

Экспериментальные исследования системы мониторинга леса радиочастотного типа

В.В. Побединский^{1a}, А.А. Побединский^{2b}, М.В. Шавнина^{1c}

¹ Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский Тракт, 37, Екатеринбург, Россия

² Государственный аграрный университет Северного Зауралья, ул. Рошинское Шоссе, Тюмень, Россия

^a pobed@e1.ru, ^b vm993711@mail.ru, ^c shavnina444@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-6318-3447>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-7548-3076>

Статья поступила 24.01.2020, принята 17.02.2020

Рассмотрена проблема создания системы мониторинга лесного фонда. Об актуальности темы свидетельствует анализ отечественной и зарубежной литературы, в котором выявлен интенсивный поиск новых систем мониторинга и вместе с тем нерешенность проблемы создания системы, отвечающей современным требованиям. В работе предложена принципиально новая конструкция в виде наземной сети беспроводных устройств RFID на основе радиочастотного метода. Предварительные исследования такой системы были проведены, но для принципиально новой разработки и получения достаточно полной картины ее поведения данных еще недостаточно. Поэтому потребовались дополнительные исследования, что и определило цель настоящей работы, которая формулируется как определение основных параметров системы мониторинга в ходе экспериментов и моделирование ее работы, а также оценка влияния лесной среды и элементов леса на характеристики радиочастотного излучения. В ходе исследований ставились следующие задачи: 1) обоснование типа и конструктивного решения системы мониторинга лесного фонда; 2) разработка методики и аппаратуры экспериментальных исследований распространения радиочастотного излучения в лесной среде и в элементах леса; 3) определение диэлектрической проницаемости деревьев в зависимости от радиуса стволов и различных пород деревьев; 4) определение изменения мощности радиочастотного излучения в лесу в зависимости от расстояния до приемника. Методологически работа базируется на теории информации и передаче сигналов, методах расчета УКВ полей в лесных районах, математической статистике и теории эксперимента. В экспериментальной части использовались специально разработанное нестандартное оборудование, информационная система для сбора и передачи данных в виде сети беспроводных устройств RFID, а также специально разработанное программное обеспечение для обработки принятой на сервер информации. Результатами исследований являются предложенное конструктивное решение и топография сети устройств RFID, методики экспериментальных исследований в лабораторных и натурных условиях и соответствующая аппаратура. Получены зависимости от различных параметров диэлектрической проницаемости лесной среды и элементов леса, а также потери мощности радиочастотного сигнала в лесной среде. Результаты рекомендуются для исследований и проектирования систем радиочастотного мониторинга лесной среды.

Ключевые слова: мониторинг леса; радиочастотный мониторинг; диэлектрическая проницаемость лесной среды; падение мощности радиосигнала в лесной среде.

Modeling the operation of a forest monitoring system based on radiofrequency method

V.V. Pobedinskiy^{1a}, A.A. Pobedinskiy^{2b}, M.V. Shavnina^{1c}

¹ Ural State Forest Engineering University; 37, Sibirsky Tract St., Ekaterinburg, Russia

² State Agrarian University of Northern Urals; 18, Roshchinskoe Shosse St., Tyumen, Russia

^a pobed@e1.ru, ^b vm993711@mail.ru, ^c shavnina444@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-6318-3447>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-7548-3076>

Received 24.01.2020, accepted 17.02.2020

The problem of creating a forest fund monitoring system is considered. The relevance of the topic is evidenced by an analysis of domestic and foreign literature, which revealed an intensive search for new monitoring systems, and, at the same time, the unresolved problem of creating a system that meets modern requirements. A fundamentally new design is proposed in the form of a terrestrial network of wireless RFID devices based on the radio frequency method. Preliminary studies of such a system were carried out, but for a fundamentally new development and obtaining a sufficiently complete picture of its behavior, the data is still insufficient. Therefore, additional research was required, which determined the purpose of this work. The aim of the work was to determine the main parameters of the monitoring system during experiments and to simulate its operation, as well as the influence of the forest environment and forest elements on the characteristics of radio frequency radiation. The research objectives were as follows: 1) substantiation of the type and constructive solution of the forest fund monitoring system; 2) development of methods and apparatus for experimental studies of the propagation of radio frequency radiation in the forest environment and in the elements of the forest; 3) determination of the dielectric constant of trees depending on the radius of the trunks and various tree species; 4) determination of changes in the power of radio fre-

quency radiation in the forest, depending on the distance to the receiver. Methodologically, the work is based on the theory of information and signal transmission, methods for calculating VHF fields in forest areas, mathematical statistics and experimental theory. In the experimental part, specially developed non-standard equipment, an information system for collecting and transmitting data in the form of a network of wireless RFID devices, and specially designed software for processing information received on the server were used. The research results are the proposed design solution and the topography of the network of RFID devices, experimental research methods in laboratory and field conditions, and the corresponding equipment. Dependences are obtained on various parameters of the dielectric constant of the forest environment and forest elements, as well as the power loss of the radio frequency signal in the forest environment. The results are recommended for research and design of radio frequency monitoring systems of the forest environment.

Keywords: forest monitoring; radio frequency monitoring; permittivity of the forest environment; a decrease in the radio signal power in the forest environment.

Введение. Мониторинг леса, в том числе лесосырьевых потоков и пожарной опасности, является чрезвычайно сложной проблемой. В целом это связано с измерением множества параметров древостоя в совокупности с различными внешними условиями в лесном массиве. При измерениях таксационных показателей результаты мониторинга представляют собой значения взаимосвязанных параметров, полученных в определенные интервалы времени, в течение которых эти значения существенно не изменяются [1]. Примером таких параметров является величина толщины и высоты деревьев или ежегодного прироста древесины. Последнее может иметь и отрицательные значения вследствие проведенных лесозаготовок или как результат потерь при ураганах и пожарах.

Специфика мониторинга лесосырьевых потоков заключается в контроле перемещений древесины с точностью до одного бревна, тогда как мониторинг пожарной опасности должен обеспечивать фиксирование пожара в начальной стадии возгорания. При этом мониторинг должен быть непрерывным, с оперативной передачей информации. Таковы современные требования к вновь создаваемым системам мониторинга леса [2].

Предпосылки для разработки автоматической системы мониторинга наблюдений были опубликованы М. Драмlichem еще в 1982 г. [3]. Некоторые принципы создания систем мониторинга сформулированы Н.П. Петровой в методике по проектированию систем экологического мониторинга [4]. В зарубежных исследованиях этой проблеме уделяется много внимания [5–11], но достаточно эффективная система мониторинга лесного фонда на сегодня не создана. Практика показывает, что проблема заключается не только в правовой области, но, в первую очередь, в технических решениях [12–18].

Прежние методы контроля лесной среды, которые применялись в советское время и широко применяются специалистами сейчас, не отвечают современным требованиям к мониторингу за состоянием лесов. Современные методы должны быть основаны на инновационных информационных автоматизированных системах. Для этих систем необходимы технические средства, обеспечивающие их функциональное назначение, как это отмечено в работе [19]. Для получения оперативной информации о состоянии леса необходимо использовать различные известные средства, расположенные на земле, в воздухе и в космосе. Следовательно, создаваемые новые системы, в частности наземного типа, должны иметь возможность интегрирования с геоинформационными системами спутникового слежения. Большинство существующих методов

мониторинга древостоев используют значительные людские ресурсы и подручный измерительный инструмент.

Лесные массивы находятся на удаленном расстоянии от следящих за процессом людей, поэтому пока невозможно с приемлемой точностью отслеживать изменения, которые происходят с деревьями и лесной средой. Для решения проблемы необходима принципиально новая система мониторинга леса, которая позволит значительно снизить количество людей, участвующих в слежении за лесным массивом, т. е. автоматизированная система с использованием технических средств и современных информационных технологий. Для указанных задач предложена система мониторинга наземного типа, основанная на радиочастотном методе [20]. Предварительные исследования такой системы были проведены [21], но для принципиально новой системы получение максимально полной картины ее поведения и данных для проектирования еще недостаточно. Поэтому потребовались дополнительные исследования, что и определило цель настоящей работы.

Таким образом, *цель работы* заключается в определении основных параметров системы мониторинга в ходе экспериментов и моделирования ее работы, а также влияния лесной среды и элементов леса на характеристики радиочастотного излучения.

Задачи исследований были следующие:

- обоснование типа и конструктивного решения системы мониторинга лесного фонда;
- разработка методики и аппаратуры экспериментальных исследований распространения радиочастотного излучения в лесной среде и в элементах леса;
- определение диэлектрической проницаемости деревьев в зависимости от радиуса стволов и различных пород деревьев;
- определение функции изменения мощности радиочастотного излучения в лесу в зависимости от расстояния до приемника.

Методы и средства. Методологически работа базируется на теории информации и передачи сигналов, методах расчета УКВ полей в лесных районах, математической статистике и теории эксперимента. В экспериментальной части использовались специально разработанное нестандартное оборудование, информационная система для сбора и передачи данных в виде сети беспроводных устройств RFID, а также оригинальное программное обеспечение для обработки принятой на сервер информации.

Результаты. В результате исследований было выполнено обоснование принципиальной схемы, тополо-

гии сети и параметров устройств мониторинга в виде радиочастотной наземной сетевой системы, обеспечивающей непрерывный контроль за состоянием лесного фонда с учетом движения лесосырьевых потоков и раннего обнаружения пожаров. Схема системы показана на рис. 1. Назначением предложенной системы мониторинга является выполнение следующих основных функций:

- оперативный контроль транспортных потоков в зоне ее действия с автоматизированным учетом объемов вывозки, а также определение путей их транспортировки;
- надежная передача больших объемов данных при минимальной задержке по времени;
- максимальная автоматизация процессов мониторинга, практически исключая участие человека.

Для предложенной сети разработан математический аппарат, позволяющий оценить количество информации в потоках по каналам сети, а также получить информационные характеристики сигналов.

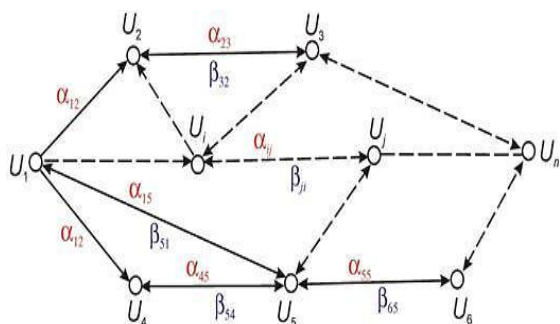


Рис. 1. Схема информационной сети из устройств RFID: U — узел сети; α_{ij} , β_{ij} — вектор сигнала с координатами узла

При проектировании систем радиочастотного мониторинга одним из основных параметров является падение мощности сигнала в среде распространения. Вторым необходимым параметром — это величина комплексной диэлектрической проницаемости. Лесная среда характерна тем, что в ее описании отсутствуют детерминированные характеристики, а все параметры либо имеют вероятностную природу, либо характеризуются условиями неопределенности. По этой причине для получения данных о необходимых параметрах были проведены экспериментальные исследования.

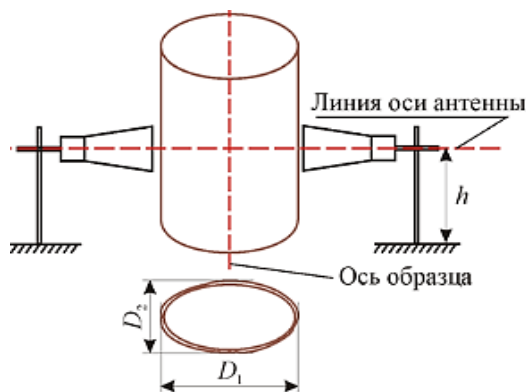


Рис. 2. Схемы измерения диэлектрической проницаемости ствола дерева по предложенной методике

В результате исследований была разработана методика и изготовлено соответствующее оборудование как для лаборатории, так и для натуральных условий в лесной среде. В разработанной методике используется важнейший принцип — оценка падения мощности радиочастотного излучения при прохождении через элементы леса или через лесную среду. Величина изменения мощности является информативным параметром, так как при обратном решении этой задачи можно определить второй важнейший параметр такой системы — диэлектрическую проницаемость измеряемого объекта. Схема измерений по предложенной методике приведена на рис. 2, экспериментальная аппаратура для выполнения лабораторных исследований показана на рис. 3.

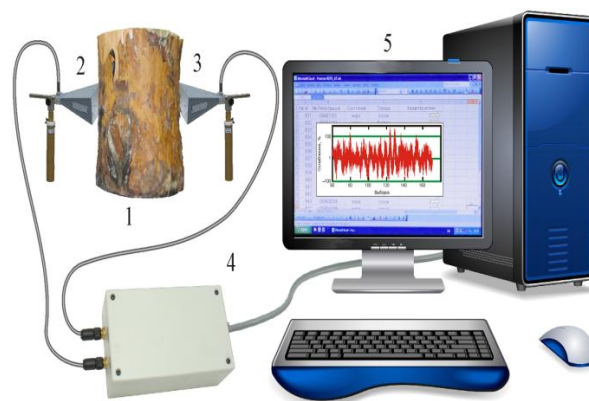


Рис. 3. Экспериментальная аппаратура для исследований в лабораторных условиях: 1 — экспериментальный образец; 2, 3 — антенны приемника и передатчика; 4 — модули Xbee XB24-Z7SIT-004; 5 — компьютер

Реализация методики натуральных исследований системы мониторинга — схема измерений, аппаратура, обработка статистических данных — приведены на рис. 4. Для экспериментов выбирались участки леса с насаждениями разных пород. Система работает на разрешенных государственными органами надзора частотах 0,9 и 2,4 ГГц. При измерениях передатчик перемещался вдоль линии канала связи с шагом 10 м. Чтобы записать показания, он фиксировался на некоторое время. Для каждого фиксированного положения, начиная с 1 до 140 м, измерения выполнялись с повторениями в количестве десяти раз. Информация от передатчика поступала на приемник, откуда передавалась на компьютер. На компьютере при помощи специально разработанной программы информация предварительно обрабатывалась и сохранялась в электронной памяти (в файле).

Экспериментальные исследования позволили получить довольно обширную информацию о работе системы мониторинга, о свойствах излучения при прохождении через лесную среду или элементы леса. Так, зависимости диэлектрической проницаемости древесины от различных параметров приведены на рис. 5.

В ходе натуральных экспериментов получены регрессионные модели оценки мощности N радиочастотного сигнала в зависимости от расстояния до приемника S . Модели получены для открытого пространства (формула (1)) и для лесной среды (формула (2)) (см. рис. 6):

$$N = -27,72 - 25,82 \log S, \quad (1)$$

$$N = -24,49 - 24,25 \log S. \quad (2)$$

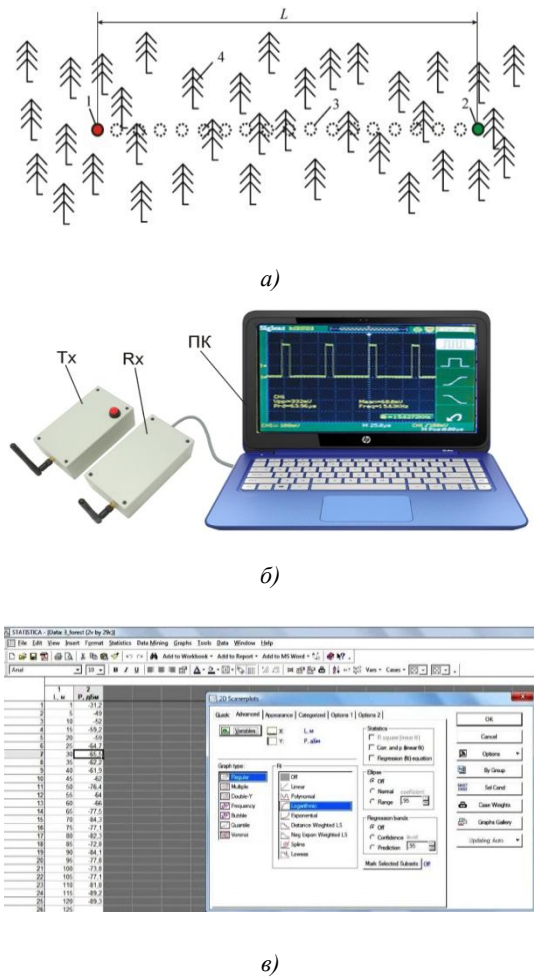


Рис. 4. Реализация методики натуральных исследований: *a* — схема выполнения натуральных измерений; *b* — аппаратура для проведения натуральных экспериментов; *в* — интерфейс программы для обработки опытных данных; *Tx* — передатчик; *Rx* — приемник; *ПК* — компьютер; *l* — передатчик; *2* — приемник; *3* — расположение приемника промежуточное; *4* — лесная среда

Анализ результатов. Оценивая результаты с позиций научной новизны, отличия от предыдущих исследований и практического применения, можно отметить следующее.

В зарубежной открытой печати отсутствуют работы, в которых приводятся исследования по влиянию лесной среды на радиочастотное излучение. Исключение составляет работа доктора физ.-мат. наук Попова [22] (Латвия), но здесь лесная среда рассматривается однородной и только дается замечание, что, строго говоря, она квазиоднородная. В предложенной системе лесная среда рассматривается как дискретная, состоящая из элементов леса (стволы, крона с листвой, сучки, подрост). Такой подход позволяет оценивать изменение диэлектрической проницаемости с точностью до одного бревна, следовательно, и перемещение каждого отдельного лесоматериала.

Практическое применение определяется актуальностью проблемы. Контроль за лесосырьевыми потоками, перемещениями древесины с использованием техноло-

гий RFID уже частично используется в лесной промышленности. Так, в лесах Венгрии австрийской компанией Holzindustrie Schweighofer начиная с 2015 г. идет внедрение чипирования (RFID-метки) деревьев в рамках создания глобальной цифровой системы по предотвращению незаконной вырубке леса [23]. Но такая система только отслеживает происхождение древесины, не обеспечивая при этом оперативный мониторинг сырьевых потоков и пожаров и контроль таксационных данных леса. В предложенной конструкции реализовано принципиально новое решение, основанное на радиочастотном методе и выполненное в виде наземной сети беспроводных устройств RFID. Соответственно разработаны новые методики и аппаратура для экспериментальных исследований, а также получены новые данные для проектирования и исследования систем мониторинга.

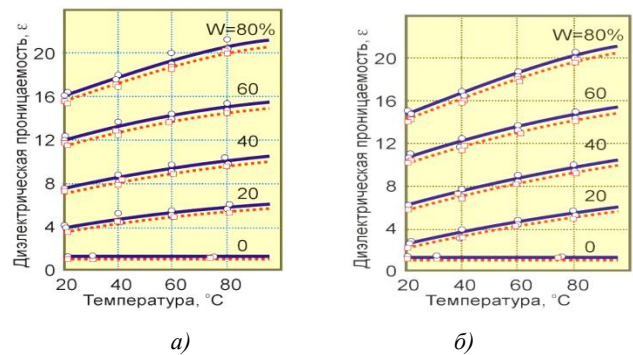


Рис. 5. Зависимость диэлектрической проницаемости древесины ели (*a*) и сосны (*б*) от температуры *t* при частоте поля 1 МГц и различных значениях влажности *W* (пунктирная линия — с корой)

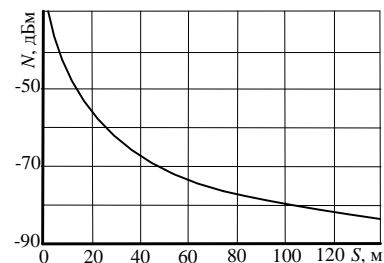


Рис. 6. Зависимость потери мощности сигнала от расстояния до приемника в лесной среде

Заключение.

1. Предложенные тип и конструктивное исполнение системы мониторинга имеют значительное преимущество перед всеми известными, так как обеспечивают наземное оперативное отслеживание состояния лесного фонда, его таксационные характеристики, лесосырьевые потоки, возникновение пожаров. При этом система может быть интегрирована со службами спутникового слежения.

2. Для дальнейших исследований систем радиочастотного мониторинга леса предложены методики исследований как в лабораторных условиях, так и в лесной среде. Методики реализуются на разработанном оборудовании и специально созданной компьютерной программе для обработки информации, поступающей на сервер.

3. Полученные зависимости диэлектрической проницаемости и рассеяния мощности сигнала от различ-

ных параметров являются основой для проектирования систем радиочастотного мониторинга леса.

4. Сравнение данных, полученных теоретически и экспериментально, показывают достаточную схо-

мость результатов [19], поэтому предложенные модели могут быть рекомендованы для проектирования систем радиочастотного мониторинга.

Литература

- Санников С. П., Герц Э. Ф., Дьячкова А. А. Методология дистанционного мониторинга древостоев и транспортных потоков древесины [Электронный ресурс] // Лесной журнал. Архангельск: С(А)ФУ, 2016. С. 109—115. URL: <http://narfu.ru/university/library/books/2780.pdf> (дата обращения: 20.10.2018).
- Лесной кодекс РФ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.leskod.ru> (дата обращения: 20.10.2018).
- Драмлич М., Иованович-Курепа М. Автоматическая мониторинг-система наблюдения за загрязнением атмосферы воздушных бассейнов. М., 1982. 14 с
- Петрова Н.П., Попов Н.С., Лузгачев В.А. К методике проектирования систем экологического мониторинга // Вестн. ТГУ. Т. 19. Вып. 5. 2014. С. 1712–1716.
- Doolin D.M., Sitar N. Wireless sensors for wildfire monitoring. In Smart Structures and Materials 2005: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, San Diego, CA, USA, May 7, 2005.
- Zheng Y., Zhao Y., Liu S W. Forest Microclimate Monitoring System Based on Beidou Satellite. February 2018. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.028.
- Syed Husain. Design and Implementation of Forest Monitoring System using IOT. May 2019. DOI: 10.17148/IJARCSCE.2019.8527.
- Lloret J., Garcia M., Bri D., Sendra S. A Wireless Sensor Network Deployment for Rural and Forest Fire Detection and Verification [Электронный ресурс] // Sensors. 2009. № 9. 8722–8747 p. URL: <http://www.mdpi.com> (дата обращения: 10.11.2019).
- Manisha K. Ahirrao Forest Monitoring System with Virtual Fencing. May 2019. DOI: 10.22214/ijraset.2019.5206.
- Gay-Fernandez J.A., Sanchez M.G., Cuinas I. and Alejos A.V. Propagation Analysis and Deployment of a Wireless sensor Network in a Forest [Электронный ресурс] // In Electromagnetics Research. 2010. Vol. 106. P.121–145 p. URL: <http://www.jpier.org> (дата обращения: 23.11.2019).
- Peng D., Hu Y., Li Z. Spectral reflectance and vegetation index changes in deciduous forest foliage following tree removal: potential for deforestation monitoring // Журн. прикладной спектроскопии. 2016. Т. 83, № 2 С. 336 (1) – 336 (8).
- Liechty L.C., Reifsnider E., Durgin G. Developing the best 2.4 GHz propagation model from active network measurements», 2007 // IEEE 66th Vehicular Technology Conference, VTC-2007 Fall, 894–896, September 30, 2007–October 3, 2007.
- Lloret J., Tomas J., Garcia M., Canovas A. A hybrid stochastic approach for self-location of wireless sensors in indoor environments. Sensors. 2009. Vol. 9. P. 3695–3712.
- Meng Y.S., Lee Y.H., Ng B.C. Path loss Modeling for Near-ground VHF Radio-wave Propagation through Forests with Tree-Canopy reflection Effect // Progress In Electromagnetics Research M., 2010. Vol. 12. P. 131–141.
- Технологии отслеживания перемещения древесной продукции. Контроль и мониторинг цепочек поставки и соблюдения законодательства в лесной промышленности [Электронный ресурс] // Сайт Всемирного фонда дикой природы. М., 2004. 68 с. URL: <http://www.wwf.ru> (дата обращения: 19.01.2020).
- Черемисин М.В., Бурков В.Д. Метод комплексного мониторинга лесов на основе оптических и радиолокационных данных ДЗЗ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 4. С. 262–273.
- Денисов С.А., Домрачев А.А., Елсуков А.С. Опыт применения квадрокоптера для мониторинга возобновления леса // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер. Лес. Экология. Природопользование. 2016. № 4 (32) С. 34 – 46.
- Чернышов М.П. О мониторинге малоценных лесных насаждений в лесах России // Лесная таксация и лесоустройство. 2015. № 1 (52). С. 61 – 65.
- Побединский А.А. Обоснование параметров системы радиочастотного мониторинга лесного фонда: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2018. 18 с.
- Побединский А.А., Санников С.П., Побединский В.В., Бородулин И.В. Метод радиочастотного мониторинга лесного фонда // Лесной вестник. МГУЛ. 2017. Т. 21, № 2. С. 45–54.
- Санников С.П., Побединский В.В., Бородулин И.В., Побединский А.А. Экспериментальное исследование характеристик сигнала при радиочастотном мониторинге лесной среды // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер. Лес. Экология. Природопользование. 2017. № 4 (36). С. 48–58. DOI: 10.15350/2306-2827.2017.4.48
- Попов В.И. Распространение радиоволн в лесах. М.: Горячая линия-Телеком, 2017. 392 с.
- Цифровая система по предотвращению незаконной вырубке леса [Электронный ресурс] URL: <https://ecology.md>. по данным на 24.08.2019 г. (дата обращения: 20.12.2019).

Referents

- Sannikov S. P., Gerc E. F., D'yachkova A. A. Methodology for remote monitoring of stands and wood transport flows [Elektronnyj resurs] // Lesnoj zhurnal. Arhangel'sk: S(A)FU, 2016. P. 109–115. URL: <http://narfu.ru/university/library/books/2780.pdf> (data obrashcheniya: 20.10.2018).
- Forest code of the Russian Federation [Elektronnyj resurs]. URL: <http://www.leskod.ru> (data obrashcheniya: 20.10.2018).
- Dramlich M., Iovanovich-Kurepa M. Automatic monitoring-air pollution monitoring system for air pools. M., 1982. 14 p.
- Petrova N.P., Popov N.S., Luzgachev V.A. On the methodology of designing environmental monitoring systems // Vestn. TGU. T. 19, Vyp. 5. 2014. P. 1712–1716.
- Doolin D.M., Sitar N. Wireless sensors for wildfire monitoring. In Smart Structures and Materials 2005: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, San Diego, CA, USA, May 7, 2005.
- Zheng Y., Zhao Y., Liu S W. Forest Microclimate Monitoring System Based on Beidou Satellite. February 2018. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.028.
- Syed Husain. Design and Implementation of Forest Monitoring System using IOT. May 2019. DOI: 10.17148/IJARCSCE.2019.8527.
- Lloret J., Garcia M., Bri D., Sendra S. A Wireless Sensor Network Deployment for Rural and Forest Fire Detection and Verification [Elektronnyj resurs] // Sensors. 2009. № 9. 8722–8747 p. URL: <http://www.mdpi.com> (data obrashcheniya: 10.11.2019).
- Manisha K. Ahirrao Forest Monitoring System with Virtual

- Fencing. May 2019. DOI: 10.22214/ijraset.2019.5206.
10. Gay-Fernandez J.A., Sanchez M.G., Cuinas I. and Alejos A.V. Propagation Analysis and Deployment of a Wireless sensor Network in a Forest [Elektronnyj resurs] // In Electromagnetics Research. 2010. Vol. 106. P.121–145 p. URL: <http://www.jpier.org> (data obrashcheniya: 23.11.2019).
 11. Peng D., Hu Y., Li Z. Spectral reflectance and vegetation index changes in deciduous forest foliage following tree removal: potential for deforestation monitoring // Journal of applied spectroscopy. 2016. V. 83, № 2 P. 336 (1) – 336 (8).
 12. Liechty L.C., Reifsnider E., Durgin G. Developing the best 2.4 GHz propagation model from active network measurements», 2007 // IEEE 66th Vehicular Technology Conference, VTC-2007 Fall, 894–896, September 30, 2007 – October 3, 2007.
 13. Lloret J., Tomas J., Garcia M., Canovas A. A hybrid stochastic approach for self-location of wireless sensors in indoor environments. Sensors. 2009. Vol. 9. P. 3695–3712.
 14. Meng Y.S., Lee Y.H., Ng B.C. Path loss Modeling for Near-ground VHF Radio-wave Propagation through Forests with Tree-Canopy reflection Effect // Progress In Electromagnetics Research M., 2010. Vol. 12. P. 131–141.
 15. Technologies for tracking the movement of wood products. Control and monitoring of supply chains and compliance with legislation in the forest industry [Elektronnyj resurs] // Sajt Vsemirnogo fonda dikoj prirody. M., 2004. 68 p. URL. <http://www.wwf.ru> (data obrashcheniya: 19.01.2020).
 16. ChRemisin M.V., Burkov V.D. Method of integrated forest monitoring based on optical and radar remote sensing data // Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2013. V. 10, № 4. P. 262–273.
 17. Denisov S.A., Domrachev A.A., Elsukov A.S. Experience in using a quadcopter to monitor forest renewal // Vestnik of Volga State University of Technology. Series «Forest. Ecology. Nature management». 2016. № 4 (32) P. 34–46.
 18. ChErnyshov M.P. Monitoring of low-value forest stands in Russian forests // Lesnaya taksaciya i lesoustrojstvo. 2015. № 1 (52). P. 61–65.
 19. Pobedinskij A.A. Justification of parameters of the radio frequency monitoring system of the forest Fund: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Ekaterinburg, 2018. 18 p.
 20. Pobedinskij A.A., Sannikov S.P., Pobedinskij V.V., Borodulin I.V. Method of radio frequency monitoring of forest resources // Moscow state forest university bulletin - Lesnoy vestnik. 2017. V. 21, № 2. P. 45–54.
 21. Sannikov S.P., Pobedinskij V.V., Borodulin I.V., Pobedinskij A.A. Experimental study of signal characteristics for radio frequency monitoring of the forest environment // Vestnik of Volga State University of Technology. Series «Forest. Ecology. Nature management». 2017. № 4 (36). P. 48–58. DOI: 10.15350/2306-2827.2017.4.48
 22. Popov V.I. Propagation of radio waves in forests. M.: Goryachaya liniya-Telekom, 2017. 392 p.
 23. Digital system for preventing illegal logging [Elektronnyj resurs] URL: <https://ecology.md>. po dannym na 24.08.2019 g. (data obrashcheniya: 20.12.2019).