

1. ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

УДК 581.5:712.4:632.03

Н.А. Цуварёва, Буй Динь Дык, И.А. Мельничук, А.В. Селиховкин

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ НАСАЖДЕНИЙ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА: СОВРЕМЕННЫЕ И ТРАДИЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ

Введение. Городские насаждения в крупных городах и, в частности, в Санкт-Петербурге выполняют важнейшие функции, связанные созданием экологически и эстетически и комфортной среды [Ершова, 2014; Selikhovkin et al., 2014]. При этом требования к состоянию как насаждений в целом, так и отдельных деревьев гораздо выше, чем в лесных экосистемах. Повреждение деревьев многочисленными факторами преимущественно антропогенного происхождения приводит к снижению устойчивости насаждений, повреждению вредителями и патогенными организмами, ухудшению их внешнего облика и, в итоге, к гибели насаждений и появлению деревьев «угрозы», т. е. таких, для которых существует высокая вероятность падения самого дерева или его крупных частей. Своевременное обнаружение изменения состояния отдельных деревьев и насаждений в целом, а также выявление и оценка роли ключевых стрессовых факторов – важнейшая задача, стоящая перед организациями, управляющими городскими насаждениями [Алексеев и др., 2019; Nowak et al., 2006].

Проблема мониторинга состояния насаждений крупных населённых пунктов, в особенности таких мегаполисов, как Москва и Санкт-Петербург, стоит чрезвычайно остро. В настоящее время в Санкт-Петербурге, как и в других мегаполисах, насаждения представлены чрезвычайно широким спектром растений. Большинство городских насаждений включают виды, несвойственные естественным насаждениям в городских окрестностях. Разветвлённая ведомственная принадлежность обуславливает совершенно разные подходы к управлению насаждениями и, в том числе, к мониторингу их состояния и принятию решений в случаях ослабления и гибели насаждений. При этом площадь насаждений Санкт-

Петербурга без учёта насаждений, относящихся к отдельным ведомствам (больницы, школы, НИИ и др.) превышает 13 тыс. га [Ершова, 2014; Петростат, 2020]. Усугубляет проблему появление целого ряда инвазионных вредителей и патогенных организмов, приводящих к массовой гибели отдельных пород древесных растений [Мартирова, 2019; Буй Динь Дык и др., 2020; Селиховкин и др., 2020; Shabunin et al., 2020]. Мониторинг инвазионных видов особенно важен, так как количество случаев появления чужеродных видов в последние годы заметно увеличивается [Ижевский и др., 2008; Селиховкин и др., 2020; Musolin et al., 2017], а последствия их внедрения нередко становятся фатальными для насаждений. Например, ослабление и гибель вязов, сопровождающаяся симптомами голландской болезни началась в южных районах Санкт-Петербурга в 1995–1996 гг. В 2000 г. гибель деревьев начала приобретать массовый характер, и только после этого была установлена видовая принадлежность возбудителя заболевания гриба-аскомицета *Ophiostoma novo-ulmi* и выявлен видовой состав короedов-заболонников – синергистов патогена [Дорофеева и Тюпина, 2002; Щербаква, 2008; Селиховкин и др., 2020]. Постепенное усыхание ясеня на территории Дудергофских высот, а также в парковых и уличных насаждениях южной части Санкт-Петербурга из-за распространения возбудителя халарового некроза гриба-аскомицета *Hymenoscyphus fraxineus* и некоторых других патогенов происходит уже в течение более чем десяти лет [Селиховкин и др., 2020; Shabunin et al., 2020]. Яркий пример, обуславливающий необходимость введения эффективной системы мониторинга – распространение ясеневой изумрудной узкотелой златки *Agrilus planipennis* – фатального вредителя ясеня, приводящее к полной гибели насаждений. Усыхание ясеней из-за поражения этим вредителем было неожиданно обнаружено в Петродворцовом районе осенью 2020 г. [Баранчиков, 2020; Волкович, Суслов, 2020]. Причем было установлено, что сформировался большой по площади очаг, границы которого до сих пор не определены.

Специалисты кафедры защиты леса, древесиноведения и охотоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета (СПбГЛТУ) проводят обследования насаждений города и окрестностей по заказам различных предприятий и организаций, а также в порядке инициативных исследований, используя как стандартные, так и авторские методики. В результате этих исследований сформирована и актуализирована база данных по динамике размножений вредителей древесных растений в Санкт-Петербурге и Ленинградской области за 120 лет наблюдений [Селиховкин, 2009; Селиховкин и др., 2018; Буй Динь Дык и др., 2020]. Тем не менее, это не решает проблемы своевременного обнаружения размноже-

ний вредителей. Усугубляет ситуацию отсутствие систематизированной информации в отношении патогенных грибов, вызывающих заболевания древесных растений в Санкт-Петербурге. В связи с этим в настоящей работе рассматривается возможность использования Tree Talker системы для организации фитопатологического мониторинга как одной из задач мониторинга экофизиологических параметров городских насаждений.

Цель данной работы – анализ возможности и целесообразности использования современных технологий в сочетании с традиционными методами мониторинга, учитывая актуальные проблемы распространения патогенов и вредителей.

Объекты и методы исследования. Устройства Tree Talker рассматриваются в качестве основного элемента для диагностики уровня воздействия негативных факторов. Предлагаемые устройства совмещаются с интернет-системами, преимущественно «Internet of things» (IoT). Это позволяет совместить систему получения данных и их первичный анализ, т. е. исключить участие наблюдателя (субъективный фактор) и ускорить получение и обработку информации. Предложенная система обеспечивает возможность оценки полезностей городских насаждений на основе мониторинга различных параметров состояния древесных растений [Valentini et al., 2019; Matasov et al., 2020]. Используемые устройства измеряют интенсивность сокодвижения, динамику радиального прироста, спектральные характеристики листьев и микроклиматические параметры. Кластерное расположение устройств, передающих через настраиваемые временные интервалы необходимые данные, обеспечивают непрерывный поток информации, который отправляется на веб-сервер. Данные привязываются к сети GPRS [Valentini et al., 2019]. Такие системы позволяют отслеживать структуру полога и фенологию древесных растений [Soudani et al., 2012], что особенно важно в аспекте контроля динамики численности вредителей. Ещё одна принципиально важная для городских насаждений перспектива использования метода – возможность отслеживания устойчивости деревьев к ветровым нагрузкам [James, Hallam, 2013]. Всё это позволяет выявить на ранних стадиях проблемные ситуации и принять превентивные меры. Разнообразие зеленых насаждений (породы, возраст) и условий их произрастания в мегаполисе приводит к высокой неопределенности значений параметров их состояния для выявления признаков стресса. Непрерывное наблюдение за динамикой параметров состояния зеленых насаждений позволит отделить диапазоны колебаний значений в пределах нормы (суточные и сезонные отклонения) и экстремальные отклонения, сопряженные с рисками.

В данном проекте используется Tree Talker (ТТ) двух модификаций: ТТ-G (вертикальная устойчивость) и ТТ+ (физиологическое состояние) (рис. 1). ТТ-G снабжен гироскопическим датчиком, измеряющим угловое отклонение ствола от нормали по трем координатным осям, а также датчиком температуры и влажности воздуха. ТТ-G устанавливают на высоте 3-5 м или выше и фиксируют угол отклонения ствола (рис. 1).

ТТ+ снабжен следующими датчиками:

- радиометр, измеряющий интенсивность солнечной радиации и отраженного в кроне света в 12 диапазонов длинных волн (от синего до ближнего инфракрасного);
- датчики температуры и влажности ксилемы ствола;
- датчики температуры и влажности воздуха;
- инфракрасный датчик расстояния для измерения увеличения диаметра;
- гироскопический датчик, аналогичный применяемому в ТТ-G.



Рис. 1. Устройства мониторинга Tree Talker, установленные на стволе дерева в Ботаническом саду СПбГЛТУ (слева) и Летнем саду (справа)

Fig. 1. Tree Talker monitoring devices installed on a tree trunk in the Botanical Garden of St. Petersburg State Forest Technical University (left) and the Summer Garden (right)

Совместное использование датчиков позволяют вести непрерывное наблюдение на уровне дерева за базовыми параметрами (температура и влажность воздуха и ксилемы, изменение диаметра ствола и спектр рассеянного света) и рассчитывать на их основе интегральные показатели состояния дерева: интенсивность сокодвижения, дефицит давления паров воды (vapour pressure deficit, VPD) и вегетационные индексы (в первую очередь, Normalized Difference Vegetation Index, NDVI). Схема получения и передачи сигнала представлена на рис. 2.

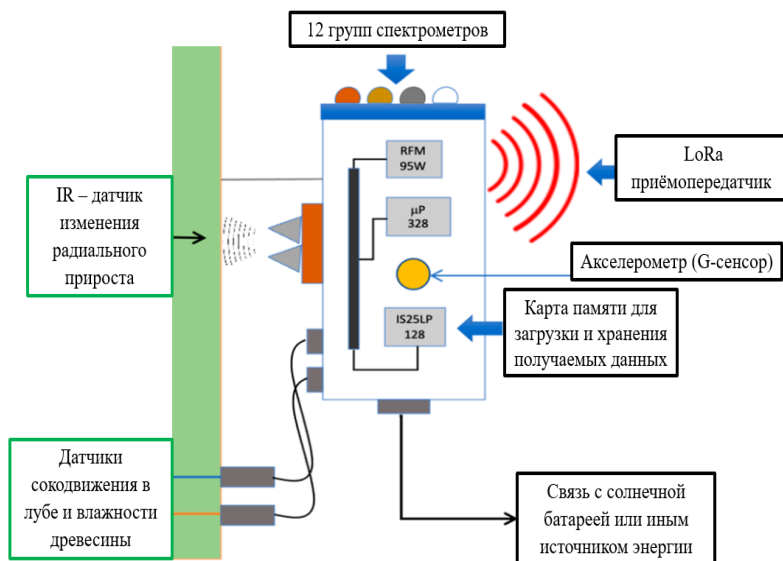


Рис. 2. Схема получения и передачи сигнала в мониторинг Tree Talker системы мониторинга в насаждениях Москвы [по Matasov et al., 2020]

Fig. 2. Schematic of signal reception and transmission in the Tree Talker monitoring system in the plantations of Moscow [from Matasov et al., 2020]

К началу 2020 г. в Москве было установлено более 200 устройств, а на тестовых площадках в Санкт-Петербурге – 10 устройств, что позволило изучать состояние зеленых насаждений с учетом видового и возрастного разнообразия, а также контрастной антропогенной нагрузки. В 2021 г. в Санкт-Петербурге планируется расширить сеть мониторинга за счет установки 50–100 устройств, организованных в 3-5 кластеров, отражающих различные типы зеленых насаждений и антропогенную нагрузку.



Рис. 3. Схема Ботанического Сада СПбГЛТУ им. С.М. Кирова с расположением устройств Tree Talker

Fig. 3. Schematic diagram of the St.Petersburg State Forest Technical University Botanical Garden with Tree Talker devices



Рис. 4. Схема Летнего Сада с расположением устройств Tree Talker

Fig. 4. Diagram of the Summer Garden with Tree Talker devices

Результаты и обсуждение. Пилотное исследование с использованием сети беспроводных, недорогих и многопараметрических устройств мониторинга Tree Talkers (ТТ +) для мониторинга экофизиологических параметров одного дерева, проводившееся в зеленой зоне, расположенной

в центре Москвы, имело своей целью оценку возможности мониторинга «экосистемных услуг» в режиме реального времени [Matasov et al., 2020]. При этом известно, что не менее успешно системой Tree Talkers выявляются негативные изменения в состоянии как отдельных деревьев, так и насаждений в целом, включая увеличение угла наклона дерева при одной и той же силе ветра, снижение радиального прироста, ухудшение спектральных характеристик листьев, снижение интенсивности сокодвижения и др. [Bodnaruk et al., 2017; Speak et al., 2018]. Это позволяет на ранних стадиях выявить проблемные ситуации и принять превентивные меры.

В итоге, применение технологий мониторинга Tree Talker позволяет получить пространственно дифференцированную картину динамики состояния насаждений (включая фенологию) с привязкой к возрасту, породам и видам древесных растений. Эта картина включает следующие базы и группы данных, необходимые для принятия решений в сфере ухода и содержания зеленых насаждений:

1) база данных суточной и сезонной динамики физиологических параметров и вертикальной устойчивости деревьев различных пород с выделением нормальных и экстремальных значений;

2) база данных суточной и сезонной динамики физиологических параметров и вертикальной устойчивости деревьев различного возраста с выделением нормальных и экстремальных значений;

3) группа данных по оценке функции зеленых насаждений по формированию микроклимата с учётом параметров климатической комфортности;

4) база данных вертикальных отклонений и колебаний зеленых насаждений различных пород и возрастов в зависимости от силы и направления ветра для определения нормальных и критических значений и возможных рисков;

5) группа данных по оценке влияния санитарно-оздоровительных мероприятий, в частности внесения удобрений, полива, обрезки крон и др.

Полученная информация даёт возможность как непосредственного принятия решений о сохранении, замене, проведении мероприятий по повышению устойчивости насаждений и др., а также по оптимизации системы мониторинга в отношении вредителей и патогенов. Оценка состояния насаждений должна вестись для каждой древесной породы (в идеале – для каждого вида древесных растений) с привязкой к типу насаждений (парки, лесные экосистемы, аллеи, посадки, скверы и т. п.). Эта оценка изменения состояния растений может служить как индикатором развития биогенного патогенеза, так и снижения устойчивости к вредителям. Именно

в таких насаждениях могут сформироваться и очаги размножения вредителей и развития болезней. Это один из важнейших аспектов применения Tree Talker технологии, так как обеспечивает возможность ранней диагностики появления патогенеза на основе данных суточной и сезонной динамики физиологических параметров деревьев. Появление экстремальных значений этих характеристик – сигнал для проведения исследования причин появления таких отклонений с использованием традиционных методов фитопатологического и энтомологического мониторинга. В этом случае возникновение вспышек массового размножения как аборигенных, так и инвазионных вредителей и возбудителей болезней может быть выявлено на ранних стадиях развития вспышки или формирования эпифитотии. Соответственно становится возможным принятие эффективных мер по локализации очагов и контролю плотности популяций. Таким образом, система фитопатологического и энтомологического мониторинга должна включать два этапа:

1) получение данных об экстремумах состояния отдельных деревьев и насаждений в целом с использованием Tree Talker технологии;

2) диагностика причин появления сигнала традиционными методами исследований; в случае выявления биологических агентов патогенеза – установление видовой принадлежности патогена или вредителя, анализ специфики биологии вида в условиях Санкт-Петербурга и популяционных характеристик.

Заключение. Информация, полученная в Tree Talker системе даст, возможность оценки эффективности насаждений в различных аспектах от формирования микроклимата до появления деревьев «угрозы», а также, за счёт появления индикаторного сигнала – появления экстремальных значений характеристик состояния отдельных деревьев и насаждений, позволит выявить начало развития патогенного процесса на ранних стадиях. Последующее подключение традиционных методов энтомо- и фитопатологического мониторинга обеспечит возможность оперативного принятия решения для контроля распространения патогенов и вредителей. Таким образом, сочетание Tree Talker технологий и традиционных методов фитопатологического и энтомологического мониторинга позволит получить эффективную систему обеспечения устойчивости насаждений и создаст возможность для своевременного и обоснованного проведения мероприятий по защите насаждений. Кроме того, такой подход создаёт возможность прогнозирования изменения состояния насаждений.

Библиографический список

Алексеев А.С., Ходачек О.А., Селиховкин А.В. Анализ факторов ослабления хвойных древостоев в рекреационных насаждениях // Биосфера. 2019. Т. 11, № 1. С. 48–61. DOI: 10.24855/v11i1475

Баранчиков Ю.Н. Датировка начала инвазии *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Vuprestidae) в Санкт-Петербург с помощью интернет-технологий // Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы и их роль в лесных экосистемах (XI Чтения памяти О.А. Катаева) : матер. Всероссийской конференции с международным участием. Санкт-Петербург, 24–27 ноября 2020 г. / под ред. Д.Л. Мусолина, Н.И. Кириченко, А.В. Селиховкина. СПб.: СПбГЛТУ, 2020. С. 70–71. DOI: 10.21266/SPBFTU.2020.КАТАЕВ]

Буй Динь Дык, Денисова Н.В., Барышникова С.В., Шевченко С.В., Селиховкин А.В. Актуальные изменения видового состава и плотности популяций насекомых-филлофагов в Санкт-Петербурге // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Вып. 230. С. 73–99. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.230.73-99

Волкович М.Г., Суслов Д.В. Первая находка ясеновой изумрудной узкотелой златки *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Vuprestidae) в Санкт-Петербурге свидетельствует о реальной угрозе дворцово-парковым ансамблям Петергофа и Ораниенбаума // Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы и их роль в лесных экосистемах (XI Чтения памяти О.А. Катаева) : матер. Всероссийской конференции с международным участием. Санкт-Петербург, 24–27 ноября 2020 г. / под ред. Д.Л. Мусолина, Н.И. Кириченко и А.В. Селиховкина. СПб.: СПбГЛТУ, 2020. С. 119–120. DOI: 10.21266/SPBFTU.2020.КАТАЕВ]

Дорофеева Т.Б., Тюпина Г.Н. Графиоз ильмовых в Санкт-Петербурге и меры борьбы с ним // Экология большого города. 2002. № 6. С. 57–61.

Ершова С.А. Генеральные планы Санкт-Петербурга 1703–2013 гг. // Питер.ру.2014. 500 с.

Ижевский С.С., Масляков В.Ю. Новые инвазии чужеземных насекомых в Европейскую Россию // Российский журнал биологических инвазий. 2008. № 2. С. 34–43.

Мартирова М.Б. Охридский минер (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimic, 1986) – инвазионный вредитель конского каштана в Санкт-Петербурге // Актуальные вопросы в лесном хозяйстве: матер. III Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, 06–08 ноября 2019 г. // Полиграф экспресс. 2019. С. 201–2004.

Петростат. Социально-экономическое положение субъектов РФ, находящихся в пределах СЗФО в 2019 году. СПб., 2019. URL: <https://petrostat.gks.ru>

Селиховкин А.В. Могут ли вспышки массового размножения насекомых-дендрофагов оказать существенное влияние на состояние биосферы? // Биосфера. 2009. Т. 1, № 1. С. 72–81.

Селиховкин А.В., Барышникова С.В., Денисова Н.В., Тимофеева Ю.А. Видовой состав и динамика плотности популяций доминирующих чешуекрылых-

дендрофагов в Санкт-Петербурге и его окрестностях // Энтомологическое обозрение. 2018. Т. ХСVII. № 4. С. 617–639. DOI: 10.1134/S0367144518040032

Селиховкин А.В., Дренкхан Р., Мандельштам М.Ю., Мусолин Д.Л. Инвазии насекомых – вредителей и грибных патогенов древесных растений на северо-западе европейской части России // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2020. Т. 65. Вып. 2. С. 263–283.

Щербакова Л.Н. Вязовые заболонники в городских посадках Санкт-Петербурга // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2008. Вып. 182. С. 306–313.

Bodnaruk E.W., Kroll C.N., Yang Y., Hirabayashi S., Nowak D.J., Endreny T.A. Where to plant urban trees? A spatially explicit methodology to explore ecosystem service tradeoffs // *Landsc. Urban Plan.* 2017. № 157. P. 457–467.

James K.R., Hallam C. Stability of urban trees in high winds. // *Arboricultural Journal.* 2013. № 35(1). P. 28–35.

Matasov V., Marchesini L.B., Yaroslavtsev A., Sala G., Fareeva O., Seregin I., Castaldi S., Vasenev V., Valentini R. IoT Monitoring of Urban Tree Ecosystem Services: Possibilities and Challenges // *Forests.* 2020, № 11. P. 775.

Musolin D.L., Selikhovkin A.V., Shabunin D.A., Zviagintsev V.B., Baranchikov Yu.N. Between Ash dieback and Emerald ash borer: Two Asian invaders in Russia and the future of ash in Europe. *Baltic Forestry*, 2017. № 23(1). P. 316–333.

Nowak D.J., Crane D.E., Stevens J.C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States // *Urban Forestry & Urban Greening.* 2006. Vol. 4. P. 115–123.

Selikhovkin A., Melnichuk I., Ignatieva M. St. Petersburg Green Infrastructure: past, present and future // *Green and sustainable cities – the role of landscape architecture.* 4th International Workshop, 12–14 March / Abstracts, 2014. SLU, Sweden. P.30.

Shabunin D.A., Selikhovkin A.V., Varentsova E.Yu., Musolin D.L. Decline of *Fraxinus excelsior* L. in parks of Saint Petersburg: Who is to blame – *Hymenoscyphus fraxineus* or *Diplodia* spp.? // *Forestry Studies.* 2020. Vol. 73. P. 43–51

Soudani K., Hmimina G., Delpierre N., Pontauiller J.-Y., Aubinet M., Bonal D., Caquet B., de Grandcourt A., Burban B., Flechard C., Guyon D., Granier A., Gross P., Heinesh B., Longdoz B., Loustau D., Moureaux C., Ourcival J.-M., Rambal S., Saint André L., Dufréne E. Ground-based Network of NDVI measurements for tracking temporal dynamics of canopy structure and vegetation phenology in different biome // *Remote Sensing of Environment.* 2012. No. 123. P. 234–245.

Speak A.; Escobedo F.J.; Russo A.; Zerbe S. An ecosystem service-disservice ratio: Using composite indicators to assess the net benefits of urban trees. *Ecol. Indic.* 2018. No. 95. P. 544–553.

Valentini R., Marchesini B. L., Gianelle D., Sala G., Yaroslavtsev A., Vasenev V., Castaldi S. New tree monitoring systems: from Industry 4.0 to Nature 4.0. *Annals of Silvicultural Researches.* 2019. Vol. 43, no. 2. P. 84–88.

References

Alekseyev A.S., Khodachek O.A., Selikhovkin A.V. Analysis of the factors of weakening of coniferous stands in recreational plantations [Analiz faktorov oslableniya khvoynykh drevostoyev v rekreatsionnykh nasazhdeniyakh], Biosphera, 2019, b. 11, pp. 48–61. (In Russ.)

Baranchikov Yu.N. Dating of the beginning of the *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Buprestidae) invasion to Saint Petersburg using Internet technology. [Datirovka nachala invazii *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Buprestidae) v Sankt-Peterburg s pomoshch'yu internet-tekhnologiy], *Dendrobiotic Invertebrates and Fungi and their Role in Forest Ecosystems. The Kataev Memorial Readings – XI* / Proceedings of the All-Russia conference with international participation. Saint Petersburg (Russia), November, 24–27, 2020 / D.L. Musolin, N.I. Kirichenko and A.V. Selikhovkin (Eds). St. Petersburg (Russia): Saint Petersburg State Forest Technical University, 2020. 452 p. (In Russ.)

Buy Dinh Dyk, Denisova N.V., Baryshnikova S.V., Selikhovkin A.V. Actual changes in the species composition and the population density of phyllophagous insects in St. Petersburg [Aktual'nyye izmeneniya vidovogo sostava i plotnosti populyatsiy nasekomykh-fillofagov v Sankt-Peterburge]. *Izvestia Sankt-Peterburgskoy Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2020, is. 230, pp. 73–99. (In Russian with English summary).

Volkovich M.G., Suslov D.V. The first record of the emerald ash borer, *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Buprestidae), in Saint Petersburg signals a real threat to the palace and park ensembles of Peterhof and Oranienbaum [Pervaya nakhodka yasenevoy izumrudnoy uzkoteloy zlatki *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Buprestidae) v Sankt-Peterburge svidetel'stvuyet o real'noy ugroze dvortsovo-parkovym ansamblyam Petergofa i Oranienbauma]. *Dendrobiotic Invertebrates and Fungi and their Role in Forest Ecosystems. The Kataev Memorial Readings – XI* / Proceedings of the All-Russia conference with international participation. Saint Petersburg (Russia), November, 24–27, 2020 / D.L. Musolin, N.I. Kirichenko and A.V. Selikhovkin (Eds). St. Petersburg (Russia): Saint Petersburg State Forest Technical University, 2020. 452 p. (In Russ.)

Dorofeeva T.B., Tyupina G.N. The elm grafiosis in St. Petersburg and measures to combat it [Grafioz il'movykh v Sankt-Peterburge i mery bor'by s nim]. *Ecology of a big city*, 2002, no. 6, pp. 57–61. (In Russ.)

Ershova S.A. Master plans of St. Petersburg 1703–2013 [General'nyye plany Sankt-Peterburga 1703–2013 gg]. [Piter.ru], 2014. 500 p. (In Russ.)

Izhevskiy S.S., Maslyakov V.Yu. New invasions of alien insects into European part of Russia [Novyye invazii chuzhezemnykh nasekomykh v Yevropeyskuyu Rossiyu]. *Russian journal of Biological Invasion*, 2008, no. 2, pp. 34–43. (In Russ.)

Martirova M.B. The Horse-chestnut leaf miner (*Cameraria Ohridella* Deschka & Dimic, 1986) a dangerous invasive pest on Horse chestnut in Saint-Petersburg [Okhridskiy miner (*Cameraria ohridella* Deschka & Dimic, 1986) – invazionnyy vreditel' konskogo kashtana v Sankt-Peterburge]. *Actual issues in forestry: materials of the III international. scientific and practical conference young scientists*, November 06–08, 2019 St. Petersburg: [Polygraph Express], 2019, pp. 201–204. (In Russ.)

Petrostat. The socio-economic situation of the constituent entities of the Russian Federation located within the NWFD in 2019 [Sotsial'no-ekonomicheskoye polozheniye sub'yektov RF, nakhodyashchikhsya v predelakh SZFO v 2019 godu]. 2020. SPb., 2019. URL: <https://petrostat.gks.ru>. (In Russ.)

Selikhovkin A.V. Can outbreaks of dendrophagous insects make a considerable impact on the Biosphere? [Mogut li vspyshki massovogo razmnozheniya nasekomykh-dendrofagov okazat' sushchestvennoye vliyaniye na sostoyaniye biosfery?]. *Biosphere* 2009, vol. 1, no. 1, pp. 72–81.

Selikhovkin A.V., Baryshnikova S.V., Denisova N.V., Timofeeva Yu.A. Species composition and populatiom dynamics of dominant dendrophagous moths (Lepidoptera) in St.-Petersburg and its environs [Vidovoy sostav i dinamika plotnosti populyatsiy dominiruyushchikh cheshuyekrylykh-dendrofagov v Sankt-Peterburge i yego okrestnostyakh]. *Entomological Review*, 2018, b.XCVII, no. 4, pp. 617–639. (In Russ.)

Selikhovkin A.V., Drenkhan R., Mandelstam M.Yu., Musolin D.L. Invasions of insect pests and fungal pathogens of woody plants in the north-west of the European part of Russia [Invazii nasekomykh – vreditel'ey i gribnykh patogenov drevesnykh rasteniy na severo-zapade yevropeyskoy chasti Rossii]. *Herald of St. Petersburg State University*, pp. 28–35. (In Russ.)

Stcherbakova L.N. Vyazovye zabolonniki v gorodskih posadkah g. SanktPeterburga [Vyazovyye zabolonniki v gorodskikh posadkakh Sankt-Peterburga]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2008, is. 182, pp. 306–313. (In Russ.)

Bodnaruk E.W.; Kroll C.N.; Yang Y.; Hirabayashi S.; Nowak D.J.; Endreny T.A. Where to plant urban trees? A spatially explicit methodology to explore ecosystem service tradeoffs. *Landsc. Urban Plan*, 2017, no. 157, pp. 457–467.

James K.R., Hallam C. Stability of urban trees in high winds. *Arboricultural Journal*, 2013, no. 35(1), pp. 28–35.

Matasov V., Marchesini L.B., Yaroslavtsev A., Sala G., Fareeva O., Seregin I., Castaldi S., Vasenev V., Valentini R. IoT Monitoring of Urban Tree Ecosystem Services: Possibilities and Challenges. *Forests*, 2020, no. 11, p. 775.

Musolin D.L., Selikhovkin A.V., Shabunin D.A., Zviagintsev V.B., Baranchikov Yu.N. Between Ash dieback and Emerald ash borer: Two Asian invaders in Russia and the future of ash in Europe. *Baltic Forestry*, 2017, no. 23(1), pp. 316–333.

Nowak D.J., Crane D.E., Stevens J.C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2006, vol. 4, pp. 115–123.

Selikhovkin A., Melnichuk I., Ignatieva M. St. Petersburg Green Infrastructure: past, present and future. *Green and sustainable cities – the role of landscape architecture*. 4th International Workshop, 12–14 March. Abstracts, 2014 SLU, Sweden, p. 30.

Shabunin D.A., Selikhovkin A.V., Varentsova E.Yu., Musolin D.L. Decline of *Fraxinus excelsior* L. in parks of Saint Petersburg: Who is to blame – *Hymenoscyphus fraxineus* or *Diplodia* spp.? *Forestry Studies*, 2020, vol. 73, pp. 43–51. URL: <http://mi.emu.ee/forestry.studies>

Soudani K., Hmimina G., Delpierre N., Pontailier J.-Y., Aubinet M., Bonal D., Caquet B., de Grandcourt A., Burban B., Flechard C., Guyon D., Granier A., Gross P., Heinesh B., Longdoz B., Loustau D., Moureaux C., Ourcival J.-M., Rambal S., Saint André L., Dufrêne E. Ground-based Network of NDVI measurements for tracking temporal dynamics of canopy structure and vegetation phenology in different biome. *Remote Sensing of Environment*. 2012, no. 123, pp. 234–245.

Speak A.; Escobedo F.J.; Russo A.; Zerbe S. An ecosystem service-disservice ratio: Using composite indicators to assess the net benefits of urban trees. *Ecol. Indic.*, 2018, no. 95, pp. 544–553.

Valentini R., Marchesini B.L., Gianelle D., Sala G., Yaroslavtsev A., Vasenev V., Castaldi S. New tree monitoring systems: from Industry 4.0 to Nature 4.0. *Annals of Silvicultural Researches*, 2019, vol. 43, no. 2, pp. 84–88.

Цуварёва Н.А., Буй Динь Дык, Мельничук И.А., Селиховкин А.В. Мониторинг состояния насаждений Санкт-Петербурга: современные и традиционные подходы // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. Вып. 235. С. 6–21. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.235.6-21

Предлагается использование системы Tree Talker мониторинга в сочетании с традиционными методами фитопатологического и энтомологического мониторинга для обеспечения своевременного обнаружения изменения состояния насаждений Санкт-Петербурга и выявления ключевых факторов экологического стресса. Разнообразная ведомственная принадлежность и широкий видовой состав насаждений города, а также наличие многочисленных экологических факторов, негативно влияющих на состояние деревьев, появление инвазионных патогенов и вредителей создают плохо прогнозируемые ситуации. Появление инвазионных вредителей и патогенов, таких как возбудитель голландской болезни гриб-аскомицет *Ophiostoma novo-ulmi* и его распространители – короеды-заболонники, ещё один аскомицет, гриб *Hymenoscyphus fraxineus* и ясеневая изумрудная узкотелая златка *Agriilus*

planipennis, привело к массовой гибели вязов и ясеней, в том числе из-за несвоевременного обнаружения этих патогенов и вредителей. В условиях разобщенности системы управления городскими насаждениями из-за разной ведомственной принадлежности, мозаичного расположения, видового разнообразия и специфичности видового состава древесных растений, а также требований к оперативному принятию решений, использование Tree Talker технологий становится весьма перспективным. Эти технологии позволяют обеспечить оперативное получение, передачу и анализ данных по суточной и сезонной динамике физиологических параметров, устойчивости деревьев к ветровым нагрузкам с учётом породы, возраста и размеров. Интегрирование полученных данных позволяет оценить эффективность насаждений в целом по созданию микроклимата, динамике отклонений по вертикали, эффективности санитарно-оздоровительных мероприятий. В итоге, получение оперативной информации позволяет своевременно обнаружить неблагоприятные изменения как у отдельных деревьев, так и в структуре насаждений и провести анализ причин этих изменений, в особенности в отношении появления биологических угроз насаждения – распространению опасных патогенов и размножению вредителей.

Ключевые слова: мониторинг зеленых насаждений, Tree Talker технологии, оптимизация системы мониторинга, устойчивость насаждений

Tsuwareva N.A., Buy Dinh Dyk, Melnichuk I.A., Selikhovkin A.V. Monitoring the state of St. Petersburg tree plantations: modern and traditional approaches. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoy Akademii*, 2021, is. 235, pp. 6–21 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2021.235.6-21

It is proposed to use the Tree Talker monitoring system in combination with traditional methods of phytopathological and entomological monitoring to ensure timely detection of changes in the state of plantations in St. Petersburg and identify key factors of environmental stress. Diverse departmental affiliation and a wide species composition of the city's plantations, as well as the presence of numerous environmental factors that negatively affect the condition of trees, the appearance of invasive pathogens and pests create poorly predictable situations. The emergence of invasive pests and pathogens, such as the causative agent of the Dutch elm disease, the Ascomycete fungi *Ophiostoma novo-ulmi* and its spreaders – the sapwood bark beetles, another Ascomycete, the *Hymenoscyphus fraxineus* fungus, and the Emerald ash borer *Agrilus planipennis* in including due to late detection of these pathogens and pests. In the context of the disunity of the management system of urban plantings due to different departmental affiliation, mosaic location, species diversity and specificity of the species composition of woody plants, as well as requirements for prompt decision-making, the use of Tree Talker technologies becomes very promising. These technologies allow for the prompt receipt, transmission and analysis of data on the

daily and seasonal dynamics of physiological parameters, the resistance of trees to wind loads, taking into account the species, age and size. Integration of the obtained data allows us to evaluate the effectiveness of plantings in general in terms of creating a microclimate, the dynamics of vertical deviations, and the effectiveness of sanitary and recreational activities. As a result, obtaining operational information allows us to timely detect unfavorable changes both in individual trees and in the structure of plantings and to analyze the causes of these changes, especially in relation to the emergence of biological threats to the plantation – the spread of dangerous pathogens and the reproduction of pests.

Keywords: monitoring of green spaces, Tree Talker technologies, optimization of the monitoring system, plant sustainability.

ЦУВАРЁВА НИНА АЛЕКСАНДРОВНА – аспирантка Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ResearcherID: AAG-1681-2020, ORCID; 0000-0001-8257-5956.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: miss.spb09@gmail.com

TSUVAREVA Nina A. – PhD student of St.Petersburg State Forest Technical University. ResearcherID: AAG-1681-2020, ORCID; 0000-0001-8257-5956.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: miss.spb09@gmail.com

БҮЙ Динь Дык – сотрудник Национального вьетнамского университета лесного хозяйства, аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ResearcherID: AАН-4144-2020, ORCID: 0000-0001-8203-9571.

QL21, Xuan Mai, Chuong My District, Hanoi City; 194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vnuf@vnuf.edu.vn

BUY Dinh Dyk – researcher of Vietnam National University of Forestry; PhD student of St.Petersburg State Forest Technical University. ResearcherID: AАН-4144-2020, ORCID: 0000-0001-8203-9571.

QL21. Xuan Mai. Chuong My District. Hanoi City; 194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: vnuf@vnuf.edu.vn

СЕЛИХОВКИН Андрей Витимович – зав. кафедрой Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, профессор Санкт-Петербургского государственного университета. ResearcherID: К-4851-2015, ORCID: 0000-0003-4227-9647.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. 199034, Университетская наб., д. 13В, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a.selikhovkin@mail.ru

SELIKHOVKIN Andrey V. – Head of Dept. of St.Petersburg State Forest Technical University, professor of St.Petersburg State University. ResearcherID: K-4851-2015, ORCID: 0000-0003-4227-9647.

194021, Institute per. 5, St. Petersburg, Russia. 199034, Universitetskaya Emb. 13B, St. Petersburg, Russia. E-mail: a.selikhovkin@mail.ru

МЕЛЬНИЧУК Ирина Альбертовна – доцент кафедры ландшафтной архитектуры, кандидат сельскохозяйственных наук, Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ResearcherID: AAE-2585-2020, ORCID: 0000-0001-7772-8874.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: Melnichuk.Irina@gmail.com

MELNICHUK Irina A. – PhD (Agriculture), associate professor of Department of landscape architecture of St.Petersburg State Forest Technical University. ResearcherID: AAE-2585-2020, ORCID: 0000-0001-7772-8874.

194021, Institutskiy per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: Melnichuk.Irina@gmail.com