



Сравнительный анализ оптических методов выявления и идентификации вирусной инфекции при мониторинге вегетативно размножаемых сортов сирени

М. А. Келдыш¹, О. Н. Червякова¹, О. В. Шелепова¹,
И. В. Митрофанова¹, И. В. Петруня², К. А. Судариков²,
А. А. Гулевич², Е. Н. Баранова^{1,2}

¹ Главный ботанический сад имени Н. В. Цицина РАН, Москва, Россия.

² Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии, Москва, Россия.

В статье обсуждаются вопросы оценки перспективности выявления скрытой вирусной инфекции для мониторинга вирусных патогенов с использованием цифровой обработки изображений, полученных при использовании оптической цифровой камеры и гиперспектральных изображений. Приведены сведения о 13 видах вирусов на культуре *Syringa* L. Представлены данные о видовом составе вирусов *Syringa* в экосистемах ГЭС и Московского региона и симптоматика их проявления. На основании вирусологической экспертизы на сирени были диагностированы специализированные патогены Lilac ring mottle ilarvirus (LRMV), Lilac leaf chlorosis ilarvirus (LLCV), а также впервые несвойственные для сирени Carnation mottle carmovirus, Cucumber mosaic cucumovirus, Alfalfa mosaic alfamovirus и Potato Y potyvirus. В результате системного мониторинга определена частота встречаемости для 7 вирусов.

Ключевые слова: *Syringa* L., RGB, NDVI, PRI, фитовирусы, мониторинг, видовой состав, адаптивность

Comparative Analysis of Optical Methods for Detection And Identification of Viral Infection During Monitoring of Vegetatively Propagated Lilac Cultivar

M. A. Keldysh¹, O. N. Chervyakova¹, O. V. Shelepova¹,
I. V. Mitrofanova¹, I. V. Petrunya², K. A. Sudarikov²,
A. A. Gulevich², E. N. Baranova^{1,2}

¹ N. V. Tsitsin Main Botanical Garden RAS, Moscow, Russia

² All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, Moscow, Russia

The article discusses the issues of assessing the prospects for detecting latent viral infection for monitoring viral pathogens using digital processing of images obtained by an optical digital camera and hyperspectral images. Information on 13 types of viruses that have been registered in some regions where *Syringa* L. grows is provided. Data on the species composition of *Syringa* viruses in the ecosystems of the Main Botanical Garden and the Moscow region and their symptoms are described. Based on the virological examination, specialized pathogens Lilac ring mottle ilarvirus (LRMV), Lilac leaf chlorosis ilarvirus (LLCV), as well as Carnation mottle carmovirus, Cucumber mosaic cucumovirus, Alfalfa mosaic alfamovirus and Potato Y potyvirus, which are not typical for lilacs, were diagnosed on lilac. As a result of system monitoring, the frequency of occurrence of seven viruses was determined.

Key words: *Syringa* L., RGB, NDVI, PRI, phytoviruses, monitoring, adaptivity

Article received: 13.10.2024

Article accepted: 11.11.2024

Статья поступила: 13.10.2024

Статья принята: 11.11.2024

ВВЕДЕНИЕ

Наибольшее распространение для озеленения городов завоевала высокодекоративная Сирень обыкновенная *Syringa vulgaris* L., проявляющая обильное цветение в течение 3–4 недель в зависимости от сорта и климатических условий. Для сохранения ценных генотипов используют дендрологические коллекционные участки, коллекции *in vitro* и методику криосохранения.

В открытом грунте растения сирени сталкиваются с широким кругом патогенных организмов. Особенно трудно справиться с последствиями заражения фитоплазмами, вирусами и вироидами. Качественные методы индивидуальной диагностики с применением иммуноферментного анализа, методов ПЦР и даже секвенирования довольно дороги и не всегда дают адекватный ответ о том, каким именно вирусом заражено растение. Разнообразие же вирусов, повреждающих растения, довольно велико. Между тем, изучение патогенеза вирусов показывает, что они вызывают изменения в составе хлорофиллов, каротиноидов и антоцианов.

В настоящей работе мы предположили, что вирусная инфекция должна проявляться в изменении окраски, при инструментальном анализе фотоизображений и изображений, полученных гиперспектральной камерой. Мы демонстрируем различия в составе пигментов в листьях с четко идентифицированным вирусным повреждением и впервые сообщаем о том, что различия в зеленой части таких листьев могут представлять собой существенный потенциал для разработки методов оптического инструментального мониторинга.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось на территории карантинного участка отдела защиты растений Главного Ботанического Сада РАН (ГБС РАН), г. Москва. Тестирование проводилось методом иммуноферментного анализа (ДАС-ИФА на основе стандартной методики) с использованием набора Kit Neogen Europe Ltd. Оптическую плотность продукта окисления определяли с помощью иммуноферментного анализатора АИЭР-01 УНИПЛАН ТМ.

Для ОТ-ПЦР вируса хлороза листьев сирени (LLCV) использовали РНК, выделенную из листьев сирени с помощью набора магнитных частиц PhytoSorb (Синтол). Использовали праймеры

INTRODUCTION

The most widespread for urban landscaping is the highly decorative common lilac *Syringa vulgaris* L., which blooms abundantly for 3–4 weeks depending on the variety and climatic conditions. To preserve valuable genotypes, dendrological collection sites, *in vitro* collections and cryopreservation techniques are used. When grown outdoors, lilac plants are exposed to a wide range of pathogenic organisms. It is especially difficult to cope with the consequences of infection by phytoplasmas, viruses and viroids. Qualitative methods of individual diagnostics using enzyme immunoassay, PCR methods and even sequencing are quite expensive and do not always provide an adequate answer about what kind of virus the plant is infected with. The diversity of viruses that damage plants is quite large. Meanwhile, the study of the pathogenesis of viruses shows that they cause changes in the composition of chlorophylls, carotenoids and anthocyanins.

In this work, we hypothesized that viral infection should be manifested by a change in color, during instrumental analysis of photographic images and images obtained by a hyperspectral camera. We demonstrate differences in pigment composition in leaves with clearly identified viral damage and report for the first time that differences in the green part of such leaves may represent significant potential for the development of optical instrumental monitoring methods.

MATERIALS AND METHODS

The study was conducted in the quarantine area of the Plant Protection Laboratory of the N.V. Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences (MBC RAS), Moscow. Testing was performed by enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA based on standard methodology) using the Kit Neogen Europe Ltd. The optical density of the oxidation product was determined using the АИЭР-01 УНИПЛАН ТМ enzyme immunoassay analyzer.

For RT-PCR of lilac leaf chlorosis virus (LLCV), RNA isolated from lilac leaves using the PhytoSorb magnetic particle kit (Synthol) was used. Primers to conservative regions of the Ilarvirus (Lilac Leaf Chlorosis Virus – LLCV) transport protein were used. IlarCPF: 5'-gcaatcgaacggagctagt-3' IlarCPF: 5'-cacaagctgacagaaggca-3'. The reaction products were separated by electrophoresis in 1% agarose gel.

HSI (hyperspectral imaging) data were obtained using the hyperspectral camera of the Synergotron M.Gk (hyperspectral research module). Image analysis of LLCV-damaged leaves was carried out at



к консервативным участкам транспортного белка вируса *Lilac Leaf Chlorosis Virus – LLCV*. $I_{\lambda}CPF: 5'-gcaatcgaaacggagctagtg-3'$ $I_{\lambda}CPF: 5'-cacaagctgacagaaggca-3'$. Продукты реакции разделяли электрофорезом в 1% агарозном геле.

HSI данные были получены с помощью гиперспектральной камеры Синерготрона М.Гк (модуль гиперспектральных исследований). Проведен анализ изображений в точках последующего отбора проб для спектрофотометрического анализа листьев, поврежденных вирусом LLCV. Для обработки снимков использовался индекс фотохимической отражательной способности (PRI) [1] и нормализованный вегетационный индекс (NDVI) [2]. Общая формула:

$$\text{Индекс} = (\rho\lambda_1 - \rho\lambda_2) / (\rho\lambda_1 + \rho\lambda_2)$$

$$\text{PRI} = (\rho_{531} - \rho_{570}) / (\rho_{531} + \rho_{570})$$

$$\text{NDVI} = (\rho_{800} - \rho_{680}) / (\rho_{800} + \rho_{680})$$

Где λ обозначает конкретные длины волн, ρ обозначает коэффициент отражения, а цифры 1 и 2 обозначают разные длины волн. Значения индексов варьируются от -1 до 1. Диапазон значений индекса PRI от -0,2 до 0,2, диапазон значений индекса NDVI от 0,5 до 0,95.

NDVI помогает лучше отделять фон и выявляет выраженные очаги инфекции. NDVI, в первую очередь, чувствителен к содержанию хлорофилла [3]. Индекс PRI дает возможность определять поражения листа на более ранних этапах, он чувствителен к изменениям в каротиноидных пигментах и полезен для оценки эффективности фотосинтеза и стресса у растений.

Снимки получены RGB камерой с матрицей $1\text{m} \times 415$ Sony 8.0 Мп. Использовалась цветовая модель HSV (Hue, Saturation, Brightness), где все цвета видимого спектра можно описать значением цветового тона в пределах 0–360° для построения корреляции показателя цвета со значением хлорофилла [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ

На сегодняшний день известно 13 типов вирусов, поражающих сирень, относящихся к 6 семействам [5]. В сирени были выявлены такие патогены, как вирус крапчатости вяза (EMoV), вирус мозаики арабиса (ArMV), вирус скручивания листьев вишни (CLRV), вирус кольцевой крапчатости сирени (LRMV), вирус черного кольца томата (ToBRV), вирус кустистого оглушения томата (ToBSV), вирус мозаики томата (ToMV), вирус табачной мозаики (TMV), вирус лигуструма А (LVA), вирус хлороза листьев сирени (LLCV). Для вируса крапчатости сирени (LMoV), вируса кольце-

subsequent sampling points for spectrophotometric analysis. To process the images the photochemical reflectance index (PRI) [1] and the normalized vegetation index (NDVI) [2] were used. The general formula for both indices is:

$$\text{Index} = (\rho\lambda_1 - \rho\lambda_2) / (\rho\lambda_1 + \rho\lambda_2)$$

$$\text{PRI} = (\rho_{531} - \rho_{570}) / (\rho_{531} + \rho_{570})$$

$$\text{NDVI} = (\rho_{800} - \rho_{680}) / (\rho_{800} + \rho_{680})$$

Where λ denotes specific wavelengths, ρ denotes the reflectance, and the numbers 1 and 2 denote the different wavelengths. The values of both indices vary from -1 to 1. The range of PRI index values is from -0.2 to 0.2, the range of NDVI index values is from 0.5 to 0.95.

NDVI helps to better separate the background and reveal pronounced foci of infection. NDVI is primarily sensitive to chlorophyll content [3]. The PRI index allows earlier detection of leaf damages, is sensitive to changes in carotenoid pigments, and is useful for assessing photosynthetic efficiency and stress in plants.

The images were taken with an RGB camera with an $1\text{m} \times 415$ Sony 8.0 MP matrix. The HSV (Hue, Saturation, Brightness) color model was used, where all colors of the visible spectrum can be described by the hue value within the range of 0–360°, to construct a correlation of the color index with the chlorophyll value [4].

RESULTS

To date, 13 types of viruses are known that affect lilacs, belonging to six families [5]. The following pathogens have been identified in lilac: elm mottle virus (EMoV), arabis mosaic virus (ArMV), cherry leafroll virus (CLRV), lilac ringspot virus (LRMV), tomato black ring virus (ToBRV), tomato bushy stunt virus (ToBSV), tomato mosaic virus (ToMV), tobacco mosaic virus (TMV), ligustrum virus A (LVA), lilac leaf chlorosis virus (LLCV). For lilac mottle virus (LMoV), lilac ringspot virus (LRSV) and lilac chlorotic leaf spot virus (LCLV), data are limited [5; 6].

As a result of systematic monitoring of lilac plantings in the Main Botanical Garden and Moscow Region, pathogens of viral etiology that are not typical for lilac culture have become widespread [7]. In the tested *Syringa* populations, we recorded a variety of symptoms characteristic of the phenotypic manifestation of viral diseases: chlorosis, ring spotting, linear pattern, mosaic, lightening of veins, necrosis, mottling, and various types of deformation. Symptoms appear in early spring and are extremely varied and change during the growing season. The most common and characteristic signs of the viral manifestation on lilacs are

вой пятнистости сирени (LRSV) и вируса хлоротической пятнистости листьев сирени (LCLV) данные ограничены [5, 6].

В результате систематического мониторинга в посадках сирени в ГБС и Московской области, широкое распространение получили возбудители вирусной этиологии, нехарактерные для культуры сирени [7]. В исследованных популяциях *Syringa* нами зафиксированы разнообразные симптомы, характерные для фенотипического проявления вирусных заболеваний: хлороз, кольцевая пятнистость, линейный рисунок, мозаика, осветление жилок, некроз, крапчатость и различные виды деформации. Симптомы появляются ранней весной и чрезвычайно разнообразны, изменяются в течение вегетационного периода. Наиболее распространенными и характерными признаками проявления вирусов на сирени являются различные виды мозаики, для которых характерно изменение окраски листьев (цветков). Например, это могут быть мелкие желтые пятна, которые постепенно сливаются. Мозаика может ограничиваться отдельными участками или покрывать весь лист, напоминая мраморность. Белый рисунок часто сопровождается сильным хлорозом. Листья могут стать почти белыми с отдельными зелеными участками. Мозаика может проявляться и на молодых листьях в виде светлых, размытых пятен между жилками. Крапчатость на сирени встречается довольно часто, но симптомы обычно нечетко выражены. Они появляются весной, видны в течение двух-трех недель. Характерным проявлением некоторых вирусов является образование колец, полуколец и пятен, которые впоследствии могут некротизироваться. Обычно имеет место комплексное заражение, в результате которого внешние признаки модифицируются. Проявление одинаковых вирусов на разных сортах и видах сирени может различаться, тогда как вирусы разных видов могут вызывать схожие фенотипические признаки или их элементы. Например, кроме ArMV, CLRV, EMoV (рис. 1), нами диагностированы на сирени специализированные вирусы LRMoV и LLCV. А также, помимо уже известных, новые и необычные вирус крапчатости гвоздики (CarMoV), вирус мозаики огурца (CMV), вирус мозаики люцерны (AMV) и вирус картофеля «Y» (PVY). LLCV также был впервые зарегистрирован в Московской области России с использованием метода ПЦР. Вирус получил широкое распространение в молодых посадках города. В коллекции сирени и в других экосистемах ГБС вирус не обнаружен.

various types of mosaic, which are characterized by a change in the color of the leaves (flowers). For example, these may be small yellow spots that gradually merge. The mosaic can be limited to individual areas or cover the entire leaf, reminiscent of marbling. The white pattern is often accompanied by severe chlorosis. Leaves may become almost white with occasional green areas. Mosaic can also appear on young leaves as light, blurred spots between the veins. Mottling on lilacs is quite common, but symptoms are usually vague. They appear in the spring and are visible for two to three weeks. A characteristic manifestation of some viruses is the formation of rings, semi-rings and spots, which can subsequently become necrotic. Usually a complex infection occurs, as a result of which the external signs are modified. The manifestation of the same viruses on different varieties and species of lilac may vary, while viruses of different species may cause similar phenotypic traits or their elements. For example, in addition to ArMV, CLRV, EMoV (Figure 1), the specialized viruses LRMoV and LLCV on lilac were diagnosed. And also, in addition to the already known ones, new and unusual viruses: carnation mottle virus (CarMoV), cucumber mosaic virus (CMV), alfalfa mosaic virus (AMV) and potato virus “Y” (PVY) were detected. LLCV was also first registered in the Moscow region using the PCR method. The virus has become widespread in the city’s young plantings. The virus was not detected in the lilac collection or in other GBS ecosystems.

To evaluate the sampled leaves the spectral analysis methods were applied. In this case, areas with a green color (point 1), areas with signs of chlorosis (point 2) and areas with less pronounced or borderline damage (point 3) were analyzed for the quantitative content of pigments (chlorophylls a, b and carotenoids). At the sampling sites, an analysis of the color characteristics of the red, green and blue (RGB) spectrum indicators was carried out, as well as the calculation of H° , after which a correlation analysis of the entire volume of data was carried out and selectively for the data obtained in zones without damage, with chlorosis and intermediate (see Table).

The revealed correlation is valid for values greater than $|0.7|$. The obtained data demonstrate the possibility of analyzing damage to photosynthesis in infected plants specifically by the undamaged part of the leaves, where a correlation between the expression of the RGB color parameters and chlorophyll a was found. A correlation was also found between carotenoid content and blue range digital values.

For hyperspectral analysis, samples were taken from lilac bushes that had characteristic manifesta-

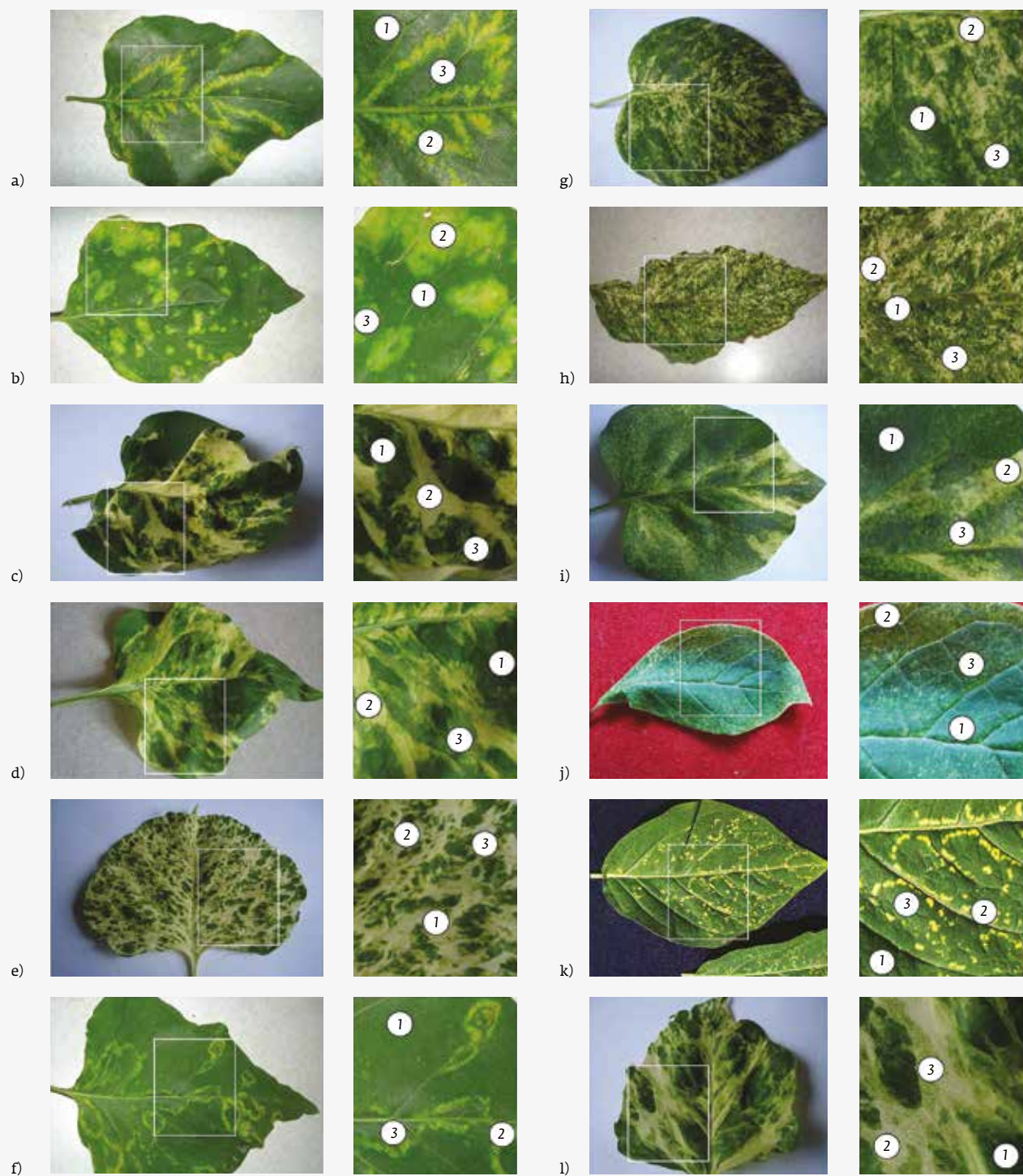


Рис. 1. Внешние симптомы проявления вирусов и точки отбора проб для спектрофотометрического определения образцов и оценки оптических значений RGB (red, green, blue): а) – Arabis mosaic virus; б) – Cherry leaf roll virus; в) – Lilac leaf chlorosis virus; д) – Lilac ring mottle virus; е) – Tobacco mosaic virus; ф) – Tomato mosaic virus; г) – Carnation mottle virus; h) – Elm mottle virus; и) – Lilac ring mottle virus + Tobacco mosaic virus (кружками отмечены места взятия проб)

Fig. 1. External symptoms of virus manifestation and sampling points for spectrophotometric determination of samples and evaluation of RGB (red, green, blue) optical values: а) – Arabis mosaic virus; б) – Cherry leaf roll virus; в) – Lilac leaf chlorosis virus; д) – Lilac ring mottle virus; е) – Tobacco mosaic virus; ф) – Tomato mosaic virus; г) – Carnation mottle virus; h) – Elm mottle virus; и) – Lilac ring mottle virus + Tobacco mosaic virus (the circles indicate the sampling locations)



Спектральные методы анализа были применены для оценки отобранных листьев. При этом участки, имеющие зеленую окраску (точка 1), участки, имевшие признаки хлороза (точка 2), и участки, имевшие менее выраженные или пограничные повреждения (точка 3), анализировали на предмет количественного содержания пигментов (хлорофиллов а, б и каротиноидов). В местах отбора проб проводили анализ цветовых характеристик показателей красного, зеленого и голубого спектра RGB, а также расчет H° , после чего был проведен корреляционный анализ всего объема данных и выборочно для данных, полученных в зонах без повреждений, зонах с хлорозом и промежуточных зонах (см. табл.).

Выявленная корреляция действительно при значениях более $|0,7|$. Полученные данные демонстрируют возможность анализа повреждения фотосинтеза у зараженных растений именно по неповрежденной части листьев, где была выявлена корреляция выраженности цветовых параметров RGB и хлорофилла а. Также была обнаружена корреляция содержания каротиноидов и цифровых значений голубого диапазона.

Для гиперспектрального анализа отобрали образцы с кустарников сирени, имевших характерные проявления хлороза в разной степени выраженности, и которые, вероятно, были заражены несколькими вирусами. В дальнейшей работе мы использовали образцы, у которых имелась подтвержденная инфекция Lilac Leaf Chlorosis Virus - LLCV (рис. 2). Таким образом, для дальнейшего анализа было отобрано 6 образцов.

Полученные данные свидетельствуют о возможности использования гиперспектральной камеры Синерготрона М.Гк для мониторинга и анализа вирусных патогенов. Следует проводить сравнительный анализ по 3-4 точкам, которые будут характеризовать развитие инфекции

of chlorosis in varying degrees of severity and which were probably infected with several viruses. In further work, the samples that had confirmed Lilac Leaf Chlorosis Virus (LLCV) infection were used (Fig. 2). Thus, six samples were selected for further analysis.

The obtained data indicate the possibility of using the Synergotron M.Gk hyperspectral camera for monitoring and analysis of viral pathogens. A comparative analysis should be carried out at 3-4 points that will characterize the development of infection (Fig. 3).

We consider the use of the PRI index to be more promising, since the leaf damage zones were not obvious when using NDVI.

The results confirm that the use of hyperspectral images can significantly facilitate the work of plant pathologists and be used both for monitoring the con-

Таблица. Тепловая карта коэффициентов корреляции для измеренных значений RGB и показаний измерений пигментов в участках листа согласно рис. 1. Суммарно по точкам 1, 2, 3, суммарно по точкам 1 (листовая пластина характерной окраски), точкам 2 (листовая пластина, имеющая явные повреждения (хлороз)), точкам 3 (листовая пластина, имеющая пограничные повреждения с остатками зеленого пигмента)

Table. Heat map of the correlation coefficients for the measured RGB values and the readings of pigment measurements in the leaf areas according to Fig. 3. Total for points 1, 2, 3, total for points 1 (leaf blade of characteristic color), points 2 (leaf blade with obvious damage (chlorosis)), points 3 (leaf blade with border damage with green pigment residues)

1, 2, 3	R	G	B
R	1	0,94	0,79
G	0,94	1	0,74
B	0,79	0,74	1
H°	-0,67	-0,50	-0,24
Cchl _a , mg/g	-0,65	-0,59	-0,55
Cchl _b , mg/g	-0,29	-0,32	-0,30
C(Car), mg/g	-0,48	-0,44	-0,41

1	R	G	B
R	1	0,92	0,94
G	0,92	1	0,87
B	0,94	0,87	1
H°	-0,48	-0,31	-0,18
Cchl _a , mg/g	-0,86	-0,76	-0,71
Cchl _b , mg/g	-0,65	-0,68	-0,59
C(Car), mg/g	-0,65	-0,61	-0,72

2	R	G	B
R	1	0,81	0,76
G	0,81	1	0,41
B	0,76	0,41	1
H°	-0,40	0,16	-0,37
Cchl _a , mg/g	-0,04	-0,15	-0,23
Cchl _b , mg/g	0,81	0,64	0,51
C(Car), mg/g	0,17	-0,03	0,03

3	R	G	B
R	1	0,93	0,66
G	0,93	1	0,73
B	0,66	0,73	1
H°	-0,42	-0,21	0,36
Cchl _a , mg/g	-0,13	0,07	-0,19
Cchl _b , mg/g	0,01	0,08	-0,16
C(Car), mg/g	-0,08	0,10	-0,03

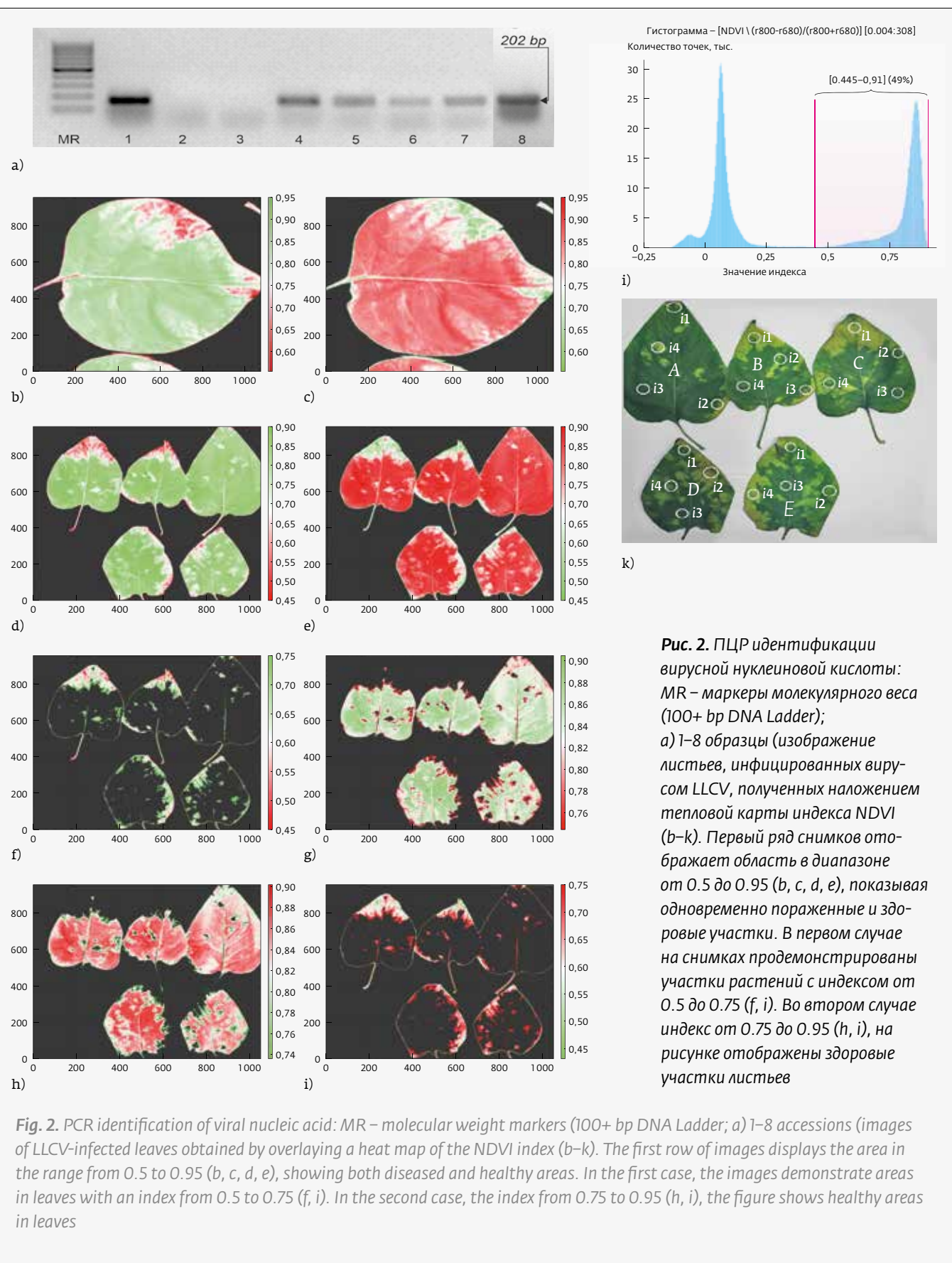


Рис. 2. ПЦР идентификации вирусной нуклеиновой кислоты: MR – маркеры молекулярного веса (100+ bp DNA Ladder); а) 1–8 образцы (изображение листьев, инфицированных вирусом LLCV, полученных наложением тепловой карты индекса NDVI (b–k). Первый ряд снимков отображает область в диапазоне от 0.5 до 0.95 (b, c, d, e), показывая одновременно пораженные и здоровые участки. В первом случае на снимках продемонстрированы участки растений с индексом от 0.5 до 0.75 (f, i). Во втором случае индекс от 0.75 до 0.95 (h, i), на рисунке отображены здоровые участки листьев

Fig. 2. PCR identification of viral nucleic acid: MR – molecular weight markers (100+ bp DNA Ladder; a) 1–8 accessions (images of LLCV-infected leaves obtained by overlaying a heat map of the NDVI index (b–k). The first row of images displays the area in the range from 0.5 to 0.95 (b, c, d, e), showing both diseased and healthy areas. In the first case, the images demonstrate areas in leaves with an index from 0.5 to 0.75 (f, i). In the second case, the index from 0.75 to 0.95 (h, i), the figure shows healthy areas in leaves

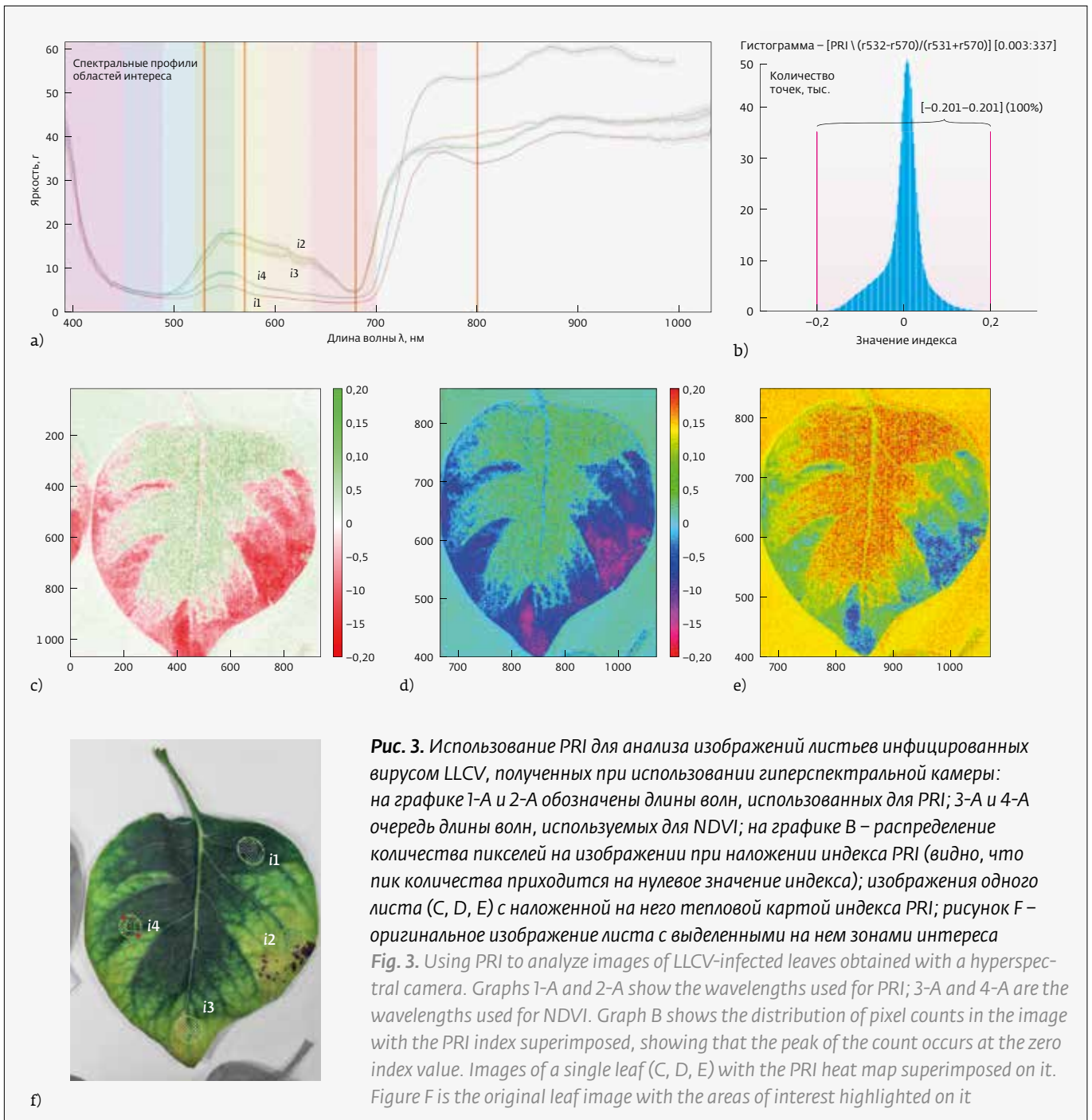


Рис. 3. Использование PRI для анализа изображений листьев инфицированных вирусом LLCV, полученных при использовании гиперспектральной камеры: на графике 1-А и 2-А обозначены длины волн, использованных для PRI; 3-А и 4-А очередь длины волн, используемых для NDVI; на графике В – распределение количества пикселей на изображении при наложении индекса PRI (видно, что пик количества приходится на нулевое значение индекса); изображения одного листа (С, D, Е) с наложенной на него тепловой картой индекса PRI; рисунок F – оригинальное изображение листа с выделенными на нем зонами интереса

Fig. 3. Using PRI to analyze images of LLCV-infected leaves obtained with a hyperspectral camera. Graphs 1-A and 2-A show the wavelengths used for PRI; 3-A and 4-A are the wavelengths used for NDVI. Graph B shows the distribution of pixel counts in the image with the PRI index superimposed, showing that the peak of the count occurs at the zero index value. Images of a single leaf (C, D, E) with the PRI heat map superimposed on it. Figure F is the original leaf image with the areas of interest highlighted on it

(рис. 3). Использование индекса PRI мы считаем более перспективным, так как зоны повреждения листа были невидными при использовании NDVI.

Результаты подтверждают, что применение гиперспектральных снимков может значительно облегчить работу фитопатологов и использоваться как для мониторинга состояния насаждений, так и для выбраковки посадочного материала в питомниках размножения, а также может

condition of plantings and for culling planting material in propagation nurseries, as well as preventing the placement of infected material in collection banks for *in vitro* clonal micropropagation.

DISCUSSION

The genus *Syringa* L. (Oleaceae) includes many intra-specific and interspecific varieties, the number of which reaches 2300. Lilac is one of the most common shrubs for landscaping in the world, including both



предотвратить закладку зараженного материала в коллекционные банки для клонального микро-размножения *in vitro*.

ОБСУЖДЕНИЕ

Род *Syringa* L. (семейство Масличные) включает множество внутривидовых и межвидовых сортов, количество которых достигает 2300. Сирень – один из самых распространенных кустарников для озеленения мира, включая как северные, так и южные регионы. Это декоративное растение также является источником многих природных фитохимических и фармакологических соединений [8]. Сирень является вегетативно-размножаемой культурой, поэтому необходима выбраковка зараженных образцов в дендрариях и создание устойчивых коллекций в культурах *in vitro* [9; 10].

Вирусные патогены демонстрируют системный характер инфекции и зараженное растение остается больным на протяжении всей своей жизни. Показано изменение видового состава вирусов, соотношения и структуры их популяций, распространение новых инфекций, нехарактерных для конкретной культуры [11].

При мониторинге вирусных патогенов в популяциях *Syringa* в ГБС выявлено, что наиболее заметной тенденцией является преобладание вирусов с широким спектром растений-хозяев (ToMV, CMV, ArMV) и специфичных для других сельскохозяйственных культур (AMV, CarMV, PVY, EMoV). На сирени также обнаружено восемь атипичных и два специализированных патогена [6]. Наибольшие показатели частоты встречаемости в пределах 55–70% образцов отмечены для CMV, далее следуют ArMV, TMV, EMoV, PVY, CarMV (45%, 43%, 37%, 28%, 13%). Наличие LRMoV обнаружено только в 7% образцов. Было выяснено, что в популяциях *Syringa* преимущественно распространены комплексные заболевания, вызванные несколькими вирусами. Моноинфекция обнаружена только у 40% протестированных образцов. Видовой постоянно трансформировался. При взаимодействии двух и более вирусов в одном хозяине подавляющая активность одного из вирусов способна оказывать комплексное действие на вирусы, входящие в комплекс, и приводить к заражению растения всем их конгломератом [12].

Основной целью наших исследований было изучить спектр вирусных возбудителей *Syringa* L. Сравнивая полученные изображения с наложенными на них тепловыми картами вышеперечис-

ленных и южных регионах. This ornamental plant is also a source of many natural phytochemical and pharmacological compounds [8]. Lilac is a vegetatively propagated crop, so it is necessary to cull infected accessions in arboretums and create stable collections *in vitro* cultures [9; 10].

Viral pathogens demonstrate a systemic nature of infection and the infected plant remains sick throughout its life. Changes in the species composition of viruses, the ratio and structure of their populations, the spread of new infections that are not characteristic of a particular plant are shown [11].

Monitoring of viral pathogens in *Syringa* populations in the MBG revealed that the most noticeable trend is the predominance of viruses with a wide host range (ToMV, CMV, ArMV) and specific to other crops (AMV, CarMV, PVY, EMoV). Eight atypical and two specialized viral pathogens were also found on lilac [6]. The highest frequency rates within 55–70% of accessions were noted for CMV, followed by ArMV, TMV, EMoV, PVY, CarMV (45%, 43%, 37%, 28%, 13%). The presence of LRMoV was detected in only 7% of accessions. It was found that complex diseases caused by several viruses are predominantly common in *Syringa* populations. Monoinfection was detected in only 40% of the accessions tested. The species composition was constantly transforming. When two or more viruses interact in one host, the suppressive activity of one of the viruses can have a complementary effect on the viruses included in the complex and lead to infection of the plant by their entire conglomerate [12].

The main objective of our research was to study the spectrum of viral pathogens of *Syringa* L. Comparing the obtained images with the superimposed heat maps of the above indices, we can conclude that NDVI helps to better separate the background (non-living objects, on a painted field or on a sheet of paper), but also helps with the definition of pronounced foci of plant disease. NDVI is primarily sensitive to chlorophyll content and is widely used to estimate biomass, leaf area index and total vegetation canopy [3]. At the same time, the PRI index makes it possible to identify diseases or leaf damage at early stages; it is sensitive to changes in carotenoid content and responsive to changes in photosynthesis and stress in plants.

ACKNOWLEDGMENT

Study was carried out within the framework of the state assignment of the N.V. Tsitsin MBG of the RAS (No. 124030100058-4) and the ARRIAB (No. 04312022-0003). The results of the work were obtained using the Synergotron M.Gk Modules (ANO Institute for Development Strategy, Russia).



ленных индексов, мы можем сделать вывод, что NDVI помогает лучше отделять фон (неживые объекты, на окрашенном поле или на листе бумаги), но также помогает с определением ярко выраженных очагов заболевания растений. NDVI в первую очередь чувствителен к содержанию хлорофилла и широко используется для оценки биомассы, индекса поверхности листьев и общего растительного покрова [3]. В то же время индекс PRI дает возможность определить заболевание или поражение листа на ранних этапах, он чувствителен к изменениям в содержании каротиноидов, отзывчив на изменения фотосинтеза и стресса у растений.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа проводилась в рамках выполнения государственного задания ГИС РАН (№ 124030100058-4) и ВНИИСБ (№ 04312022-0003). Результаты работы получены с использованием Синерготрона М.Гк (АНО ИСР, Россия).

REFERENCES

1. **Sukhova E, Sukhov V.** Analysis of Light-Induced Changes in the Photochemical Reflectance Index (PRI) in Leaves of Pea, Wheat, and Pumpkin Using Pulses of Green-Yellow Measuring Light. *Remote Sensing*. 2019; 11(7):810. DOI: 10.3390/rs11070810.
2. **Zhao Q., Qu Y.** The Retrieval of Ground NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) Data Consistent with Remote-Sensing Observations. *Remote Sensing*. 2024; 16: 1212. DOI: 10.3390/rs16071212.
3. **Xu Y., Shrestha V., Piasecki C., Wolfe B., Hamilton L., Millwood R. J., Mazarei M., Stewart C. N.** Sustainability trait modeling of field-grown switchgrass (*Panicum virgatum*) using UAV-based imagery. *Plants*. 2021; 10(12): 2726. DOI: 10.3390/plants10122726.
4. **Shelepova O. V., Baranova E. N., Sudarikov K. A., Olekhovich L. S., Konovalova L. N., Latushkin V. V., Vernik P. A., Gulevich A. A.** Evaluation of the Use of LED Lighting in Combination with the Use of γ -PGA SAP Peptide on the Growth and Development of Peppermint Plants in a Closed Biosystem. *Photonics Russia*. 2024; 18(6): 486–498. DOI: 10.22184/1993-7296.
Шелепова О. В., Баранова Е. Н., Судариков К. А., Олехнович Л. С., Коновалова Л. Н., Латушкин В. В., Гулевич А. А., Верник П. А. Оценка использования светодиодного освещения в сочетании с применением γ -PGA SAP пептида на рост и развитие растений мяты перечной в условиях закрытой биосистемы. *Фотоника*. 2024; 18(6): 486–498. DOI: 10.22184/1993-7296.
5. **Hull R., Brown F., Fand Paule C.** *Directory and Dictionary of Animal, Bacterial and Plant Viruses*. – Mac Millan Reference Books, London. 1989.119.
6. **Jiseon O., Jisuk Y., Suyeon J., Kook-Hyung K.** Identification of a new strain of ligustrum virus A causing leaf necrosis and chlorosis symptoms in *Syringa oblata* var. *dilatata* (Nakai) Rehder. *Archives of Virology*. 2022. 167(6): 1487–1490. DOI: 10.1007/s00705-022-05439-1.
7. **Chervyakova O. N., Keldysh M. A.** Bolezni i vrediteli sireni. *Cvetovodstvo*. 2011; 5: 12–15.
Червякова О. Н., Келдыш М. А. Болезни и вредители сирени. *Цветоводство*. 2011; 5: 12–15.
8. **Su G., Cao Y., Li C., Yu X., Gao X., Tu P., Chai X.** Phytochemical and pharmacological progress on the genus *Syringa* L. *Chemistry Central Journal*. 2015; 9:1–12. DOI: 10.1186/s13065-015-0079-2.
9. **Koroleva O. V.; Molkanova O. I.; Vysotskaya O. N.** Development of cryopreservation technique for meristems of *Syringa vulgaris* L. cultivars. *International Journal of Plant Biology*. 2023;14: 625–637. DOI: 10.3390/ijpb14030048.
10. **Seitadzhieva S., Gulevich A. A., Yegorova N., Nevkrytaya N., Abdurashytov S., Radchenko L., Pashetskiy V., Baranova E. N.** Viral infection control in the essential oil-bearing rose nursery: Collection maintenance and monitoring. *Horticulturae*. 2022; 8: 629. DOI: 10.3390/horticulturae8070629.
11. **Keldysh M. A., Chervyakova O. N.** Osobennosti rasprostraneniya i adaptivnosti virusov v ekosistemah drevesnykh rastenij. *Drevesnye rasteniya: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya*. 2013; 2: 46–54.
Келдыш М. А., Червякова О. Н. Особенности распространения и адаптивности вирусов в экосистемах древесных растений. *Древесные растения: фундаментальные и прикладные исследования*. 2013; 2: 46–54.
12. **Scholthof H. B.** Plant virus transport: motions of functional equivalence. *Trends in Plant Science*. 2005;10(8): 376–382. DOI: 10.3109/17435390.2015.1048326.

АВТОРЫ

- Келдыш М. А., к. б. н.; e-mail: k.marina2009@mail.ru; с. н. с., Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина РАН, Москва, Россия.
Scopus Id 58167740200
- Червякова О. Н., к. б. н.; e-mail: cherolya@mail.ru; с. н. с., Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина РАН, Москва, Россия.
ORCID: 0000-0001-6797-9135
- Шелепова О. В., к. б. н., в. н. с., Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина РАН, Москва, Россия.
ORCID: 0000-0003-2011-6054
- Митрофанова И. В., д. б. н., г. н. с., Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина РАН, Москва, Россия.
ORCID: 0000-0002-4650-6942
- Петруня И. В., к. б. н., н. с., Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии, Москва, Россия
- Судариков К. А., инженер-исследователь, Российский государственный аграрный университет, Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии, Москва, Россия,
ORCID: 0009-0005-8734-1223
- Гулевич А. А., к. б. н., с. н. с., Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии, Москва, Россия,
ORCID: 0000-0003-4399-2903
- Баранова Е. Н., к. б. н., с. н. с., Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина РАН, Москва, Россия.
ORCID: 0000-0001-8169-9228

AUTHORS

- Keldysh M. A., Candidate of Biological Sciences; e-mail: k.marina2009@mail.ru; Senior Researcher, N. V. Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
Scopus Id 58167740200
- Chervyakova O. N., Candidate of Biological Sciences; e-mail: cherolya@mail.ru; Senior Researcher, N. V. Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0001-6797-9135
- Shelepova O. V., Candidate of Biological Sciences, V. N. S., N. V. Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0003-2011-6054
- Mitrofanova I. V., Doctor of Biological Sciences, G. N. S., N. V. Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0002-4650-6942
- Petrunya I. V., PhD, All-Russian Scientific Research Institute of Agricultural Biotechnology, Moscow, Russia
- Sudarikov K. A., Research Engineer, Russian State Agrarian University, All-Russian Scientific Research Institute of Agricultural Biotechnology, Moscow, Russia,
ORCID: 0009-0005-8734-1223
- Gulevich A. A., Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, All-Russian Scientific Research Institute of Agricultural Biotechnology, Moscow, Russia,
ORCID: 0000-0003-4399-2903
- Baranova E. N., Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, N. V. Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0001-8169-9228