

Метод мониторинга незаконных рубок деревьев с использованием радиочастотных устройств и беспроводной сенсорной сети

С.П. Санников^а, В.В. Побединский^б, И.В. Бородулин^с, А.А. Побединский^д

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт 37, Екатеринбург, Россия

^аssp-54@mail.ru, ^бpobed@e1.ru, ^сugadn66@bk.ru, ^дssp-54@mail.ru

Статья поступила 9.01.2017, принята 22.01.2017

В статье описано использование радиочастотных сенсоров для предотвращения незаконных рубок деревьев. Такие рубки происходят периодически, и тенденции к их прекращению не наблюдается. Исследования, проводимые в Уральском государственном лесотехническом университете, показали, что сенсоры, установленные в лесу, способны обеспечить оперативный дистанционный контроль за незаконными рубками древесины, а также многими другими факторами, включая лесные пожары, логистику перемещения лесоматериалов и таксационные наблюдения. Объектом исследования авторов статьи является участок в лесопарке им. Лесоводов России (Екатеринбург). Инструмент исследования — радиочастотные устройства, объединенные в беспроводную сенсорную сеть. Исследованы звуковые спектральные характеристики бензопил Тайга и Shtil. Представленная методика разработана на основе анализа звуков леса и выделения спектра работы пильных устройств (например, цепных), издающих звуки, отличающиеся от шума ветра и шелеста листьев. Также исследован шум работающих агрегатов с бензиновыми и дизельными двигателями. В приведенных спектральных характеристиках по определенным признакам выделены характерные критерии для сортировки участков звуковой последовательности фона. Результаты экспериментальных исследований подтверждают, что звук работающей бензопилы слышен в радиусе 500–700 м. Выявлено влияние рельефа и погодных условий на дальность распространения звука бензопилы. Звуковой сигнал анализировался методом Фурье для динамического и временного масштабирования. Звуковые характеристики бензопилы без нагрузки и при пилении отличаются, поэтому предложена коррекция длины волны. Это необходимо для выбора аналого-цифрового преобразователя при проектировании сенсоров контроля незаконной рубки.

Ключевые слова: радиочастотный мониторинг лесного фонда; беспроводная сенсорная сеть (WSN); параметры лесной среды; незаконные рубки деревьев.

Method of monitoring of illegal tree felling with the use of radio-frequency devices and wireless sensor network

S.P. Sannikov^a, V.V. Pobedinsky^b, I.V. Borodulin^c, A.A. Pobedinsky^d

Ural State Forest Engineering University, 37, Siberian Tract St., Ekaterinburg, Russia

^assp-54@mail.ru, ^bpobed@e1.ru, ^cugadn66@bk.ru, ^dssp-54@mail.ru

Received 9.01.2017, accepted 22.01.2017

The article considers the use of radio-frequency sensors for prevention of illegal tree felling. The scale of this seasonal tree felling is not likely to be stopped. The research work, conducted in Ural State Forest Engineering University, has shown that the sensors, set up in the forest, are capable of controlling not only the situation with illegal free felling, but also many other factors, such as forest fires, logistics of lumber displacement, remote taxation observations. The object of the research is located on the territory of Russian Foresters Woodland Park (Ekaterinburg). The research tools are the radio-frequency devices linked in wireless sensor network (WSN). The spectral sound characteristics of 'Taiga' and 'Shtil' chain saws are examined. The research method was developed on the base of wood sounds analysis and separation of work spectrum of some saw devices making sounds different from the sound of wind and the rustle of leaves. The sounds of aggregates with gasoline and diesel engines are studied. On the base of certain characteristics, some typical criteria for sorting the area of a background sound sequence are singled out. The results of the experimental studies confirm that the sound of a working chain saw can be heard in 500-700 meters away. The influence of the relief and weather conditions on the range of a chain saw sound spread is revealed. The sound signal is analysed by Fourier method for timing and dynamic scaling. The sound characteristics of a chain saw without any load and in the process of sawing are different. Thus, the correction of wavelength is suggested. This correction is required for the choice of an analog-to-digital converter (ADC) when designing the sensors for the control of illegal tree felling.

Keywords: radio frequency monitoring of forest fund; wireless sensor network (WSN); parameters of forest environment; illegal tree felling.

Введение

Многие страны, в том числе Россия, несут огромные потери древостоя от лесных пожаров и незаконных

рубок [1; 2]. Эти проблемы влекут угрожающие потери для лесохозяйственников и лесозаготовителей. Правительство создает новые и новые законы, но ситуация не

улучшается. Единая государственная информационная система (ЕГАИС) также не оказывает существенного влияния на ситуацию, так как она предназначена для торговли лесоматериалами и по этой причине не может бороться с источниками незаконной рубки [3]. Появились подделки документов, а кроме того, поскольку все законодательные акты направлены на резкие изменения в технологии, некоторые лесозаготовители не могут быстро сориентироваться и действовать по новым правилам. В связи с этим цель наших исследований — найти приемлемое решение проблемы с незаконными рубками. Трудность задачи по сохранению лесной экосистемы заключается в том, что применяемые в отрасли методы контроля затратны и узконаправлены, большинство из них малоэффективно. Необходимы более адекватные системы мониторинга состояния леса [4]. Основные требования, предъявляемые к такой системе, можно сформулировать так: минимальные эксплуатационные расходы; оперативность получения необходимой информации; долговечность (продолжительный срок работы) [5]. Если два первых пункта выполнимы, то третий на сегодняшний день стоит под вопросом. Сложность заключается прежде всего в определении срока работы. Так, для арендатора, например, можно определить продолжительность в 49-50 лет, а для других лесопользователей этот показатель еще предстоит сформулировать (определить) [6].

Из четырех известных видов мониторинга в данной статье рассмотрим два наиболее реализуемых на данном этапе развития техники и технологии: мониторинг пожарной опасности в лесах и лесных пожаров; дистанционный мониторинг использования лесов [7].

В последнее время предложено много способов реализации первого вида мониторинга — видеонаблюдение; авиасъемка, осуществляемая как пилотируемыми, так и беспилотными летательными аппаратами; космическое зондирование лесных покровов и пр. У каждого имеются преимущества и недостатки, которые не позволяют широко распространить метод в силу определенных обстоятельств [7].

Объект и методика исследования. Наиболее перспективными, на наш взгляд, являются технологии, описывающие способ раннего предупреждения события, например лесных пожаров [8; 9]. Авторы предлагают персонализированный подход к контролируемому участку леса или дереву (группе деревьев) на основе радиочастотной технологии. Описанные системы автономны и обладают определенной оперативностью, т. е. без участия человека-оператора реагируют на возникновение лесного пожара и передают эту информацию по назначению, как это определено заранее. Для передачи и приема информации можно использовать существующие сети, а там, где отсутствует доступ к каналам связи на базе радиочастотных устройств, необходимо построить локальную сеть с последующей трансляцией данных через Интернет или другие средства связи общего применения. Также авторы [9] предлагают использовать эти системы для контроля за перемещением лесоматериалов, в том числе незаконно срубленных.

Второй вид мониторинга леса основан на дистанционном получении информации о состоянии и использовании древостоя. Задача может быть решена посредством применения беспроводных сенсорных технологий (WST — Wireless Sensor Technologies) [10]. Исследования, проведенные в работе [11], подтверждают возможности для мониторинга незаконных рубок. Незаконные рубки являются наиболее проблематичными для контроля, так как имеют фактор непредсказуемости и хаотичности. Существующие методы позволяют выявлять последствия незаконных рубок, т. е. брошенные пустые делянки, откуда вывезен деловой лес, мусор в виде веток и вершинок и др. [12].

Предлагаемый метод позволяет контролировать акустическую составляющую и выделять из естественного аудиоспектра леса звуки бензопилы, лесозаготовительных машин (ЛЗМ), автотранспорта, используя радиочастотные технологии со встроенным звуковым процессором. Для этого каждое радиочастотное устройство должно содержать чувствительный микрофон или его аналог, а алгоритм работы звукового процессора способен выделять спектральную составляющую постороннего звука в лесу. Беспроводная сенсорная технология позволяет встраивать электронно-механические датчики (MEMS-сенсоры) в различные системы. Они должны быть интегрированы для передачи на базовое устройство сигнала опасности [13].

Существующие MEMS-сенсоры классифицированы по следующим параметрам: давление, температура, влажность; различные пьезо- и емкостные датчики позволяют отслеживать приближение, положение, скорость, ускорение и вибрацию [14]. В некоторых случаях перечисленные виды датчиков невозможно объединить, поэтому проведены соответствующие исследования в работах [15; 16].

В исследованиях использовались устройства с протоколами обмена на частотах 900 МГц и 2,4 ГГц для WSN: ZigBee и Bluetooth [17; 18].

В 2013 г. газета «Российские лесные вести» опубликовала заметку «Леса Индонезии спасут от "черных" рубок смартфоны, распознающие звуки бензопил» [19], где говорится, что американская некоммерческая организация Rainforest Connection объявила о проекте, направленном на борьбу с нелегальной вырубкой деревьев в Индонезии. В проекте использовали 15 модернизированных смартфонов на базе Android, которые непрерывно «слушали» лесную среду и в случае появления звука бензопилы передавали диспетчеру в автоматическом режиме SMS-сообщение (Short Message Service — служба коротких сообщений) [20]. Аккумуляторы смартфонов заряжались от солнечных панелей.

Обсуждение результатов. Экспериментальные исследования, проводимые нами с устройствами, в которых использовались различные типы микрофонов, подтверждают возможность фиксировать звуки бензопилы в радиусе примерно до 500–700 м (в зависимости от рельефа местности и плотности древостоя).

Как показали исследования, пилы с максимальной частотой вращения коленчатого вала бензодвигателя от 6 000 до 18 000 об./мин⁻¹ создают звук выхлопными

газами на низких оборотах с частотой, равной 100–300 Гц, а при максимальных оборотах — 5–8 кГц. Звуковая волна, воспринимаемая микрофоном, соединенным с усилителем радиочастотного устройства, оцифровывалась микроконтроллером и обрабатывалась встроенным звуковым процессором. Из воспринимаемого сигнала, который мы назвали «шум леса», выделялся звук бензопилы, который затем отправлялся в радиоэфир. На некотором расстоянии этот сигнал принимали радиоприемником, настроенным на радиочастоту устройства. Структурная схема WSN RF-sound sensor (англ. Wireless Sensor Network — беспроводная сенсорная сеть; RF-sound sensor — RF-звуковой сенсор, или радиочастотный звуковой сенсор) показана на рис. 1.

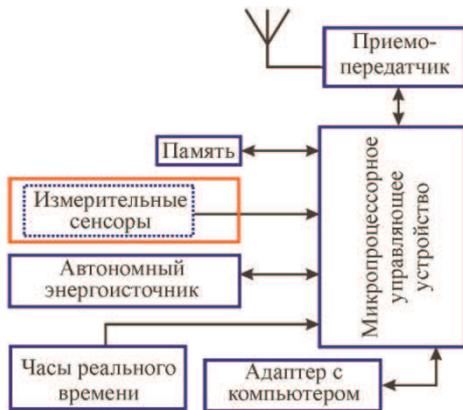


Рис. 1. Структурная схема радиочастотного сенсора

Исследования проводились с бензопилами Тайга и Stihl, которые использовались в случайных условиях различной лесной среды (плотность насаждений, породный состав) и погодных условий (влажность, температура, ветер). Полученные данные нормализовались со звуками, измеренными в лабораторных условиях.

Для обработки звукового сигнала использовали анализ Фурье методом согласования шаблонов динамического временного масштабирования. Оказалось, что из общего шума не так просто выделить звук бензопилы в силу того, что при работе под нагрузкой пиления частота вращения приводной звездочки цепной пилы уменьшается, звук выхлопных газов понижается, а при снятии нагрузки пиления — резко увеличивается. Для анализа исследуемых звуковых сигналов автоматической коррекции длины волны выбрано выражение последовательности автокорреляции $R(m)$, предложенное в работе [21]:

$$R(m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)x(n+m),$$

где $x(n)$ — исследуемый звуковой сигнал бензопилы с длиной волны с последовательностью $2n-1$ с нечеткой функцией; m — местные максимумы гармонических спектральных индексируемых составляющих с периодами $T_0; 2T_0; 3T_0$ и т. д.

Величина входного звукового сигнала усиливается и оцифровывается АЦП с интервалом 1 024 такта микропроцессора, т. е. с периодом 128 мс образца, как показано на рис. 2. В интервал окна в 1 024 такта укладывается порядка 102-х образцов, точность оцифровывания

которых после дискретизации составляет 12 бит при модуляции 8 кГц.

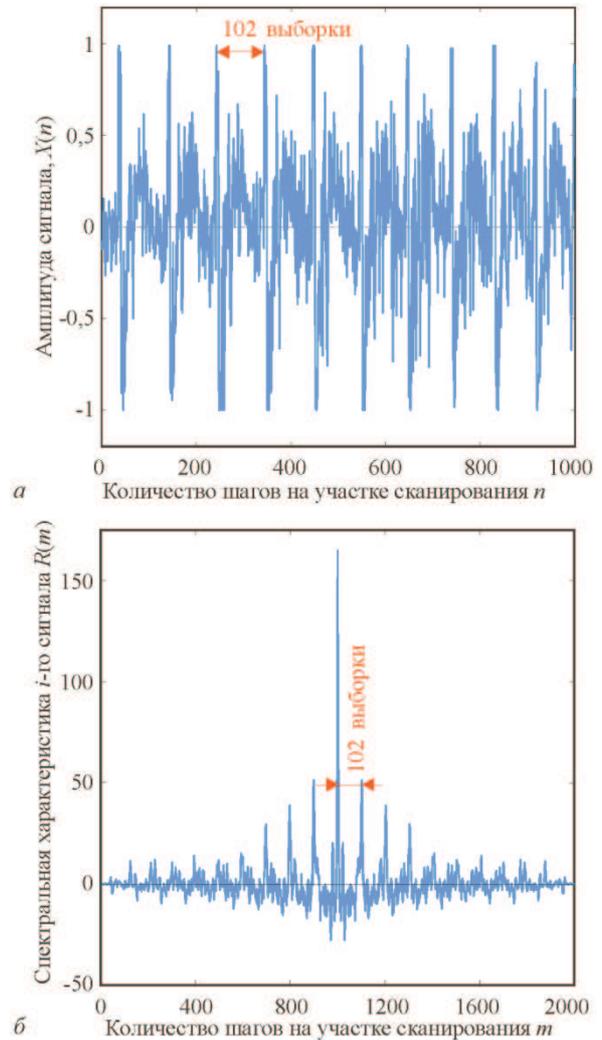


Рис. 2. Анализ звукового сигнала бензопилы: а — исследуемый сигнал; б — гармоническая составляющая сигнала

Алгоритм обнаружения звука бензопилы включает и начинается с $i = 1$:

1. Установить начальные условия с коэффициентом $R(0)$.
2. Расчет локального максимума для i -го шага $m = 20 \dots 85$ из условия: $R(m) > [R(0) / 5]$.
3. Выполнить условие: если $m = 0$, тогда прервать поиск...
4. ...Иначе — хранить в памяти значение m .
5. Конец поиска условий.
6. Выполнить $i + 1$ и перейти на 2-й шаг.

Если при анализе трех кадров результат остается неизменным, то радиочастотный сенсор переходит в дежурный режим до поступления следующего звукового сигнала, вызванного работой бензопилы.

Такой режим работы радиочастотного сенсора позволяет не тратить электропитание. Радиочастотный сенсор при передаче сигнала тревоги при обнаружении звука бензопилы тратит порядка 145–200 мА в импульсе, на прием о подтверждении переданного сигнала тревоги или опроса встроенного микрофона — 48–

56 мА, в дежурном режиме — не более 160 мкА. Таким образом, автономного источника электропитания хватает на несколько лет, в зависимости от типа производителя элементов батарей питания. В настоящее время на рынке появились источники электропитания со сроком эксплуатации (хранения) до 20 лет. При использовании альтернативных источников электропитания можно продлить срок эксплуатации до 50 лет (это то, к чему мы стремимся).

Выходной сигнал радиочастотного сенсора содержит информацию о времени появления и продолжительности звука бензопилы, а также номер метки, где установлено устройство.

При приеме сигнала тревоги легко определить конкретный район в пределах радиуса действия радиочастотного сенсора, предпринять меры для выяснения ситуации на местности и направить службы безопасности леса. Такой подход к управлению лесами позволяет производить мониторинг леса круглосуточно, на протяжении длительного времени.

Результаты оценки правильности расчета расстояния для различных типов бензопил представлены на рис. 3.

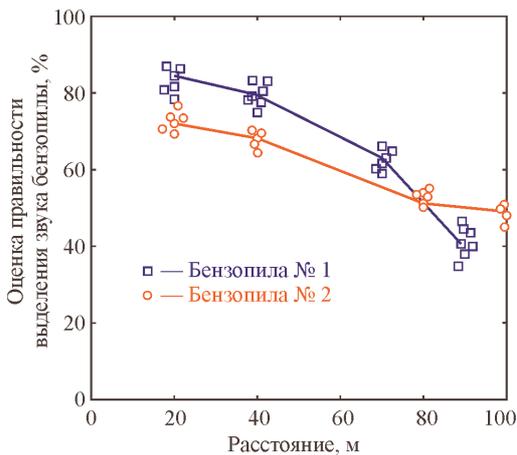


Рис. 3. Оценка правильности расчета расстояния по сигналам радиочастотного сенсора

Расстановка радиочастотных сенсоров в лесу производится по схеме соответствующего проекта, с учетом особенностей участков контроля, рельефа, породного состава, для обеспечения выполняемых задач. Все радиочастотные сенсоры соединяются в локальную сеть WSN. Современная практика показывает разнообразие используемых схем сетей, например как это описано в работе [21]. Авторами показаны четыре вида WSN сети с названиями «Пара», «Звезда», «Ячейка», «Кластерное дерево». Каждая из указанных схем имеет свои преимущества и недостатки, связанные с техническими возможностями применяемой аппаратуры, поставленной задачей и свойствами лесной среды. Анизотропные свойства лесной среды, влияющие на распространение электромагнитного сигнала радиочастотной метки, подробно исследованы в работе [22]. Основными параметрами, влияющими на распространение электромагнитного сигнала, являются диэлектрическая проницаемость

лесной среды (деревьев) и погодные условия. параметры определяются выражением:

$$\epsilon^\alpha = \sum_i V_i \epsilon_i^\alpha,$$

где V_i — объемная доля i -го элемента лесной среды (лесного полога); ϵ_i^α — комплексная диэлектрическая проницаемость лесной среды; α — константа, учитывающая особенности лесного массива.

Здесь i — элемент среды (куст, дерево, порода). Количество элементов лесной среды, хаотичное расположение элементов на ограниченной площади с конкретными размерами и высотой полога определяют его объем воздуха, имеющий свои электрические характеристики. Объемная доля всех элементов лесной среды значительно меньше объема воздуха, но в целом они определяют комплексную диэлектрическую проницаемость лесной среды выделенного элемента.

В проекте было задействовано 24 точки с радиочастотными сенсорами (рис. 4, 5). Производилась имитация пиления бензопилой, звуки фиксировали, записывали в электронные файлы, а затем обрабатывали на компьютере. Установку радиочастотных сенсоров производили по координатам GPS-навигатора (Global System for Mobile Communications — глобальная система мобильной связи) с точностью $\pm 3-5$ м (согласно паспортным данным). Сетка установки — 180–185 м с учетом перекрытия.

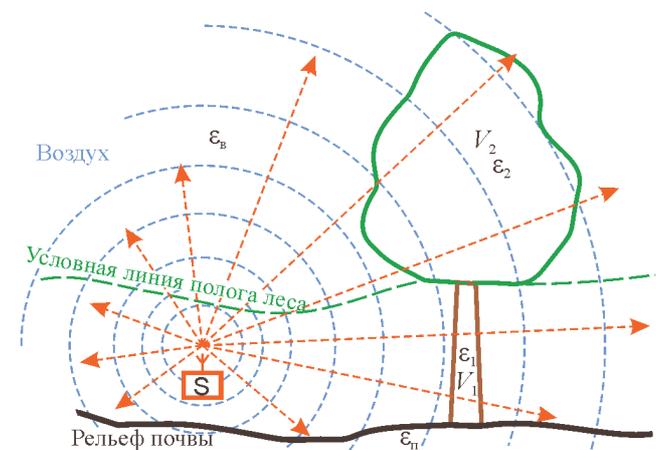


Рис. 4. Модель элемента лесной среды: S — радиочастотный сенсор; V_1 и V_2 — объем ствола и кроны дерева; ϵ — комплексная диэлектрическая проницаемость (1 — ствол; 2 — кроны; в — воздуха; n — почвы)

Мощность электромагнитной энергии, излучаемой радиочастотным сенсором, частично отражается от поверхностей или поглощается элементами лесной среды одновременно. Это происходит много раз, поэтому напряженность в каждой точке лесной среды зависит от множества факторов. Одни из них способствуют прохождению электромагнитных волн, другие — наоборот препятствуют. На распространение влияет время суток, например ночью, когда солнечная активность снижается, что вызывает увеличение заряженных частиц в воздухе, устойчивость и дальность связи увеличиваются.

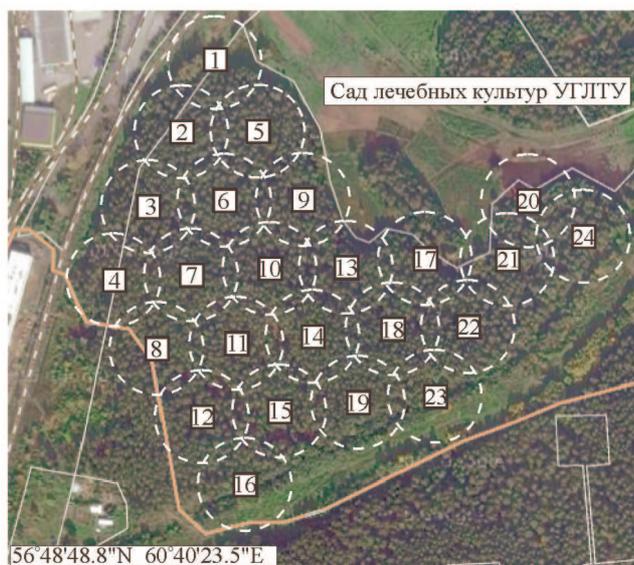


Рис. 5. Схема расположения радиочастотных сенсоров на карте (фрагмент)

Все радиочастотные сенсоры объединены в сеть WSN с самонастраивающейся архитектурой [9]. Количество информации I_A и скорость распространения по сети зависят от количества элементов A , стоящих в узлах, выполняющих роль ретрансляторов. По утверждению В.Б. Вяткина [23], совокупность вершин соответствует выражению $a \in A$, где a является линией связи (ЛС) между двумя узлами A . Максимальное число в сети ЛС, выходящих из одной вершины, равно числу символов (n), выбранному для составления индивидуального номера радиочастотного сенсора. В качестве индивидуального номера радиочастотного сенсора в сети выступает последовательность символов, записанных в адрес прохождения информации через определенные узлы. Это позволяет отслеживать «историю пути» и местонахождение источника информации с его начальным кодом (меткой). Поэтому количество информации I_A , где A является монотонно возрастающей функцией $m(A)$, для любых двух объектов информации A и B можно записать [9]:

$$m(A) = X, \quad m(B) = X + 1,$$

при условии, что $I_A < I_B$, а X — уровень иерархии «дерева» прохождения информации с количеством разветвлений m , исходящих из одного узла, как это показано на рис. 6.

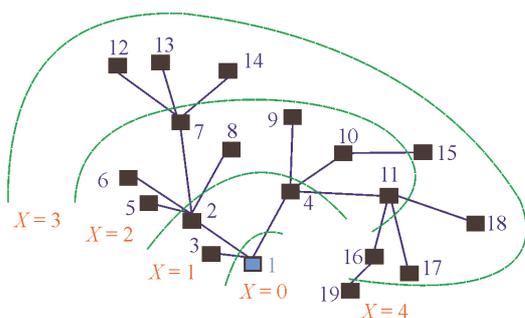


Рис. 6. Схема уровня дерева WSN сети (X — уровень иерархии «дерева» сети)

В итоге предложен подход, метод для мониторинга лесов на основе беспроводной сенсорной сети по предотвращению незаконных рубок.

Оценка звукового сигнала бензопилы радиочастотными сенсорами и принципы построения на их базе локальной самообразующейся синергетической сети для сбора информации были предложены с использованием современных технологий низкого энергопотребления и надежности системы. Это не окончательный вариант системы мониторинга лесов, поставленная задача требует дальнейших исследований и поиска новых решений.

Литература

1. Timber guard USA rescues from fire Santa-Barbara [Электронный ресурс] // GreenPress: сайт информационного агентства лесного комплекса. URL: <http://greenpressa.ru/v-mire/lesnaya-ohrana-ssha-spasaet-ot-pozharov-santa-barbaru> (дата обращения: 20.11.2016).
2. ГОСТ Р 22.1.09-99. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров [Электронный ресурс] // Пожар.ру: сайт. URL: <http://www.pojar.ru/articles/i779.html> (дата обращения: 20.11.2016).
3. Единая государственная автоматизированная информационная система учета древесины и сделок с ней (ЕГАИС УДиС) [Электронный ресурс] // Сайт Федерального агентства лесного хозяйства. URL: <http://www.rosleshoz.gov.ru/activity/> (дата обращения: 24.10.2016).
4. Серков П.А., Санников С.П. Эффективный способ мониторинга леса на заданном пространстве // Научное творчество молодежи — лесному комплексу России: материалы IX Всерос. науч.-технической конф. Екатеринбург, 2013. Ч. 2. С. 90-93.
5. Герц Э.Ф., Санников С.П., Соловьев В.М. Использование радиочастотных устройств для мониторинга экологической ситуации в лесах // Аграрный вестник Урала. 2012. № 1 (93). С. 37-39.
6. Лесной кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс]: закон Рос. Федерации от 4 дек. 2006 г. № 200-ФЗ (с изм. и доп., вступившими в силу с 01.03.2015 г.). Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
7. Санников С.П., Герц Э.Ф., Дьячкова А.А. Методология дистанционного мониторинга древостоев и транспортных потоков древесины // Изв. высш. учеб. заведений.- Лесной журнал. 2016. С. 109-115.
8. Лисиенко В.Г., Санников С.П. Система обнаружения лесного пожара: пат. 2492891 Рос. Федерация. Заявка № 2012117204/12, 26.04.2012 (24), заявл. 26.04.2012 (45), опубл. 20.09.2013, Бюл. № 26.
9. Санников С.П., Герц Э.Ф., Шипилов В.В., Серков П.А. Моделирование системы мониторинга перемещения лесосырьевых потоков и пожаров на основе синергетической сети RFID датчиков // Вестн. моск. гос. ун-а леса - Лесной вестник. 2014. № 2-3. С. 104-110.
10. Luis Ruiz-Garcia, Loredana Lunadei, Pilar Barreiro, Jose Ignacio Robla. A Review of Wireless Sensor Technologies and Applications in Agriculture and Food Industry: State of the Art and Current Trends // Sensors 2009. № 9. P. 4728-4750.
11. Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramanian Y., Cayi-rci E. Wireless sensor networks: a survey // Comput. Netw. 2002. № 38. P. 393-422.
12. Qingshan S., Ying L., Gareth. D., Brown D. Wireless intelligent sensor networks for refrigerated vehicle // In IEEE 6th Symposium on Emerging Technologies Mobile and Wireless Communication. Shanghai. China, 2004.

