ТРУДЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ИНСТИТУТА ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

www.journal.spb-niilh.ru
ISSN 2079-6080

DOI 10.21178/2079-6080.2022.4.99
УДК 630.181

Таксационно-дешифровочные показатели насаждений как основа разработки моделей машинного обучения для дистанционного мониторинга лесов

© В.А. Славский, А.В. Мироненко, С.М. Матвеев, Д.А. Литовченко

Taxation-deciphering indicators of plantations as the basis for the development of machine learning models for remote monitoring of forests

V.A. Slavskiy, A.V. Mironenko, S.M. Matveev, D.A. Litovchenko (Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov")

The solution of strategic tasks in the field of use, protection, protection and reproduction of forests in the Russian Federation, as well as improving the efficiency of protecting forests from fires, protecting forests from pests, diseases and other adverse factors, is facilitated by remote monitoring. The basis for the implementation of remote monitoring of forests is the materials of measuring taxation with a high degree of detail of work. Plantations of different ages with different adaptive potential, having different species composition and structure, located on the territory of the Prigorodny forestry of the Voronezh region, were selected as objects of study. The results of land taxation were obtained in a volume that ensures the representativeness of the sample. The basis of the integrated approach was tree-by-tree accounting of forest resources with increased detail of work, which made it possible to compile a database for the formation of training samples and the creation of machine learning models. The need for tree-by-tree accounting with the determination of coordinates is especially relevant in plantations with high canopy density. In the course of mathematical processing of the experimental material, correlations were established between the main taxation indicators. One of the direct signs, most easily determined during remote monitoring of the state of forests, is the diameter of the crown in forest plantations, which is closely related to the state of the plantation (0.71). The revealed regularity will make it possible to use crown diameters in even-aged forest stands as an additional indicator for remote monitoring of the state of forests. A set of silvicultural and taxation features of the plantation, which are of

the greatest importance for remote monitoring, has been established: in addition to the crown diameter ($F = 38$), these are the height of the stand ($F = 24$) and adjoining tree crowns ($F = 13$).

Keywords: remote monitoring, conservation and protection of forests, inventory, modeling

Таксационно-дешифровочные показатели насаждений как основа разработки моделей машинного обучения для дистанционного мониторинга лесов

В.А. Славский, А.В. Мироненко, С.М. Матвеев, Д.А. Литовченко

Решению стратегических задач в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации, а также повышению эффективности охраны лесов от пожаров, защиты лесов от вредителей, болезней и других неблагоприятных факторов способствует проведение мониторинга лесов. Основой для его осуществления являются материалы измерительной таксации с высокой степенью детализации работ. В качестве объектов исследования выбраны разновозрастные насаждения с различным адаптивным потенциалом, имеющие различный породный состав и структуру, расположенные на территории Пригородного лесничества Воронежской области. Результаты наземной таксации получены в объеме, обеспечивающем репрезентативность выборки. Основой комплексного подхода являлся подеревный учет лесных ресурсов с повышенной детализацией работ, что позволило составить базу данных для формирования обучающих выборок и создания моделей машинного обучения. Необходимость подеревного учета с определением координат особенно актуальна в насаждениях с высокой сомкнутостью полога. В ходе математической обработки экспериментального материала установлены корреляционные связи между основными таксационными показателями. Одним из прямых признаков, наиболее легко определяемых при проведении дистанционного мониторинга состояния лесов, является диаметр кроны в лесных культурах, имеющий тесную связь с состоянием насаждения (0,71). Выявленная закономерность позволит использовать диаметры крон в одновозрастных древостоях в качестве дополнительного индикатора при дистанционном мониторинге состояния лесов. Установлен комплекс лесоводственно-таксационных признаков насаждения, имеющих наибольшую значимость для дистанционного мониторинга: помимо диаметра кроны ($F = 38$), это высота древостоя ($F = 24$) и сомкнутость полога ($F = 13$).

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, охрана и защита лесов, таксация, моделирование

Славский Василий Александрович – профессор каф. лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, д-р с.-х. наук

E-mail – slavskiyva@yandex.ru

Мироненко Алексей Викторович – доцент каф. лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, канд. с.-х. наук

E-mail: alexeymironenko66@gmail.com

Матвеев Сергей Михайлович – заведующий каф. лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, д-р биол. наук, профессор

E-mail: lisovod@bk.ru

Литовченко Дарья Андреевна – доцент каф. лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, канд. биол. наук

E-mail: timashchuk90@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

394087 г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8

Введение

Дистанционный мониторинг лесов предусматривает возможность выявления, оценки и прогнозирования процессов, происходящих в насаждениях, на основе дешифрирования материалов, полученных из различных источников пространственных данных: космической съемки, аэрофотосъёмки и съёмки с использованием БПЛА. Дистанционный мониторинг позволяет получать информацию о состоянии лесов и проводимой хозяйственной деятельности, а его результаты могут использоваться во всех направлениях лесной отрасли, что требует разноплановых подходов к материалам мониторинга. Стационарные исследования, направленные на получение актуальной информации в области охраны, защиты и воспроизводства лесов и вероятности возникновения неблагоприятных процессов в различных региональных экосистемах, находятся на начальном этапе [8].

Основная цель проводимого нами исследования – разработать технологию дистанционного мониторинга лесов, позволяющую определять количественные и качественные характеристики насаждения, а также выполнить превентивную оценку потерь лесных ресурсов.

Основой для разработки адекватно работающих моделей машинного обучения, используемых в целях дистанционного мониторинга лесов, являются качественные материалы измерительной таксации с высокой степенью детализации работ. Требуется проведение сплошного перечета не только лесоводственно-таксационных, но и ландшафтно-дешифровочных показателей. Это позволит сопоставить экспериментальные данные наземной таксации на пробных площадях с данными высокого пространственного разрешения, полученными при помощи полезных нагрузок БПЛА, и сформировать обучающие выборки для осуществления дистанционного мониторинга лесов.

Ключевым моментом является обоснованный подбор территорий (месторасположения пробных площадей, их количество и размеры), т. е. определение объема выборочной совокупности, с соблюдением требований репрезентативности для получения статистически достоверных результатов [3].

Многие исследователи проводили работы по установлению взаимосвязей между степенью устойчивости насаждений и таксационными показателями [14, 15, 29, 32, 33, 34, 36]. Экспериментально установлена зависимость устойчивости насаждений от состава насаждений [7, 31, 35], типов леса [30], возраста древостоев [25, 30, 38], полноты [4], средней высоты древостоя [2] и других факторов [6].

Известно, что смешанные древостои проявляют бóльшую устойчивость, как к пожарам, так и к болезням и вредителям, чем чистые хвойные. Это утверждение не оспаривается никем из специалистов и подтверждается в ряде научно-исследовательских работ ведущих ученых [1, 14, 28, 37, 39]. Обязательно следует учитывать возрастные особенности насаждения в связи с различным состоянием, разной степенью ущерба, причиняемой пожаром, разной интенсивностью горения и разными объёмами содержания углерода и выбросов парниковых газов в молодых и старых древостоях [12, 14, 24, 28].

Объекты и методика выполнения работ

Выборочная совокупность представляет собой статистически репрезентативную часть генеральной совокупности, изучение которой позволяет получить необходимые сведения обо всей генеральной совокупности [7]. Кроме того, репрезентативность выборки должна быть обеспечена и в ходе определения количественных и качественных характеристик лесов на пробных площадях (ПП).

Расчет необходимого количества деревьев, требующих измерений на пробной площади, выполнен по следующей формуле:

$$N = \frac{c^2 \cdot t^2}{P^2}$$

где c – коэффициент изменчивости признака (в расчете используется самый варьируемый из изучаемых признаков);

t – критерий Стьюдента (уровень достоверности опыта – во всех расчетах равнялся 1,96);

P – допустимая погрешность опыта (рассчитывается для обеспечения уровня вероятности 0,95).

В связи с необходимостью формирования обучающих выборок для последующего проведения нейросетевого анализа, составления и тестирования адекватных моделей машинного обучения, а также моделирования основных лесоводственно-таксационных показателей требуется дополнительное увеличение объемов работ, поскольку крайне важно минимизировать погрешность, допустимую при измерениях таксационных показателей. Для обеспечения репрезентативности комплексных исследований количество измеряемых деревьев увеличивается в 1,5 раза по сравнению с расчетным в выделах, имеющих среднюю по однородности структуру насаждения, и в 2 раза – по сравнению с расчетным – в лесотаксационных выделах с неоднородной таксационной характеристикой.

В ходе проведения исследований на территории Пригородного лесничества Воронежской области заложено и детально обследовано 10 пробных площадей, отнесенных к различным группам возраста, отличающихся по степени пожарной опасности [28], имеющих разный состав и продуктивность (табл. 1).

Таблица 1

Средние таксационно-дешифровочные показатели насаждений, произрастающих на объектах исследования

Номер ПП	Состав	Возраст, лет	Диаметр ствола, см	Диаметр кроны[1)], м	Высота, м	Состояние, балл[2)]	ТЛУ[3)]	Полнота	Запас, м^3/га
1	10С	12	5	1,8/1,8	4	1,15	$А_1$	0,9	20
2	10С+Б	35	14	2,2/2,1	12	1,38	$А_2$	0,7	130
3	6Д2Кл2Лп	50	22	3,5/3,5	20	1,75	$С_2$Д	0,7	170
4	8С1Д1Ос	65	24	3,6/3,5	22	2,04	$С_2$	0,7	220
5	9Д1Кл+Лп	70	23	4,6/4,7	22	2,32	$Д_2$	0,8	240
6	5С5Д	90	32	4,6/4,4	26	2,41	$С_2$	0,8	330
7	5С3Ос2Б	100	30	4,4/4,5	22	2,25	$С_2$Д	0,5	160
8	4Д4Яс2Кл	110	30	5,6/5,5	24	2,34	$С_2$Д	0,7	280
9	7Д2Кл1Лп	120	33	5,5/5,7	25	2,07	$Д_2$	0,7	310
10	10С+Д	140	36	4,7/4,8	27	1,83	$В_2$	0,8	350

Примечания. 1) Диаметр кроны указан в двух направлениях: С-Ю/З-В. 2) Состояние оценивалось по 5-балльной системе. 3) ТЛУ – тип лесорастительных условий

Пробные площади размещены в частях выделов, наиболее характерно отражающих структуру древостоя. Кроме того, по возможности, на пробных площадях должны присутствовать просветы между кронами или микро-поляны для идентификации напочвенного покрова с применением БПЛА.

Форма пробных площадей должна обеспечить возможность последующего дистанционного зондирования объектов на базе БПЛА с максимальной точностью. Следовательно, целесообразно отдавать предпочтение участкам прямоугольной или квадратной формы.

Основу методического обеспечения работ составляют положения о проведении Государственной инвентаризаций лесов [18], Лесоустроительной инструкции [16], Постановления Правительства РФ «Об утверждении Правил пожарной безопасности в лесах» [19], а также иные справочные материалы, нормативно-правовые документы и методические рекомендации [5, 10, 11, 13, 15, 17, 22, 26, 27], на базе которых авторами составлен комплексный методический подход для определения показателей на таксационно-дешифровочных площадях для последующего проведения дистанционного мониторинга. Пробные площади закладывались с учетом требований ОСТ 56-69-83 «Площади пробные лесоустроительные. Методы закладки» [20]. При закладке таксационно-дешифровочных пробных площадей на них, в отличие от обычных, дополнительно изучают строение древесного полога, характеристики крон деревьев и их отображение на аэрофотоснимках.

На пробных площадях производится сплошной перечет деревьев с определением породы, высоты и диаметра ствола, высоты начала живой кроны, диаметра кроны и санитарного состояния. Определяются и фиксируются характеристики напочвенного покрова, подроста, подлеска, степень захламленности и наличие валежа.

Высоту дерева и начало живой кроны измеряют с точностью 0,5 м (при очень высокой сомкнутости крон – 1 м) высотомером Vertex Laser Geo 360°. Под началом живой кроны подразумевается у хвойных пород высота мутовки, в которой находятся по крайней мере две живые ветви, и если эта мутовка является составной частью более или менее компактной кроны. Если мутовка значительно отделена от расположенной выше зеленой кроны, за начало принимается нижний уровень компактной зеленой кроны. У лиственных деревьев отсчет начинается от места первого раздвоения оси ствола или начала компактной живой кроны, причем не принимаются во внимание отдельно растущие небольшие ветви или побеги, образующиеся на стволе под кроной [20].

Диаметр ствола измеряли мерной вилкой на высоте 1,3 м, с точностью до 1 см.

Диаметр кроны определяли по проекции кроны в двух противоположных направлениях (С-Ю/З-В), с помощью лазерного дальномера. Точность измерения – не менее 0,5 м (желательно до 0,1–0,2 м).

Состояние дерева определяли глазомерно, по общепринятой 5-балльной шкале, на основе Правил санитарной безопасности в лесах [22].

Характеристики напочвенного покрова с точки зрения пожарной опасности определяются на протяжении всей территории ПП и фиксируются в пределах диаметра кроны каждого дерева по следующим градациям: 3 – способствующий горению; 2 – поддерживающий горение; 1 – препятствующий горению.

Валеж (в пределах диаметра кроны измеряемого дерева) характеризуется как мелкий, средний, крупный – с указанием древесной породы, измерением его длины и диаметра на ½ длины.

Захламленность (в пределах диаметра кроны измеряемого дерева) определяется как слабая, средняя или сильная. В случае если наблюдается наличие валежа/отпада или захламленности на низкополнотной части пробной площади (прогалина/микрополяна) за границами проекции кроны, их также следует учесть и приписать к ближайшему дереву.

Подрост (в пределах диаметра кроны измеряемого дерева): степень густоты (густой, средней густоты и редкий) и крупность (по 3-м категориям: 1 – высота до 0,5 м; 2 – 0,5–2 м; 3 – более 2 м) с указанием породы.

Подлесок (в пределах диаметра кроны измеряемого дерева): степень густоты (густой, средней густоты и редкий) и крупность (1 – высота до 1 м; 2 – 1–2 м; 3 – более 2 м) с указанием породы. Также указывается жизнеспособность подроста и подлеска [22].

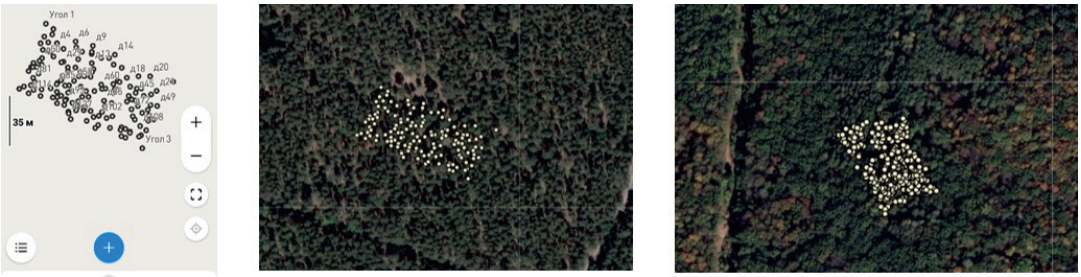
В ходе выполнения сплошного перечета деревьев на ПП мы определили координаты каждого дерева при помощи GNSS приемника SOUTH G2.

Для обработки материалов наземной таксации использованы данные лесоустройства

[5], рекомендации, полученные в результате исследований ведущих ученых [9, 21, 23, 25, 31], и основы статистического анализа, базирующиеся на допустимой погрешности определения основных лесоводственно-таксационных показателей и предполагаемом уровне изменчивости признака [7].

Результаты исследований

В ходе проведения сплошного перечета деревьев на ПП (с определением стандартного набора лесоводственно-таксационных показателей), мы установили координаты каждого дерева, закартировали деревья и выполнили наложение координат на Google-снимки (рис. 1).



а) б) в)

Рис. 1. Картирование деревьев на пробных площадях: а) – необработанные материалы координат деревьев на ПП 10; б) – расположение деревьев на ПП 10; в) – расположение деревьев на ПП 9

Необходимость подеревного учета с определением координат особенно актуальна в насаждениях с высокой сомкнутостью полога, поскольку кроны большинства деревьев перекрывают друг друга и зачастую невозможно идентифицировать ту или иную древесную породу при дешифрировании снимков (рис. 2).

№ дерева	Longitude	Latitude
угол 1	39,21035239	51,72378066
угол 2	39,20966125	51,72367717
угол 3	39,20979902	51,72326867
угол 4	39,21050990	51,72338114
1	39,20967357	51,72366668
2	39,20971336	51,72364414
3	39,20973062	51,72363372
4	39,20976591	51,72365175
5	39,20977904	51,72365372
6	39,20978805	51,72365597
7	39,20979030	51,72364668
8	39,20979368	51,72364133
9	39,20980194	51,72363175
10	39,20980156	51,72365456
11	39,20987194	51,72365147
12	39,20986349	51,72368526
13	39,20991998	51,72365823
14	39,20994513	51,72371005
15	39,20997553	51,72371737
16	39,20994889	51,72364414
17	39,20999881	51,72364950
18	39,21001532	51,72365569
19	39,21005999	51,72370273
20	39,21009827	51,72371568

Рис. 2. Наземная таксация насаждений с определением координат на ПП 5 (сомкнутость полога – 0,9)

Класс природной пожарной опасности является одним из первостепенных критериев при выборе места закладки ПП, поскольку сочетает в себе дифференциацию по типам леса, принадлежность к группе возраста, учитывает влажность почвы, степень захламленности, густоту подроста и подлеска. Однако в связи с тем, что класс пожарной опасности сложно выразить в числовом формате, в качестве результативного признака выбран индекс горимости [31], имеющий очень тесную корреляционную связь с классом пожарной опасности.

Математическая обработка полученных результатов основывалась на применении дисперсионного анализа, в результате которого выявлены достоверности различий (t) между горимостью насаждений различного возраста (табл. 2). Для расчета горимости использовались данные о лесных пожарах на территории Пригородного лесничества Воронежской области за период с 2002 по 2022 год. Группы возраста, имеющие несущественные различия, объединены между собой.

Таблица 2

Достоверность различий между средними значениями горимости в сосновых насаждениях различного возраста

Класс возраста	1	2	3	4	5	6	7	8	$t_{0,05}$
1	-	2,12	5,07	6,09	7,22	7,23	7,81	7,78	1,96
2	2,12	-	2,54	3,16	3,50	3,50	3,89	3,87	1,96
3	5,07	2,54	-	0,62	1,46	1,47	1,92	1,89	1,96
4	6,09	3,16	0,62	-	0,83	0,83	0,96	0,94	1,96
5	7,22	3,50	1,46	0,83	-	0,01	0,44	0,42	1,96
6	7,23	3,50	1,47	0,83	0,01	-	0,51	0,50	1,96
7	7,81	3,89	1,92	0,96	0,44	0,51	-	0,02	1,96
8	7,78	3,87	1,89	0,94	0,42	0,50	0,02	-	1,96

На основании рассчитанной достоверности различий целесообразно выделить 4 возрастных категории насаждений, существенно различающихся по степени устойчивости. Это молодняки 1 класса возраста, молодняки 2 класса возраста, средневозрастные и приспевающие, а также спелые и перестойные древостои. Различия между средними уровнями горимости в спелых (перестойных) и средневозрастных (приспевающих) насаждениях находятся в пределах математической погрешности $t = 1,92$, что является основанием для выделения спелых и перестойных древостоев в отдельную категорию устойчивости к неблагоприятным факторам. Начиная со второго класса средневозрастных сосновых древостоев (более 70 лет), происходит «сглаживание» значений индексов горимости и увеличение устойчивости к возгоранию. Следовательно, можно рассматривать приспевающие, спелые и перестойные насаждения как отдельную условно выделенную страту по устойчивости насаждений.

Для установления взаимосвязей между таксационными признаками и выявления наиболее значимого из них в целях проведения дистанционного мониторинга выполнен корреляционный анализ (табл. 3).

Таблица 3

Корреляционная матрица основных таксационных показателей, определенных на объектах исследования

	Состав	Высота, м	Диаметр ствола, м	Диаметр кроны, м	Возраст, лет	Состояние, балл	Полнота	Запас, м^3
Состав	1,0	0,41	0,48	0,55	0,32	0,53	0,41	0,55
Высота, м	0,41	1,0	0,69	0,39	0,58	0,42	0,34	0,67
Диаметр ствола, м	0,48	0,69	1,0	0,62	0,64	0,12	–0,35	0,66
Диаметр кроны, м	0,55	0,39	0,62	1,0	0,48	0,71	0,57	0,36
Возраст, лет	0,32	0,58	0,64	0,48	1,0	0,33	–0,40	0,55
Состояние, балл	0,53	0,42	0,12	0,71	0,33	1,0	0,22	0,30
Полнота	0,41	0,34	–0,35	0,57	–0,40	0,22	1,0	0,64
Запас, м^3	0,55	0,67	0,66	0,36	0,55	0,30	0,64	1,0

Из приведенных данных следует, что тесная корреляционная связь отмечена между диаметром ствола и высотой древостоя (0,69), запасом древесины и высотой древостоя (0,67), запасом древесины и диаметром ствола (0,66), возрастом и диаметром ствола (0,64). Выявленные взаимосвязи могут использоваться в качестве косвенных признаков для получения требуемых (сложнее определяемых) характеристик насаждения.

Однако наибольшая теснота связи выявлена между состоянием насаждения и диаметром кроны (0,71). Следует отметить, что подобная закономерность наблюдается только в одновозрастных древостоях и применима, прежде всего, для проведения дистанционного мониторинга в лесных культурах.

На рисунках 3 и 4 показана корреляция между диаметрами крон и состоянием одновозрастных сосновых (140 лет) и дубовых (70 лет) древостоев. Более тесная связь между рассматриваемыми признаками выявлена в сосновых древостоях, по сравнению с дубовыми. Это связано как с высоким уровнем индивидуальной изменчивости, характерным для размеров крон в дубовых насаждениях, так и с наличием сопутствующих пород, являющихся спутниками дуба.

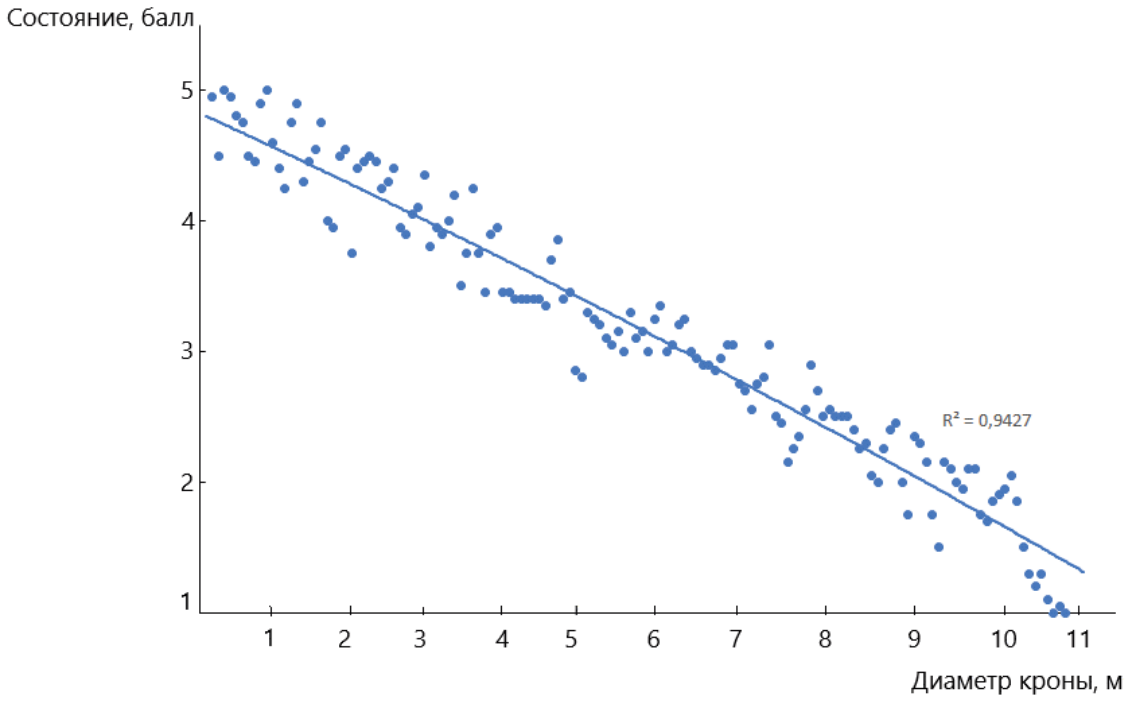


Рис. 3. Зависимость состояния насаждений от диаметра кроны
(ПП 10 – сосновые древостои 140 лет)

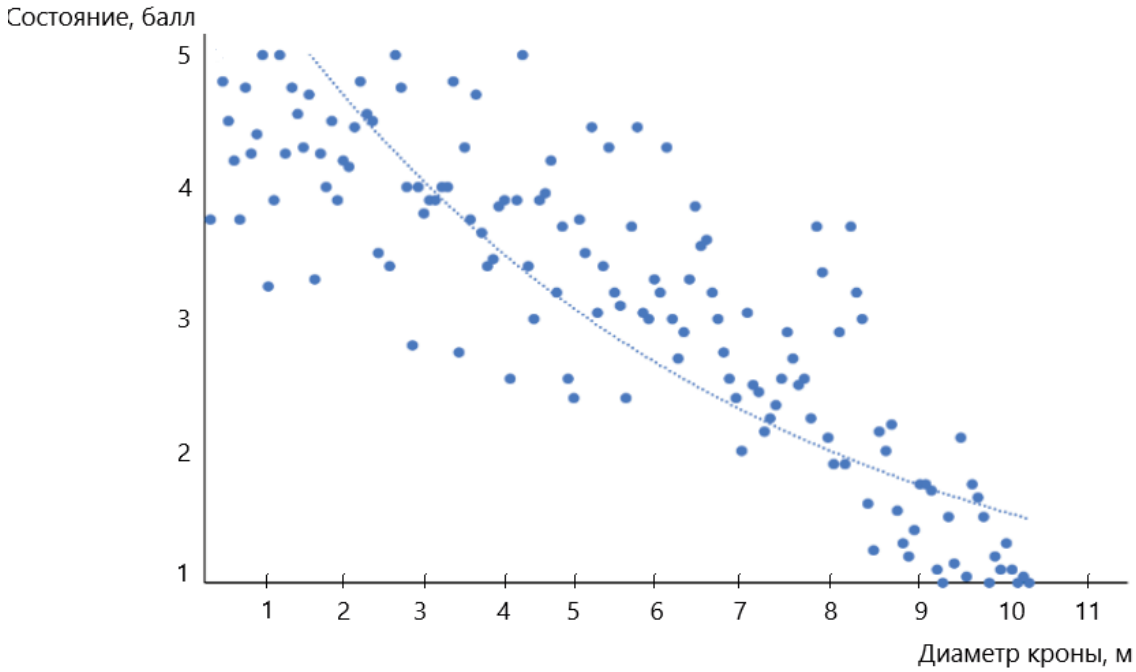
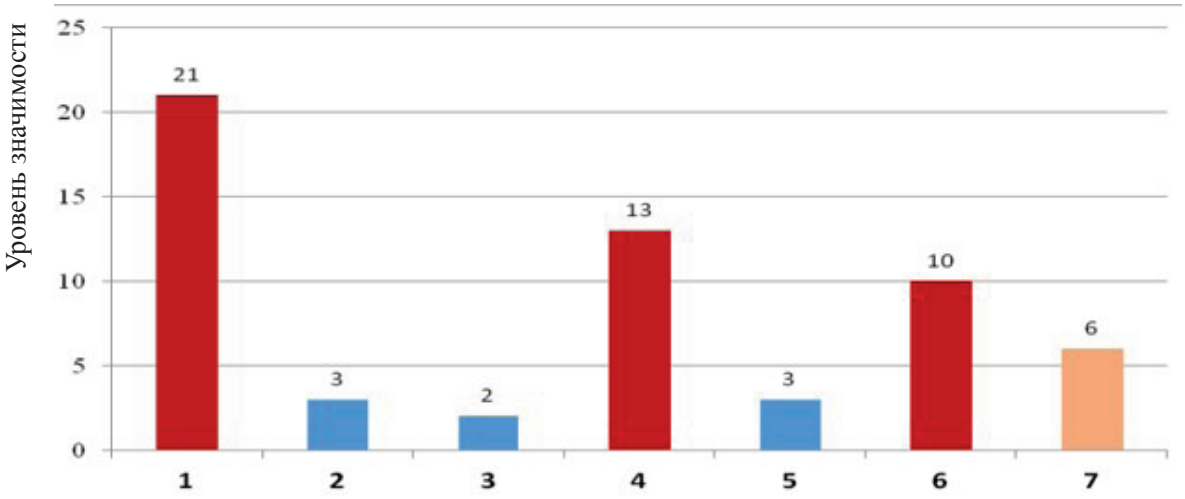


Рис. 4. Зависимость состояния насаждений от диаметра кроны
(ПП 5 – дубовые древостои 70 лет)

Кроме того, существенное влияние на размеры крон оказывают возраст и полнота древостоя, а также сомкнутость полога. Выявлены лесоводственно-таксационные показатели, имеющие наибольший уровень значимости (*F*) для определения состояния насаждения при дистанционном мониторинге (рис. 5).



1 – диаметр кроны, 2 – высота начала живой части кроны, 3 – диаметр ствола, 4 – высота дерева, 5 – полнота древостоя, 6 – сомкнутость полога, 7 – состояние деревьев

Рис. 5. Уровни значимости основных таксационных показателей относительно состояния насаждения

Если рассматривать комплекс лесоводственно-таксационных признаков насаждения, то наиболее значимыми для дистанционного мониторинга являются высота древостоя ($F = 24$), сомкнутость полога ($F = 13$) и диаметр кроны ($F = 38$).

Заключение

В ходе выполнения работы мы сформировали методический подход сбора лесоводственно-таксационной информации для осуществления дистанционного мониторинга и апробировали его на территории Пригородного лесничества. Основой комплексного подхода является подеревный учет лесных ресурсов с повышенной детализацией работ, что позволит составить базу для формирования обучающих выборок и создания моделей машинного обучения.

При выполнении корреляционно-регрессионного анализа выявлены взаимосвязи, которые могут использоваться при проведении дистанционного мониторинга в качестве косвенных признаков для определения лесоводственно-таксационных характеристик насаждения. Одним из наиболее значимых признаков, первостепенным для дистанционного мониторинга состояния лесов, является диаметр кроны в лесных культурах, имеющий наибольшую тесноту связи с состоянием насаждения (0,71). Следует отметить, что подобная закономерность наблюдается только в одновозрастных древостоях.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ ФЗУР-2022-0009) «Разработка превентивной технологии контроля лесной пожарной опасности с использованием дистанционного зондирования с помощью БПЛА».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буряк, Л.В. К оценке пожарной опасности и ее динамики / Л.В. Буряк, Е.А. Кукавская, В.А. Иванов // Лесное хозяйство. – 2014. – № 2. – С. 33–36.

2. Валендик, Э.Н. Влияние низовых пожаров на устойчивость хвойных пород / Э.Н. Валендик, А.И. Сухинин, И.В. Косов. – Красноярск : Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2006. – 95 с.

3. Волокитина, А.В. Региональные шкалы оценки пожарной опасности в лесу: усовершенствованная методика составления / А.В. Волокитина, Т.М. Софронова, М.А. Корец // Сибирский лесной журнал. – 2017. – № 2. – С. 52–61.

4. Воздействие пожаров на компоненты среднетаежных сосняков Сибири / Г.А. Иванова, С.Г. Конард, Д.Д. Макрае [и др.], отв. ред. М.Д. Евдокименко ; рец.: Ю.А. Андреев, Э.Ф. Ведрова, С.К. Фарбер ; Российская Академия наук, Сибирское отделение, Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. – Новосибирск : Наука, 2014. – 232 с. – ISBN 978-5-02-019163-1 (в пер.).

5. Доспехов, Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) : учебник. М. : Колос, 2011. – 547 с.– ISBN 978-5-458-23540-2.

6. Евдокименко, М.Д. Реакция сосны на огневые воздействия в условиях Забайкалья / М.Д. Евдокименко // Лесоведение. – 1986. − № 6. − С. 46−53.

7. Ермоленко, А.А. Анализ состояния и причин изменения лесистости в Центральном федеральном округе: сложившаяся практика и возможные решения / А.А. Ермоленко. – DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2018.4.06 // Лесохоз. информация : электрон. сетевой журн. – 2018. – № 4. – С. 55–65

8. Леса и лесные ресурсы Российской Федерации. Рослесхоз: офиц. сайт. / Федеральное агенство лесного хозяйства. – URL: http://www.rosleshoz.gov.ru (дата обращения: 07.11.2022).

9. Лозовой, А.Д. Лесная вспомогательная книжка : лесотаксационный справ. работнику лесного хозяйства Центр.-Чернозем. региона России / А.Д. Лозовой. Изд. 3-е. – Воронеж: ВГЛТА, 2004. – 390 с.

10. Мелехов, И.С. Лесоведение : учебник для вузов / И.С. Мелехов. – 3-е изд., ст. – М. : МГЮЛ, 2004. – 398 с.

11. Миронов, М.П. Влияние сезона года и таксационных показателей насаждений на показатели фактической горимости лесов / М.П. Миронов, А.Е. Дубинин // Устойчивому развитию АПК – научное обеспечение. Ижевск : РИО ФГОУ ВПО ИЖ ГСХА, 2004. – С. 288–297.

12. Мокеев, Г.А. К вопросу о планировании противопожарных мероприятий в лесах России / Г.А. Мокеев // Вестник с.-х. наук. – 2008. – № 5. – С. 28–33.

13. Об утверждении методических указаний по количественному определению объёма поглощения парниковых газов : Распоряжение Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Минприроды России) от 30.06.2017 г. N 20 р., Москва.

14. Об утверждении методических рекомендаций по проведению государственной инвентаризации лесов : Приказ Рослесхоза от 10 ноября 2011 года № 472 (с изм. на 15 марта 2018 года) Москва : утвержденный приказом Федерального агентства лесного хозяйства от 06.06.2011 регистрационный № 207 // Российская газета. – 2011. – 10 августа (№ 45233). – 24 полоса.

15. Об утверждении Лесоустроительной инструкции : Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Минприроды России) от 29 марта 2018 г. N 122 (ред. от 12 мая 2020 г.) Москва : зарегистрирован в Минюсте РФ 20 апреля 2018 г., регистрационный номер N 50859.

16. Об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды : Приказ Федерального агентства лесного хозяйства (Рослесхоз России) от 5 июля 2011 г. N 287 г., Москва : зарегистрирован в Минюсте РФ 17 августа 2011 г., регистрационный N 21649 // Российская газета. – 2001. – № 186.

17. Об утверждении Порядка проведения государственной инвентаризаций лесов ; Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Минприроды России) от 27 сентября 2021 г. N 686 г., Москва : зарегистрирован в Минюсте РФ 30 декабря 2021 г., регистрационный N 66748.

18. Об утверждении Правил пожарной безопасности в лесах : Постановление Правительства Российской Федерации от 7 октября 2020 г. N 1614 г., Москва // КонсультантПлюс : офиц. Сайт / Компания «КонсультантПлюс». – Электрон. справ. правовая система. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_364560/ (дата обращения 07.11.2022).

19. ОСТ 56 103-98. Охрана лесов от пожаров. Противопожарные разрывы и минерализованные полосы. Критерии качества и оценка состояния: стандарт отрасли: официальное: утвержден и введен в действие приказом Рослесхоза от 24 февраля 1998 г. № 38: введен впервые : дата введения 1998-07.01 / разработан Федеральной службой лесного хозяйства России. – М. : Стандартинформ, 1995. – 150 с.

20. ОСТ 56-69-83 Площади пробные лесоустроительные. Методы закладки. Введен 01.01.84. – М. : Стандартинформ, 1984. – 59 с.

21. Перевозникова, В.Д. Видовой состав и структура живого напочвенного покрова в сосняках после контролируемых выжиганий / В.Д. Перевозникова, Г.А. Иванова, В.А. Иванов, Н.М. Ковалева, С.Г. Конард // Сибирский экологический журнал. – 2005.– № 1. – С. 135–141.

22. Правила санитарной безопасности в лесах : утв. постановление Правительства Российской Федерации от 9 декабря 2020 года № 2047 : офиц. сайт / Официальный интернет-портал правовой информации. – Электрон. справ. правовая система. - URL: https://docs.cntd.ru/document/573053313 (дата обращения 05.11.2022).

23. Российская Федерация. Законы. Лесной кодекс Российской Федерации : федер. закон от 04.12.2006 № 200-ФЗ : измен. и доп. 01.03.2022 : принят Гос. думой 8 ноября 2006 г. : одобрен Советом Федерации 24 нояб. 2006 г. // КонсультантПлюс : офиц. Сайт / Компания «КонсультантПлюс». – Электрон. справ. правовая система. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/ (дата обращения 07.11.2022).

24. Софронов, М.А. Управление огнем. Часть 1. Горюче-пожарная опасность в лесах / М.А. Софронов, А.В. Волокитина, Т.М. Софронова. – Красноярск : СибГТУ, 2015. – 144 с.

25. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года (распоряжение Правительства Российской Федерации от 11 февраля 2021 года № 312-р). – URL: https://docs.cntd.ru/document/573658653 (дата обращения 05.11.2022).

26. Указ Губернатора Воронежской области : утв. Губернатором Воронежской области от 15.11.2021 г. N 200-у. : офиц. сайт / Официальный интернет-портал правовой информации. – Электрон. справ. правовая система. – URL: https://docs.cntd.ru/document/573053313 (дата обращения 05.11.2022).

27. Усеня, В.В. Исследование запасов горючих материалов в сосновых насаждениях и борьба с лесными пожарами / В.В. Усеня, В.Г. Тищенко // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – Минск : БГУ, 2001. – С. 149–150.

28. Феклистов, П.А. Биологические и экологические особенности произрастания сосны в северной подзоне европейской тайги / П.А. Феклистов, В.Н. Евдокимов, В.М. Барзут. – Архангельск : ИПЦ АГТУ, 1997. – 140 с.

29. Фуряев, В.В. Пожароустойчивость сосновых лесов / В.В. Фуряев, В.И. Заблоцкий, В.А. Черных. – Новосибирск : Наука, 2005. – 184 с.

30. Чумаченко, С.И. Природная пожарная опасность смешанных лесных насаждений. Модельный подход / С.И. Чумаченко // Лесной вестник. – 2013. – № 7. – С. 72–74.

31. Швиденко, А.З. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии : нормативно-справочные материалы / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепаченко, С. Нильсон, Ю.И. Булуй. – Изд. 2-е, доп. М. : Изд-во: Московская типография № 6, 2008. – 886 с.

32. Albrich, K. Simulating forest resilience: a review / K. Albrich, W. Rammer, M.G. Turner, Z., Ratajczak, K.H. Braziunas, W.D. Hansen, R. Seidl // Global Ecol. Biogeogr, 2020. – Vol. 29. – P. 2082–2096.

33. Braziunas, K.H. Looking beyond the mean: drivers of variability in postfire stand development of conifers in Greater Yellowstone / K.H. Braziunas, W.D. Hansen, R. Seidl, W. Rammer, M.G. Turner // For. Ecol. Manag, 2018. – Vol. 430. – P. 460–471.

34. Gill, N.S. Limitations to propagule dispersal will constrain postfire recovery of plants and fungi in western coniferous forests / N.S. Gill, M.G. Turner, C.D. Brown, S.I. Glassman, S.L. Haire, W.D. Hansen, E.R. Pansing, S.B. St. Clair, D.F. Tomback // BioScience, 2022. – Biab. P. 139/

35. Hansen, W.D. An alternate vegetation type proves resilient and persists for decades following forest conversion in the North American boreal biome / W.D. Hansen, R. Fitzsimmons, J. Olnes, A.P. Williams // J. Ecol, 2021. – Vol.109. – P. 85–98.

36. Kelly, R. Recent burning of boreal forests exceeds fire regime limits of the past 10,000 years / R. Kelly, M.L. Chipman, P.E. Higuera, I. Stefanova, L.B. Brubaker, F.S. Hu // Proc. Natl. Acad. Sci, 2013. – Vol. 110. – P. 13055–13060.

37. Miller, J.D. Quantitative evidence for increasing forest fire severity in the Sierra Nevada and southern Cascade Mountains, California and Nevada, USA / J.D. Miller, H.D. Safford, M. Crimmins, A.E. Thode // Ecosystems, 2009. – Vol.12. – P. 16–32.

38. Pan, Y. Age structure and disturbance legacy of North American forests / Y. Pan, J.M. Chen, R. Birdsey, K. McCullough, L. He, F. Deng // Biogeosciences, 2011. – Vol. 8. – P. 715–732.

39. Prichard, S.J. Tamm review: shifting global fire regimes: lessons from reburns and research needs / S.J. Prichard, C.S. Stevens-Rumann, P.F. Hessburg // For. Ecol. Manag, 2017. – Vol. 396. – P. 217–233.

REFERENCES

1. Buryak L.V. K otsenke pozharnoj opasnosti i ee dinamiki. *Lesnoe khozyajstvo*. 2014, no. 2, pp. 33–36. (In Russian)

2. Valendik Eh.N. Vliyanie nizovykh pozharov na ustojchivost' khvojnykh porod. Krasnoyarsk, 2006, 95 p. (In Russian)

3. Volokitina A.V. Regional'nye shkaly otsenki pozharnoj opasnosti v lesu: usovershenstvovannaya metodika sostavleniya. *Sibirskij lesnoj zhurnal*, 2017, no. 2, pp. 52–61. (In Russian)

4. Ivanova G.A., Konard S.G., Makrae D.D. [i dr.]. Vozdejstvie pozharov na komponenty srednetaezhnykh sosnyakov Sibiri. Novosibirsk, 2014, 232 p. (In Russian)

5. Dospekhov B.A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoj obrabotki rezul'tatov issledovanij): uchebnik. Moskow. 2011, 547 p. ISBN 978-5-458-23540-2. (In Russian)

6. Evdokimenko M.D. Reaktsiya sosny na ognevye vozdejstviya v usloviyakh Zabajkal'ya. *Lesovedenie*. 1986, no. 6, pp. 46−53. (In Russian)

7. Ermolenko, A.A. Analiz sostoyaniya i prichin izmeneniya lesistosti v Tsentral'nom federal'nom okruge: slozhivshayasya praktika i vozmozhnye resheniya. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2018.4.06. *Lesokhoz. informatsiya: ehlektron. setevoj zhurn.* 2018, no. 4, pp. 55–65 (In Russian)

8. Lesa i lesnye resursy Rossijskoj Federacii. Rosleshoz: ofic. sajt. / Federal'noe agenstvo lesnogo hozjajstva. – URL: http://www.rosleshoz.gov.ru (data obrashhenija: 07.11.2022). (In Russian)

9. Lozovoj A.D. Lesnaya vspomogatel'naya knizhka. lesotaksatsionnyj sprav. rabotniku lesnogo khozyajstva Tsentr.-Chernozem. regiona Rossii. Izd. 3-e. Voronezh. 2004, 390 p. (In Russian)

10. Melekhov I.S. Lesovedenie: uchebnik dlya vuzov. 3-e izd., st. Moskow. 2004, 398 p. (In Russian)

11. Mironov M.P. Vliyanie sezona goda i taksatsionnykh pokazatelej nasazhdenij na pokazateli fakticheskoj gorimosti lesov. *Ustojchivomu razvitiyu APK – nauchnoe obespechenie.* Izhevsk, 2004, pp. 288–297. (In Russian)

12. Mokeev G.A. K voprosu o planirovanii protivopozharnykh meropriyatij v lesakh Rossii. *Vestnik s.-kh. nauk*. 2008, no. 5, pp. 28–33. (In Russian)

13. Ob utverzhdenii metodicheskih ukazanij po kolichestvennomu opredeleniju ob#joma pogloshhenija parnikovyh gazov : Rasporjazhenie Ministerstva prirodnyh resursov i jekologii Rossijskoj Federacii (Minprirody Rossii) ot 30.06.2017 g. no. 20 r., Moscow. (In Russian)

14. Ob utverzhdenii metodicheskih rekomendacij po provedeniju gosudarstvennoj inventarizacii lesov : Prikaz Rosleshoza ot 10 nojabrja 2011 goda no. 472 (s izm. na 15 marta 2018 goda) Moskva : utverzhdennyj prikazom Federal'nogo agentstva lesnogo hozjajstva ot 06.06.2011 registracionnyj № 207 // *Rossijskaja gazeta*. – 2011. – 10 avgusta (№ 45233). – 24 polosa. (In Russian)

15. Ob utverzhdenii Lesoustroitel'noj instrukcii : Prikaz Ministerstva prirodnyh resursov i jekologii Rossijskoj Federacii (Minprirody Rossii) ot 29 marta 2018 g. № 122 (red. ot 12 maja 2020 g.) Moskva : zaregistrirovan v Minjuste RF 20 aprelja 2018 g., registracionnyj nomer № 50859. (In Russian)

16. Ob utverzhdenii klassifikacii prirodnoj pozharnoj opasnosti lesov i klassifikacii pozharnoj opasnosti v lesah v zavisimosti ot uslovij pogody : Prikaz Federal'nogo agentstva lesnogo hozjajstva (Rosleshoz Rossii) ot 5 ijulja 2011 g. № 287 Moskva : zaregistrirovan v Minjuste RF 17 avgusta 2011 g., registracionnyj № 21649. *Rossijskaja gazeta*, 2001, no. 186. (In Russian)

17. Ob utverzhdenii Porjadka provedenija gosudarstvennoj inventarizacij lesov ; Prikaz Ministerstva prirodnyh resursov i jekologii Rossijskoj Federacii (Minprirody Rossii) ot 27 sentjabrja 2021 g. N 686 g., Moskva : zaregistrirovan v Minjuste RF 30 dekabrja 2021 g., registracionnyj N 66748. (In Russian)

18. Ob utverzhdenii Pravil pozharnoj bezopasnosti v lesah : Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 7 oktjabrja 2020 g. N 1614 g., Moskva // Konsul'tantPljus : ofic. Sajt / Kompanija «Konsul'tantPljus». – Jelektron. sprav. pravovaja sistema. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_364560/ (data obrashhenija 07.11.2022). (In Russian)

19. OST 56 103-98. Okhrana lesov ot pozharov. Protivopozharnye razryvy i mineralizovannye polosy. Kriterii kachestva i otsenka sostoyaniya: standart otrasli: ofitsial'noe: utverzhden i vveden v dejstvie prikazom Rosleskhoza ot 24 fevralya 1998 g. № 38: vveden vpervye : data vvedeniya 1998-07.01, razrabotan Federal'noj sluzhboj lesnogo khozyajstva Rossii. Moskow, 1995, 150 p. (In Russian)

20. OST 56-69-83 Ploshhadi probnye lesoustroitel'nye. Metody zakladki. Vveden 01.01.84. – M. : Standartinform, 1984. – 59 p. (In Russian)

21. Perevoznikova V.D., Ivanova G.A., Ivanov V.A., Kovaleva N.M., Konard S.G. Vidovoj sostav i struktura zhivogo napochvennogo pokrova v sosnjakah posle kontroliruemyh vyzhiganij. *Sibirskij jekologicheskij zhurnal*. 2005, no. 1, pp. 135–141. (In Russian)

22. Pravila sanitarnoj bezopasnosti v lesah : utv. postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 9 dekabrja 2020 goda № 2047. *Oficial'nyj internet-portal pravovoj informacii. Jelektron. sprav. pravovaja sistema.* URL: https://docs.cntd.ru/document/573053313 (data obrashhenija 05.11.2022). (In Russian)

23. Rossijskaja Federacija. Zakony. Lesnoj kodeks Rossijskoj Federacii : feder. zakon ot 04.12.2006 № 200-FZ : izmen. i dop. 01.03.2022 : prinjat Gos. dumoj 8 nojab. 2006 g. : odobren Sovetom Federacii 24 nojab. 2006 g. *Konsul'tantPljus, ofic. Sajt, Kompanija «Konsul'tantPljus». Jelektron. sprav. pravovaja sistema*. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/ (data obrashhenija 07.11.2022). (In Russian)

24. Sofronov M.A., Volokitina A.V., Sofronova T.M. Upravlenie ognem. Chast' 1. Gorjuche-pozharnaja opasnost' v leash. Krasnojarsk. 2015, 144 p. (In Russian)

25. Strategija razvitija lesnogo kompleksa Rossijskoj Federacii do 2030 goda (rasporjazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 11 fevralja 2021 goda № 312-r). URL: https://docs.cntd.ru/document/573658653 (data obrashhenija 05.11.2022). (In Russian)

26. Ukaz Gubernatora Voronezhskoj oblasti : utv. Gubernatorom Voronezhskoj oblasti ot 15.11.2021 g. N 200-u. : *ofic. Sajt. Oficial'nyj internet-portal pravovoj informacii. Jelektron. sprav. pravovaja sistema*. URL: https://docs.cntd.ru/document/573053313 (data obrashhenija 05.11.2022). (In Russian)

27. Usenja V.V., Tishhenko V.G. Issledovanie zapasov gorjuchih materialov v sosnovyh nasazhdenijah i bor'ba s lesnymi pozharami. *Chrezvychajnye situacii: preduprezhdenie i likvidacija*. Minsk. 2001, pp. 149–150. (In Russian)

28. Feklistov P.A., Evdokimov V.N., Barzut V.M. Biologicheskie i jekologicheskie osobennosti proizrastanija sosny v severnoj podzone evropejskoj tajgi. Arhangel'sk. 1997, 140 p. (In Russian)

29. Furjaev V.V., Zablockij V.I., Chernyh V.A. Pozharoustojchivost' sosnovyh lesov. Novosibirsk. 2005, 184 p. (In Russian)

30. Chumachenko S.I. Prirodnaja pozharnaja opasnost' smeshannyh lesnyh nasazhdenij. Model'nyj podhod. *Lesnoj vestnik*, 2013, no. 7, pp. 72–74. (In Russian)

31. Shvidenko, A.Z., Shhepachenko D.G., Nil'son S., Buluj Ju.I. Tablicy i modeli hoda rosta i produktivnosti nasazhdenij osnovnyh lesoobrazujushhih porod Severnoj Evrazii : normativno-spravochnye materialy. Izd. 2-e, dop. Moskow, 2008, 886 p. (In Russian)

32. Albrich K., Rammer W., Turner M.G., Ratajczak Z., Braziunas K.H., Hansen W.D., Seidl R. Simulating forest resilience: a review. *Global Ecol. Biogeogr.* 2020, no. 29, pp. 2082–2096.

33. Braziunas K.H., Hansen W.D., Seidl R., Rammer W., Turner M.G. Looking beyond the mean: drivers of variability in postfire stand development of conifers in Greater Yellowstone. *For. Ecol. Manag.* 2018, no. 430, pp. 460–471.

34. Gill N.S., Turner M.G., Brown C.D., Glassman S.I., Haire S.L., Hansen W.D., Pansing E.R., St Clair S.B., Tomback D.F. Limitations to propagule dispersal will constrain postfire recovery of plants and fungi in western coniferous forests. *BioScience,* 2022, *biab.* 139 p.

35. Hansen W.D., Fitzsimmons R., Olnes J., Williams A.P. An alternate vegetation type proves resilient and persists for decades following forest conversion in the North American boreal biome. *J. Ecol.* 2021, no. 109, pp. 85–98.

36. Kelly R., Chipman M.L., Higuera P.E., Stefanova I., Brubaker L.B., Hu F.S. Recent burning of boreal forests exceeds fire regime limits of the past 10,000 years. *Proc. Natl. Acad. Sci.,* 2013, no. 110, pp. 13055–13060.

37. Miller J.D., Safford H.D., Crimmins M., Thode A.E. Quantitative evidence for increasing forest fire severity in the Sierra Nevada and southern Cascade Mountains, California and Nevada, USA. *Ecosystems*. 2009, no. 12, pp. 16–32.

38. Pan Y., Chen J.M., Birdsey R., McCullough K., He L., Deng F. Age structure and disturbance legacy of North American forests. *Biogeosciences*, 2011, no. 8, pp. 715–732.

39. Prichard S.J., Stevens-Rumann C.S., Hessburg P.F. Tamm review: shifting global fire regimes: lessons from reburns and research needs. *For. Ecol. Manag.* 2017, no. 396, pp. 217–233.

Статья поступила в редакцию 15.11.2022