

## Моделирование системы мониторинга леса для контроля перемещения лесосырьевых материалов на основе радиочастотного метода

А.А. Побединский<sup>1а</sup>, В.В. Побединский<sup>2б</sup>, С.П. Санников<sup>2с</sup>

<sup>1</sup>Государственный аграрный университет Северного Зауралья, ул. Рошинское шоссе, 18, Тюмень, Россия

<sup>2</sup>Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, 37, Екатеринбург, Россия

<sup>а</sup> vm993711@mail.ru, <sup>б</sup> pobed@e1.ru, <sup>с</sup> goralegr@yandex.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7548-3076>,

<sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6135-6954>,

<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6318-3447>

Статья поступила 02.10.2019, принята 20.10.2019

*Рассмотрена актуальная проблема проектирования специализированной системы слежения за лесными ресурсами. Проведен анализ отечественной и зарубежной литературы по вопросам создания информационных систем мониторинга. Одними из требований, предъявляемых к системе, являются мгновенное получение информации о состоянии лесной среды, учет специфики изменчивости множества параметров лесной среды, которые могут варьироваться в больших пределах, а также соблюдение множества правил, регулируемых законодательными актами в сфере лесопользования. На основании предъявленных требований представлена система RFID-устройств. В качестве материалов использовались беспроводные датчики, система для сбора информации и оповещения. Методологически работа базируется на теории распространения радиоволн различных частот, математической статистике и теории эксперимента. Результатами исследований являются радиоволны, которые проходят через определенное количество препятствий в лесном массиве и отображают их геометрические размеры. Определен параметр, характеризующий наполняемость канального ресурса, необходимый для передачи информации. Научная новизна исследований предопределила создание информационной системы контроля за лесными ресурсами, слежение за которыми ведется непрерывно, с учетом всех необходимых требований, а именно: отсутствие вредного излучения; экономичность; энергоемкость; долговечность; распространение радиоволн на частотах, не запрещенных в РФ; определение природных параметров; обнаружение перемещения; обнаружение пожара в начальной стадии возникновения.*

**Ключевые слова:** мониторинг леса; радиочастотные волны; моделирование; контроль лесных ресурсов.

## Modeling a forest monitoring system based on the radio frequency method to control the movement of raw materials

A.A. Pobedinsky<sup>1а</sup>, V.V. Pobedinsky<sup>2б</sup>, S.P. Sannikov<sup>2с</sup>

<sup>1</sup>State Agrarian University of Northern Urals; 18, Roshchinskoe Shosse St., Tyumen, Russia

<sup>2</sup>Ural State Forest Engineering University; 37, Sibirsky Tract St., Ekaterinburg, Russia

<sup>а</sup> vm993711@mail.ru, <sup>б</sup> pobed@e1.ru, <sup>с</sup> goralegr@yandex.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7548-3076>,

<sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6135-6954>,

<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6318-3447>

Received 02.10.2019, accepted 20.10.2019

*The actual problem of designing a specialized system for tracking forest resources is considered. The analysis of domestic and foreign literature on the creation of information monitoring systems is performed. One of the requirements for the system is to instantly obtain information on the state of the forest environment, taking into account the specifics of variability of many parameters of the forest environment, which can vary within wide limits, as well as observing many rules regulated by legislative acts in the field of forest management. Based on the requirements presented, a system of RFID devices is presented. The materials used were wireless sensors and a system for collecting information and alerts. Methodologically, the work is based on the theory of propagation of radio waves of various frequencies, mathematical statistics and the theory of experiment. The research results are radio waves that pass through a certain number of obstacles in the forest and display their geometric dimensions. The parameter characterizing the occupancy of the channel resource necessary for the transmission of information is determined. The scientific novelty of the research predetermined the creation of an information system for monitoring forest resources, which are monitored continuously, taking into account all the necessary requirements, namely: the absence of harmful radiation; profitability; energy intensity; durability; propagation of radio waves at frequencies not prohibited in the Russian Federation; determination of natural parameters; motion detection; fire detection in the initial stage of occurrence.*

**Keywords:** forest monitoring, radio frequency waves, modeling, forest resources control.

**Введение.** Мониторинг леса, в частности его древостоев, является долгой, кропотливой работой работников лесного хозяйства и лесозаготовителей. Это связано с множеством параметров древостоя и совокупностью различных внешних условий в лесном массиве. Результат мониторинга предполагает получение взаимосвязанных между собой измеренных значений параметров, получаемых на определенных интервалах времени, в течение которых значения параметров существенно не изменяются [1]. Примером таких параметров являются величина ежегодного прироста древесины в толщину и высоту и обратный параметр дерева — его увядание и, как результат, потеря при урагане, пожаре или лесозаготовке. Большинство существующих методов мониторинга древостоев использует людские ресурсы и подручный измерительный инструмент. Практика показывает, что участок леса может находиться на значительном расстоянии от следящих за процессом людей. По этой причине отслеживать изменения, которые происходят с деревьями, достаточно проблематично. Необходима система мониторинга леса, которая может значительно снизить количество людей, участвующих в слежении за лесным массивом, т. е. автоматизированная, с использованием технических средств, информационных технологий. С этой целью может справиться система мониторинга, основанная на радиочастотном мониторинге лесного фонда [2].

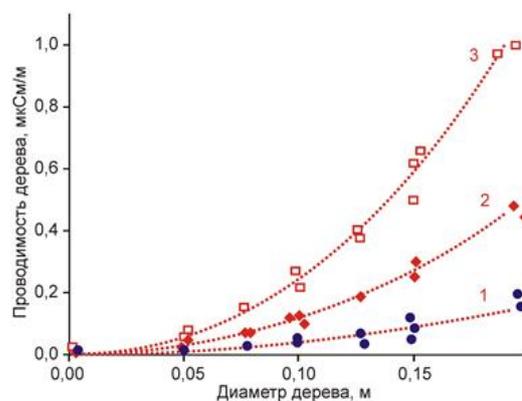
Первым современным обобщенным опытом проектирования систем явилось «Руководство к своду знаний по управлению проектами» (Руководство РМВОК), разработанное в 1960-е гг. фирмой Project Management Institute после публикаций нескольких докладов и дискуссий на эту тему [6]. В настоящее время «Руководство...» приобрело статус мирового стандарта по управлению проектами, хотя многие страны разработали свои национальные стандарты, впрочем, во многом похожие на РМВОК, в том числе и в России. В стандарте выделены следующие процессы: инициация, планирование, организация и контроль (исполнение), мониторинг и управление, завершение. Предпосылки к разработке автоматической системы мониторинга наблюдений были опубликованы М. Драмlichem еще в 1982 г. [7]. Основные принципы проектирования сформулированы Н.П. Петровой в методике по проектированию систем экологического мониторинга [8].

Практика показывает, что проблема не решается только законодательными актами. Прежние методы контроля за перемещением леса, которые применялись в советское время, широко используются современными специалистами. Эти методы не отвечают современным технологиям контроля перемещения леса. Современные методы должны быть основаны на использовании информационных автоматизированных систем. Для этих систем необходимы технические средства (датчики), помогающие следить за лесом, как это отмечено в работе [4]. Для своевременного получения оперативной информации о состоянии леса необходимо использовать различные технические средства (ТС), расположенные на земле, в воздухе и в космосе. С другой стороны, использование каждого вида ТС сопровождается трудностями, так как в лесу нет источников электропитания. Необходим поиск решения этой зада-

чи и задачи по использованию наземных ТС для контроля за перемещением лесоматериалов.

**Методы и оборудование.** Разрабатываемая система представляет собой сеть принимающих и передающих элементов (датчиков), расположенных в лесном массиве определенным образом и работающих на основе радиочастотной томографии. Приемопередатчики располагаются на исследуемом участке леса на определенном расстоянии друг от друга. При этом расстановка приемников и передатчиков подразумевает такое их расположение, которое позволит в максимальной степени показать реальную картину происходящих изменений в лесном массиве в данный момент времени или на определенном его участке.

Предлагается совершенно новый способ контроля за перемещением лесосырьевых материалов с использованием RFID-устройств и датчиков, встроенных в них. Для сбора информации с RFID-устройств они объединяются в беспроводную сеть. Проведенные исследования помогли определить параметры беспроводной сети и RFID-устройства, зависящие от свойств лесной среды: проводимость леса в зависимости от радиуса стволов деревьев, соотношение диэлектрической проницаемости и электрической проводимости леса от влажности, уровень поля рассеивания УВЧ-волн в лесу от расстояния для различных пород деревьев. Определены параметры оптимального количества информации, передаваемой в беспроводной сети, а также исследована структурная организация информационной сети из RFID-устройств (рис. 1 [3]).



**Рис. 1.** Проводимость леса со средним радиусом стволов деревьев: 1 — береза; 2 — ель; 3 — сосна

Система использует новый подход к проблеме перемещения лесоматериалов на базе RFID-устройств, объединенных в беспроводную сеть для сбора информации об изменениях состояния древесины в лесу. Каждое RFID-устройство содержит метку, которая сообщает в базу данных обо всех параметрах данного дерева, в том числе о месте его нахождения. Предлагаемая система контроля перемещения лесоматериалов с использованием RFID-устройств находится на стадии исследования и изучения, но первые результаты дают надежды на успешное ее применение в технологии лесопользования и управления лесами. Проводимые нами исследования дают ответ на вопрос, как покажут себя RFID-устройства в лесу, если известно, что лесная среда влияет на прохождение ра-

диоволн. Указанные исследования проводились для радиопередающих систем связи и радиолокации. Диапазон частот и мощность RFID-устройств отличаются в меньшую сторону от приведенных, но исследования показывают, что на отдельных участках леса это приемлемо и целесообразно для организации контроля за перемещением лесоматериалов при объединении всех устройств в беспроводную сеть. Объем информационного сигнала  $V_c$  в системе передачи выражен соотношением:

$$V_c = T \cdot \Delta F_c \cdot D, \quad (1)$$

где  $T$  — длительность информационного сигнала;  $F_c$  — ширина спектра передаваемого сигнала;  $D = 10 \lg(P/N)$  — динамический диапазон сигнала;  $P$  — мощность сигнала;  $N$  — число сообщений.

Время существования радиосигнала в канале беспроводной сети RFID-устройств определяется его длительностью, а ширина спектра указывает на диапазон частот, в котором сосредоточена основная энергия, излучаемая передатчиком радиосигнала, как это показан на рис. 2.

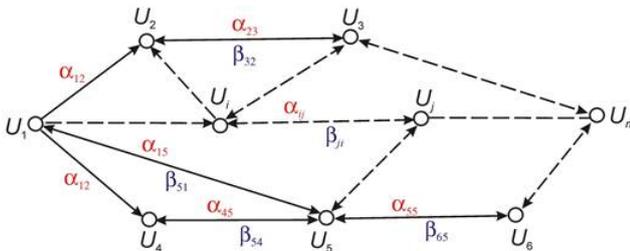


Рис. 2. Схема информационной сети из RFID-устройств:  $U$  — узел сети;  $\alpha, \beta$  — сигнал

Информация, собранная с датчиков, сможет отображаться в удобном для оператора виде — в виде графиков, таблиц или иным способом. Использование данной системы не подразумевает постоянного отслеживания оператором показаний, так как они будут записаны на электронный носитель (в электронную память), что позволит в любой момент получить доступ к необходимому временному отрезку. Собранные за определенный отрезок времени данные позволяют моделирование схемы (картины, плана, карты) расположения деревьев на местности и вычисление изменения геометрических величин, например, диаметра. Так как результаты измерений сохраняются, на их основании можно отслеживать, что происходило с лесным массивом, отдельным деревом в период засухи, в дождливый сезон, после пожаров и наводнений и т. д. Кроме этого, разрабатываемая система позволяет отслеживать перемещение лесоматериалов и возникновение лесных пожаров.

Предлагаемая система требует математического имитационного моделирования некоторых конструктивных и проектных параметров. Для этого можно воспользоваться матрицей рассеивания радиосигнала [3] от устройств RFID, расположенных по периметру исследуемого участка леса, как это показано на рис. 3.

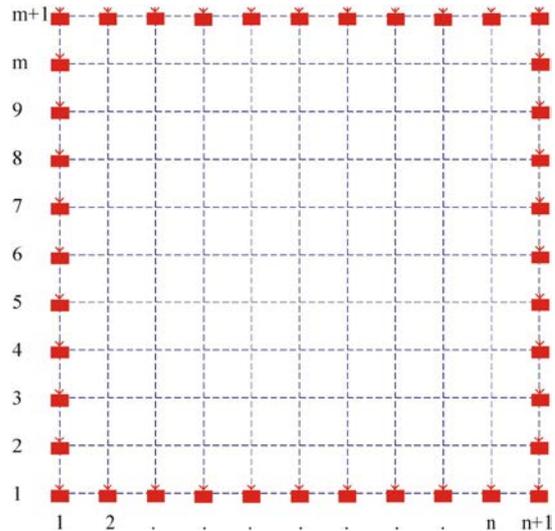


Рис. 3. Схема расположения устройств RFID исследуемого участка леса

**Результаты.** Как видно на рис. 3, исследуемый участок представляет матрицу при приеме и передаче сигнала между каждым устройством RFID. Величина рассеивания электромагнитной волны (на рисунке условно не показана) определяется деревьями, стоящими на пути распространения этого сигнала. При анализе этих сигналов можно судить о наличии отдельных деревьев, их расположении на местности (по координатам) и даже их геометрических размерах, как это показано на рис. 4.

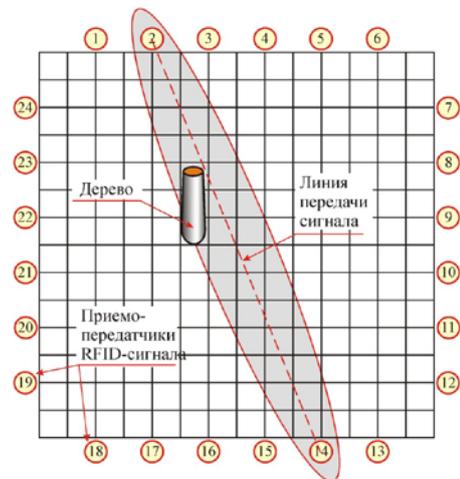


Рис. 4. Рассеивание RFID-сигнала деревом от источника на приемники

Динамический диапазон энергии в радиосигнале характеризует отношение наибольшей мгновенной мощности сигнала ( $P_{\max} = P$ ) к наименьшей ( $P_{\min}$ ), допустимое значение которой определяется мощностью помех  $P_p$  ( $P_{\min} \geq P_p$ ). При этом характеристики «полезных» радиосигналов определяются требованиями, предъявляемыми к канальным элементам сети. Например, для неискаженного информационного сигнала емкость канального ресурса должна быть не меньше объема передаваемого информационного сигнала.

Важным параметром радиосигнала, характеризующим наполняемость канального ресурса, является «база» (ширина) [2]:

$$v = 2T \cdot \Delta F_c, \quad (2)$$

где  $v \leq 1$  — радиосигналы, называемые узкополосными (простые);  $v \gg 1$  — широкополосные (сложные) радиосигналы.

**Дискуссия.** В предлагаемой системе используются УВЧ радиоволны — это обуславливает то, что вредные излучения фактически отсутствуют и поэтому негативное влияние на окружающую среду не наносится.

С экономической точки зрения, система мониторинга леса на основе радиочастотной томографии не может стоить очень дорого, так как в других отраслях томографы используются уже более 30 лет, например, в медицине, радиоэлектроника, физике. Разобравшись в основном принципе действия этого прибора, полезно и уместно разработать собственную систему мониторинга леса.

**Выводы.** По соответствующей теме исследования представлены и решены следующие вопросы:

- распространение радиоволн RFID-устройств в диапазонах 0,9 и 2,4 ГГц;
- влияние лесной среды на распространение радиоволн под пологом и в кроне деревьев;
- обоснование параметров лесной среды и RFID-устройств при использовании их для перемещения лесоматериалов, раннего обнаружения лесных пожаров и их предпосылок.

Решение этих задач может быть использовано на практике при проектировании систем сбора информации о лесе и перемещении лесоматериалов.

#### Литература

1. Санников С.П., Герц Э.Ф., Дьячкова А.А. Методология дистанционного мониторинга древостоев и транспортных потоков древесины [Электронный ресурс] // Лесной журнал. 2016. С. 109–115. URL: <http://narfu.ru/university/library/books/2780.pdf> (дата обращения: 20.10.2018).
2. Лесной кодекс РФ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.leskod.ru> (дата обращения: 20.10.2018).
3. Драмлич М., Иованович-Курепа М. Автоматическая мониторинг-система наблюдения за загрязнением атмосферы воздушных бассейнов. М., 1982. 14 с.
4. Петрова Н.П., Попов Н.С., Лузгачев В.А. К методике проектирования систем экологического мониторинга // Вестн. ТГУ. 2014. Т. 19, Вып. 5. С. 1712–1716.
5. 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.
6. Zheng Y., Zhao W., Liu S. Forest Microclimate Monitoring System Based on Beidou Satellite. February 2018. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.028
7. Husain S., Vigneshwaran Mr.K., Kaveya Mrs.S. Design and Implementation of Forest Monitoring System using IOT May 2019. DOI: 10.17148/IJARCSCE.2019.8527
8. 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. P. 8722–8747. URL: <http://www.mdpi.com> (дата обращения: 28.10.2019).
9. 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., Alejos A.V. Propagation Analysis and Deployment of a Wireless sensor Network in a Forest [Электронный ресурс] // In Electromagnet-

ics Research. 2010. Vol. 106. P. 121–145. URL: <http://www.jpier.org> (дата обращения: 09.10.2019).

11. Peng D., Hu Y., Li Z. Spectral reflectance and vegetation index changes in deciduous forest foliage following tree removal: potential for deforestation monitoring // Журнал прикладной спектроскопии. 2016. Т. 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 // 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. № 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. 2010. Vol. 12. P. 131–141.

15. Технологии отслеживания перемещения древесной продукции. Контроль и мониторинг цепочек поставки и соблюдения законодательства в лесной промышленности [Электронный ресурс] // Сайт Всемирного фонда дикой природы. URL: <http://www.wwf.ru> (дата обращения: 26.10.2018).

16. 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.

17. 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.

18. Чернышов М.П. О мониторинге малоценных лесных насаждений в лесах России // Лесная таксация и лесоустройство. 2015. № 1(52). С. 61–65.

19. Побединский А.А. Обоснование параметров системы радиочастотного мониторинга лесного фонда: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2018. 18 с.

20. 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.

21. 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.

22. Попов В.И. Распространение радиоволн в лесах. М.: Горячая линия-Телеком, 2017. 392 с.

23. Цифровая система по предотвращению незаконной вырубке леса [Электронный ресурс]. URL: <https://ecology.md> (дата обращения: 24.08.2019).

#### References

1. Sannikov S.P., Gerc E.F., D'yachkova A.A. Methodology of remote monitoring of stands and wood transport flows [Elektronnyj resurs] // Forest Journal. 2016. P. 109–115. URL: <http://narfu.ru/university/library/books/2780.pdf> (data obrashcheniya: 20.10.2018).
2. Russian Forest Code [Elektronnyj resurs]. URL: <http://www.leskod.ru> (data obrashcheniya: 20.10.2018).
3. Dramlich M., Iovanovich-Kurepa M. Automatic monitoring - air pollution monitoring system for air basins. M., 1982. 14 p.
4. Petrova N.P., Popov N.S., Luzgachev V.A. On methodics of projecting of systems of ecological monitoring // Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences. 2014. Vol. 19, Vyp. 5. P. 1712–1716.
5. 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, 225. May 7.

6. Zheng Y., Zhao W., Liu S. Liu. Forest Microclimate Monitoring System Based on Beidou Satellite. February 2018 DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.028

7. Husain S., Vigneshwaran Mr.K., Kaveya Mrs.S. Design and Implementation of Forest Monitoring System using IOT May 2019. DOI: 10.17148/IJARCCCE.2019.8527

8. 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. P. 8722-8747. URL: <http://www.mdpi.com> (data obrashcheniya: 28.10.2019).

9. 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., 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. URL: <http://www.jpier.org> (data obrashcheniya: 09.10. 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. Vol. 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 // 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. № 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. 2010. Vol. 12. P. 131–141.

15. Technologies for tracking the movement of wood products. Control and monitoring of supply chains and compliance in the forest industry [Elektronnyj resurs] // Sajt Vsemirnogo fonda dikoj prirody. URL. <http://www.wwf.ru> (data obrashcheniya: 26.10.2018).

16. Method of integrated forest monitoring based on optical and radar remote sensing data DZZ // Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2013. Vol. 10, № 4. P. 262–273.

17. Denisov S.A., Domrachev A.A., Elsukov A.S. Experience in using a quadcopter to monitor forest regeneration // Vestnik of Volga State University of Technology. Series «Forest. Ecology. Nature management». 2016. № 4 (32). P. 34–46.

18. Chernyshov M.P. On monitoring of low-value forest plantations in the forests of Russia // Lesnaya taksaciya i lesoustrojstvo. 2015. № 1(52). P. 61–65.

19. Pobedinskij A.A. Justification of parameters of radio frequency monitoring system of 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 radiofrequency monitoring of forest Fund // Moscow state forest university bulletin - Lesnoy vestnik. 2017. Vol. 21, № 2. P. 45–54.

21. Sannikov S.P., Pobedinskij V.V., Borodulin I.V., Pobedinskij A.A. Experimental study of signal characteristics in radio frequency monitoring of 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 to prevent illegal logging [Elektronnyj resurs]. URL. <https://ecology.md>. (data obrashcheniya: 24.08.2019).