition of apple trees.

Keywords: apple tree, fertilizer, leaf diagnostics, potassium availability, analysis of the reflection spectrum of the leaf, nondestructive diagnostics.

Введение

В течение вегетационного периода уровни оптимального содержания в листьях основных элементов минерального питания могут изменяться в зависимости от возраста и фенологической фазы развития растений [1]. Калий является очень важным элементом питания, участвующим практически во всех процессах жизнедеятельности растений. Для правильной организации сбалансированного питания растений в условиях интенсивного сада с капельным орошением и фертигацией весьма актуальна проблема экспресс-ди-

агностики питания растений на протяжении всего вегетационного периода [2, 3]. Методы недеструктивной диагностики азотного питания разработаны достаточно хорошо [4]. Их совершенствование и развитие проводится и в России [5]. Однако способы оценки обеспеченности растений яблони калием находятся только в стадии разработки [6]. На концентрацию калия оказывает влияние много различных факторов, в частности плодовая нагрузка, сортовые особенности и т. д. [7].

Недостаток калийного питания оказывает негативное влияние на растения яблони и приводит к снижению интенсивности фотосинтеза [8], что связано с изменением процессов обмена веществ и соотношения пигментов в них (хлорофиллов, антоцианов, каротиноидов), а соответственно и их оптических характеристик. В то же время показано, что результаты спектрального анализа света, отраженного листовой пластинкой, можно применять для анализа содержания пигментов в листьях [9]. В частности, показана точная зависимость между изменением пигментного состава листьев при их старении и преобразованием спектра света, отраженного листовой пластинкой при длинах волн 670 и 500 нм [10].

В течение вегетации содержание калия в листьях может сильно изменяться в зависимости от погодных условий и плодовой нагрузки [2]. Например, в опытах М. Aichner и E. Stimp [11] в Северной Италии содержание калия в листьях увеличивалось в течение 40 дней после цветения, а затем снижалось вплоть до конца вегетации. О снижении содержания калия во второй половине вегетации сообщается и в работе Н. Н. Сергеевой и Н. Г. Пестовой [12]. Также есть сообщения о высоком уровне содержания калия в листьях ростовых побегов яблони на этапе гаметогенеза с последующим понижением к 2-3 этапу органогенеза [13].

Обнаружена связь между содержанием различных пигментов в листьях растений и уровнем минерального питания. В частности, установлено, что дефицит калия приводит к увеличению накопления антоцианов [14], оптимальная обеспеченность калием, напротив, способствует накоплению зеленых пигментов листа [15]. Об изменениях в количестве пигментов листа в листьях пшеницы (хлорофиллов и каротиноидов) под влиянием дефицита или избытка калия и других элементов питания сообщают S. H. Schach с соавторами [16]. В настоящее время продолжаются исследования, направленные на совершенствование экспрессного метода определения калия в листьях яблони с помощью спектрофотометрии без минерализации растительного материала.

Материалы и методы

Объекты исследований – деревья яблони сорта Жигулевское, привитые на подвой 62-396. Место исследований – экспериментальный сад ФГБНУ ФНЦ

им. И. В. Мичурина. Схема посадки 4,5х1 м, год закладки – 2007, содержание междурядий – черный пар. Почва выщелоченная, луговато-черноземная, тяжелосуглинистая. Содержание гумуса – 2,8-3,2%, мощность гумусового горизонта – 40...50 см. Полевая влагоемкость метрового слоя почвы – 27,9-28,7%, рНКСl = 5,5-5,6, сумма поглощенных оснований – 24,8-31,0 мг-экв./100 г почвы. Основные агрохимические характеристики почвы опытного участка перед закладкой опыта приведены в таблице 1.

Таблица 1. Содержание элементов питания в слое почвы 0-40 см при закладке опыта, мг/кг почвы

Варианты	Легкогидролизуемый азот	Доступный фосфор	Обменный калий	Подвижный кальций
Без внесения удобрений в почву	86,2-95,3	138,1-151,2	138,8-156,4	2754-2767
Внесение в приствольные полосы с заделкой на 10-15 см	147,0-162,4	180,1-185,4	202,2-205,5	2676-2722
Фертигация	152,9-171,3	159,7-166,4	210,4-216,9	2621-2698

В полевом опыте с внесением в почву минеральных удобрений в приствольные полосы с заделкой и фертигацией листья отбирали с середины однолетних приростов четырех сторон дерева пять раз в течение вегетации. Спектрофотометрирование листьев проводили в диапазоне 400-800 нм на спектрофотометре Agilent Cary 300 UV-VIS. Затем в этих листьях определяли содержание валового калия на пламенном фотометре Jenway PFP-7 [17]. Урожайность определяли методом весового учета, который проводили путем взвешивания плодов с каждого дерева на делянке [18]. Математическая обработка результатов осуществлялась в соответствии с общепринятыми методами, изложенными Б. А. Доспеховым [19], с использованием пакета программ Microsoft Excel 2007 и программы Statistica 8.0.

Целью данной работы было обоснование метода оценки обеспеченности яблони калием с помощью метода отражательной спектрофотометрии, что может быть весьма актуальным для проведения оперативных диагностических мероприятий калийного питания в течение вегетации.

Результаты исследований

Динамика содержания калия в листьях в течение вегетации 2014 г., когда был получен относительно высокий урожай плодов, характеризовалась снижением его концентрации вплоть до конца августа, а в дальнейшем произошло некоторое восстановление содержания калия в листьях (рис. 1).

Рис. 1. Динамика содержания валового калия в листьях яблони сорта Жигулевское (2014 г.), %

Мы считаем, что выявленный нами характер динамики содержания валового калия в значительной степени определялся плодовой нагрузкой. По мере роста и налива плодов снижалась концентрация калия в листьях. О подобных фактах также свидетельствуют сообщения отечественных и зарубежных авторов, приведенные выше. В послеуборочный период произошло некоторое восстановление концентрации калия до более высокого уровня за счет поступления данного нутриента, поглощенного корневой системой растений. Вероятно, что одной из причин этого является прекращение конкуренции между аттрактивными органами (листьями и плодами) после съема урожая.

Рис. 2. Динамика содержания валового калия в листьях яблони сорта Жигулевское (2015 г.), %

В 2015 г. количество валового калия в листьях наиболее резко уменьшалось в вариантах с высокой плодовой нагрузкой в течение 30 дней после цветения, и некоторое снижение было отмечено с 60-го по 90-й день (рис. 2). Концентрация калия в листьях к 120-му дню после цветения увеличивалась, однако это было не столь явно выражено, как в предшествующем году.

В 2015 г. наиболее отчетливо проявилось влияние плодовой нагрузки на концентрацию калия в листьях: содержание калия было значительно выше в варианте без внесения удобрений с минимальной нагрузкой плодами в данном году (табл. 2).

Таблица 2. Урожайность яблони сорта Жигулевское при различных способах внесения удобрений, т/га

Варианты	2014	2015	Среднее
Контроль без удобрений	18,3	25,4	21,9
Внесение в почву с заделкой	21,9	27,3	24,6
Фертигация	23,7	29,8	26,7
НСР ₀₅	1,9	2,4	1,6

Проведенное спектрофотометрирование листьев яблони показало, что у растений в различных вариантах в зависимости от почвенного фона изменяется спектр отражения (рис. 3). Рассчитанные нами коэффициенты корреляции между содержанием валового калия в листьях и показателем отражения света с длиной волн 450 нм, 550 нм, 670 и 780 нм показали весьма интересную зависимость с точки зрения их использования для разработки метода диагностики калийного питания без разрушения тканей листа (табл. 3).

Рис. 3. Спектры отражения листьев яблони сорта Жигулевское: А – 2014 г., Б – 2015 г.

Наиболее тесная корреляция как в 2014 г., так и в 2015 г. отмечена при отражении света с длиной волны 550 нм. Светособирающими пигментами в данной области спектра являются каротиноиды, а хлорофилл в основном отражает свет [20].

В данной области хлорофилл уже практически не поглощает свет, а отражает, что придает листу зеленую окраску. Несомненно, что содержание и состояние различных пигментов в листе зависят от обеспеченности листьев калием, поэтому отражение света с данной длиной волны позволяет оценивать его концентрацию при значении коэффициента парной корреляции $r = 0,83-0,91$ в 2014 г., и $r = 0,55-0,64$ в 2015 г. (табл. 3).

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между валовым содержанием калия в листьях яблони сорта Жигулевское и коэффициентом отражения света

Варианты	450 нм		550 нм		670 нм		780 нм	
	2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015
Контроль без удобрений	0,64	-0,80	0,83	0,55	0,60	-0,35	0,66	-0,66
Внесение в почву с заделкой	0,75	-0,32	0,91	0,64	0,74	-0,29	0,66	0,51
Фертигация	0,67	-0,51	0,87	0,60	0,68	0,09	0,57	0,75

В течение вегетации происходит быстрое перераспределение калия между органами растений, и его концентрация в листьях может резко меняться, например, вследствие оттока в формирующиеся плоды. В результате изучения динамики калия в листьях яблони в Венгрии в условиях интенсивного сада отмечено, что в процессе созревания плодов его содержание в листьях яблони снижалось вплоть до уборки, затем повышалось с последующим снижением [21]. О стабильном увеличении содержания калия в плодах на фоне снижения содержания калия в листьях вплоть до уборки с последующим повышением сообщают также Niederholzer с коллегами [22].

Подобные колебания содержания калия в растениях могут требовать вмешательства, что возможно в условиях интенсивного сада как за счет фертигации, так и некорневых подкормок. Обнаруженная нами зависимость между спектром отражения света листовой пластинкой и содержанием валового калия в листьях позволяет оценивать его концентрацию в листьях в течение всей вегетации для принятия оперативных решений по оптимизации минерального питания.

Проведенный регрессионный анализ полученных данных также показал высокую зависимость коэффициента отражения света листовой пластинкой (R) от содержания калия в листьях в течение вегетации (рис. 4).

Получено уравнение регрессии, характеризующее взаимосвязь между содержанием калия в листьях и отражением света:

$$R = 1,1461 + 7,489x \quad (1)$$

По данному уравнению регрессии эмпирическое значение t-критерия Стьюдента равно 5,904, что характеризует влияние анализируемого фактора с уровнем значимости 99,9%. Эмпирическое значение F-критерия Фишера равно 34,853. Данный показатель свидетельствует о том, что модель адекватна с уровнем значимости 99,99%.

Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения света с длиной волны 550 нм от валового содержания калия в листьях яблони сорта Жигулевское в 2014 г.

Как мы отмечали, сезонная динамика калия в листьях яблони в 2015 г. несколько отличалась от предшествующего года, однако это практически не сказалось на характере взаимосвязи между содержанием калия в листьях и отражением света (рис. 5). Полученное при этом уравнение регрессии, характеризующее взаимосвязь между содержанием калия в листьях и отражением света:

$$R = 5,7879 + 3,7563x, \quad (2)$$

обладало несколько меньшими, но достаточно значимыми статистическими характеристиками, отражающими качество построенной зависимости. В частности, эмпирическое значение t-критерия Стьюдента равно 2,68, что характеризует значимость анализируемого фактора с доверительной вероятностью 98,0%. Эмпирическое значение F-критерия Фишера равно 7,205. Данный показатель свидетельствует о том, что модель адекватна с уровнем значимости 99,0%. В целом следует отметить, что столь высокие статистические характеристики позволяют строить надежные прогнозы анализируемого процесса.

Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения света с длиной волны 550 нм от валового содержания калия в листьях яблони сорта Жигулевское в 2015 г.

Заключение

Проведенные исследования показали весьма тесную зависимость между отражением света листовой пластиной и валовым содержанием калия в них в течение вегетации. Это дает основания говорить о возможности применения метода отражательной спектроскопии для оценки содержания калия в листьях яблони. Так как спектр отражения непосредственно показывает оптические характеристики листовой пластины, которые индуцируются целым рядом различных факторов, он может не всегда отражать соответствующие изменения именно в содержании валового калия в листьях яблони, необходимы дальнейшие исследования.

Полученные в ходе нашего эксперимента данные можно считать только первым этапом, и они, несомненно, нуждаются в проверке и уточнении в ходе дальнейших лабораторных, полевых и вегетационных опытов. В ходе последующих исследований необходимо определить, как именно изменяется соотношение пигментов листа при различных уровнях калийного питания, а также подбор различных сочетаний длин волн спектра света, отраженного листьями, для расчета вегетативных индексов, позволяющих более стабильно и точно оценить концентрацию калия в листьях яблони.

Список использованной литературы

1. Кузин А.И., Трунов Ю.В., Соловьев А.В., Титова Л.В. Уточнение параметров листовой диагностики фосфорного питания в различные периоды вегетации яблони в Центральном Черноземье // Плодоводство и ягодоводство России, 2018 — Т. 52. — С. 128-136.
2. Кузин А.И., Трунов Ю.В. Особенности почвенно-листовой диагностики калийного питания яблони // Вестник российской сельскохозяйственной науки, 2016 — № 1. — С. 16-17.

3. Кузин А.И., Трунов Ю.В. Применение удобрений в садах // Интенсивные сады яблони средней полосы России: рекомендации, под ред. Ю.В. Трунова. — Воронеж: Изд-во «Кварта», 2016. — С. 67-79.

4. Demotes-Mainard S., Boumaza R., Meyer S., Cerovic Z.G. Indicators of nitrogen status for ornamental woody plants based on optical measurements of leaf epidermal polyphenol and chlorophyll contents // *Scientia Horticulture*, 2008. — Vol. 115, No. 4. — Pp. 377-385.

5. Введенская А.В., Введенский В.В., Гинс М.С., Хорохоров А.М. Недеструктивный метод диагностики азотообеспеченности растений оптико-электронной системой мониторинга растений // Вестник РУДН. Серия: Агрономия и животноводство, 2017. — Т. 12, № 1. — С. 7-16.

6. Guo X.Y., Zhu X.C., Li C., Wei Y., Yu X.Y., Zhao G.X., Sun H.X. Hyperspectral Inversion of Potassium Content in Apple Leaves Based on Vegetation Index // *Agricultural Sciences*, 2017. — Vol. 8, No. 8. — Pp. 825-836.

7. Леоничева Е.В., Роева Т.А., Леонтьева Л.И., Ветрова О.А. Сортовые особенности калийного питания яблони при некорневых подкормках // Садоводство и виноградарство, 2015. — № 5. — С. 35-41.

8. Шишкану Г.В. Фотосинтетическая деятельность яблони и возможные аспекты ее оптимизации : автореф. дис. ... д. б. наук. — Кишинев, 1974. — 48 с.

9. Мерзляк М.Н., Гительсон А.А., Чивкунова А.Б., Соловченко А.Е., Погосян С.И. Использование спектроскопии отражения в анализе пигментов высших растений // Физиология растений, 2003. — Т. 50, № 5. — С. 785-792.

10. Merzlyak M.N., Gitelson A.A., Chivkunova O.B., Rakitin V. Y. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening // *Physiologia plantarum*, 1999. — Vol. 106, No.1. — Pp. 135-141.

11. Aichner M., Stimpfl E. Seasonal Pattern and Interpretation of Mineral Nutrient Concentration in Apple Leaves // *Acta Horticulturae*, 2002. — Vol. 594. — Pp. 377-382.

12. Сергеева Н.Н., Пестова Н.Г. Параметры содержания основных минеральных элементов в листьях яблони в зависимости от этапа индивидуального развития растений и конструкции насаждений // Плодоводство и виноградарство Юга России, 2015. — № 33(03). — С. 86-96.

13. Сергеева Н.Н., Бунцевич Л.Л. Морфогенетические особенности развития и режим питания яблони в условиях Юга России // Сельскохозяйственная биология, 2010. — № 5. — С. 92-97.

14. Масленников П.В. Экологические аспекты накопления антоциановых пигментов в растениях : автореф. дис. ... к. б. наук. — Калининград, 2003. — 25 с.

15. Полевой В.В. Физиология растений: учеб для биол. спец. ВУЗов. — М.: Высшая школа, 1989. — 464 с.

16. Shah S.H., Houborg R., McCabe M.F. Response of Chlorophyll, Carotenoid and SPAD-502 Measurement to Salinity and Nutrient Stress in Wheat (*Triticum aestivum* L. // *Agronomy*, 2017. — Vol.7, No. 3. — [Electronic resource], URL: <http://www.mdpi.com/2073-4395/7/3/61>

17. Минеев В.Г., Сычев В.Г., Амелянчик О.А., Большиева Т.Н., Гомонова Н.Ф., Дурынина Е.П., Егоров В.С., Егорова Е.В., Едемская Н.Л., Карпова Е.А., Прижукова В.Г. Практикум по агрохимии - 2-е изд.: Учебное пособие. — М.: Изд-во МГУ, 2001. — 689 с.

18. Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур; Под общ. ред. Е. Н. Седова и Т. П. Огольцовой. — Орел: ВНИИСПК, 1999. — 606 с.

19. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) — 5-е изд., доп. и перераб. — М.: Агропромиздат, 1985. — 351 с.

20. Белова А.Ю., Мурашев С.В., Вержук В.Г. Влияние пигментов в листьях растений на формирование и свойства плодов [Электронный ресурс] // Процессы и аппараты пищевых производств, 2012. — № 1. — 13 с. — URL: <http://processes.open-mechanics.com/articles/488.pdf>. Дата обращения 29.03.2018

21. Holb I.J., Conda I., Vágó I., Nagy P.T. Seasonal dynamics of nitrogen, phosphorus and potassium contents of leaf and soil in environmental friendly apple orchards // Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2009. — Vol. 40, No. 1-6. — Pp. 694-705.

22. Niederholzer F.J.A., Carlson R.M., Urin K., Willits N.H., Pearson J.P. Seasonal partitioning of leaf and fruit potassium and fruit dry matter in french prune trees at various potassium levels // Journal of American Society for Horticultural Science, 1991. — Vol. 116, No. 6. — Pp. 981-986.

A.I. Kuzin, Y.V. Trunov, A.V. Solovyeu, B.I. Smagin

Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk

I.V. Michurin Federal Scientific Centre, Michurinsk

NON-DESTRUCTIVE DIAGNOSIS OF APPLE TREE POTASSIUM NUTRITION WITH REFLECTIVE SPECTROPHOTOMETRY