

**С.М. Базаров, Ю.И. Беленький, И.В. Бачериков, Д.А. Ильюшенко,
М.В. Базарова, Нгуен Фук Зюн**

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕСОПОЛЬЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ НЕСПЛОШНЫХ РУБОК РАСТУЩИХ НАСАЖДЕНИЙ

Введение. В настоящее время непрерывно возрастает все увеличивающаяся потребность в производстве возобновляемых энергоресурсов и сохранении природной среды. Эта проблема, в известной мере, решается странами путем искусственного выращивания высокопродуктивных лесных монокультур с коротким оборотом рубок, когда за небольшой промежуток времени получается большое количество биомассы как энергетического ресурса.

Лес является сложной биологической системой, в которой происходят процессы роста и гибели деревьев. Это обстоятельство фиксируется таксационными таблицами [Таблицы, 1976; Ву Тен Хинь, 2003], анализ которых позволяет раскрыть динамическую картину формирования биомассы лесных насаждений как суперпозицию процессов отпада деревьев и их роста.

Цель исследования – построение дискретной модели сплошных рубок по классам возрастов, определение возможного суммарного вырубемого объема древесины для различных высокопродуктивных пород, построение обобщенной модели динамики потребления запасов биомассы с учетом роста и отпада деревьев, а также представление структурно устойчивой осциллирующей системы «лес–заготовитель» как самоорганизующейся с позиции известной экологической модели «жертва–хищник» [Вольтера, 1976; Рабинович и др., 1984]

Методика исследования. Несплошные рубки являются перспективными и обеспечивают одновременно непрерывное лесопользование и непрерывное выращивание насаждений на занимаемых лесом землях.

Ведущим подходом к исследованию данной проблемы становится раскрытие динамической картины формирования запасов биомассы при системной связности процессов роста и отпада деревьев на основе построения и решения кинетических уравнений и их анализа.

Результаты исследования. Лесотаксационные таблицы (табл. 1–3) роста насаждений различных пород по классам возрастов представлены далее [Ву Тен Хинь, 2003].

Содержание данных таблиц проиллюстрировано графиками (рис. 1–6), которые раскрывают дискретную картину по классам возрастов динамику развития насаждений как суперпозицию процессов роста и отпада деревьев.

Таблица 1

Ход роста сосновых насаждений сосны
The course of growth of pine plantations of pine

Возраст, лет	Число стволов	Запас на 1 га, м ³	Число деревьев отпада	Запас, м ³	Запас отпада, %	Остальной запас на 1 га
1	1850	0,00				
3	1717	0,77				
5	1594	9,67				
10	1323	108,85	225	18,49	16,99	90,36
15	1098	284,59	187	48,34	16,99	236,25
20	912	466,82	155	79,29	16,99	387,53
25	757	615,93	129	104,62	16,99	511,32
30	628	719,23	107	122,16	16,99	597,07
35	522	777,95	89	132,14	16,99	645,82
40	433	799,08	74	136,64	17,10	662,44
45	359	791,10	61	134,42	16,99	656,68
50	298	762,10	298	762,10	100,00	
Итого				1538,19		

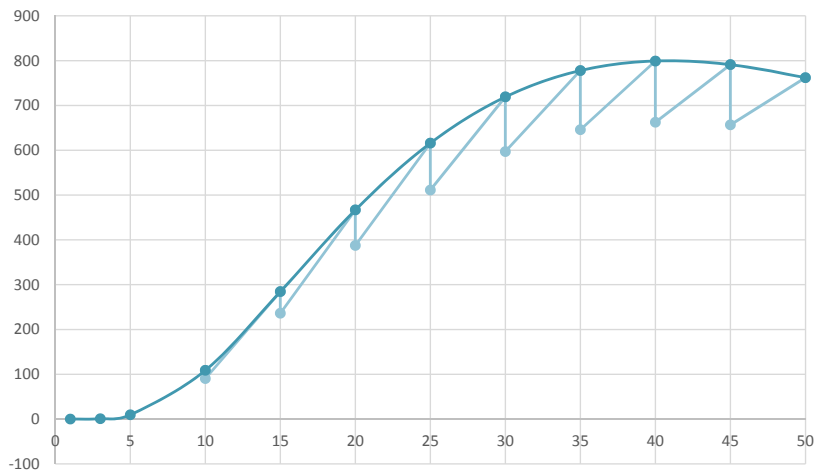


Рис. 1. График динамики роста-гибели запаса сосновых насаждений
 Fig. 1. Graphic of growth-death inventory of pine plantations

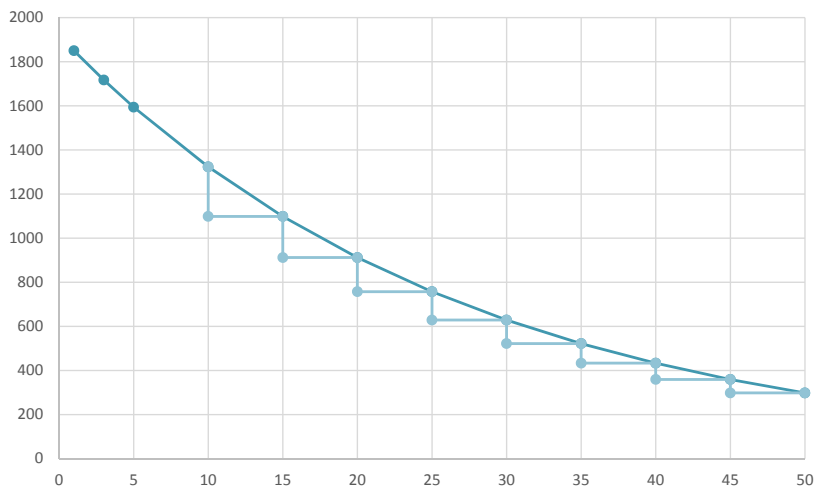


Рис. 2. График динамики числа деревьев сосновых насаждений
 Fig. 2. Graph of number of trees in pine plantations

Таблица 2

Ход роста эвкалиптовых насаждений

The course of growth of eucalyptus trees

Возраст, лет	Число стволов	Запас на 1 га, м ³	Число деревьев отпада	Запас отпада, м ³	Запас отпада, %	Остальной запас на 1 га
1	1518	0,01				
3	1307	2,20				
5	1125	12,66				
10	774	62,89	242	19,640	31,23	43,25
15	532	106,83	166	33,360	31,23	73,47
20	366	127,30	114	39,751	31,23	87,55
25	252	128,09	134	68,047	53,12	60,04
30	118	62,59	46	24,399	38,98	38,19
35	72	46,62	72	46,620	100,00	
Итого				231,817		

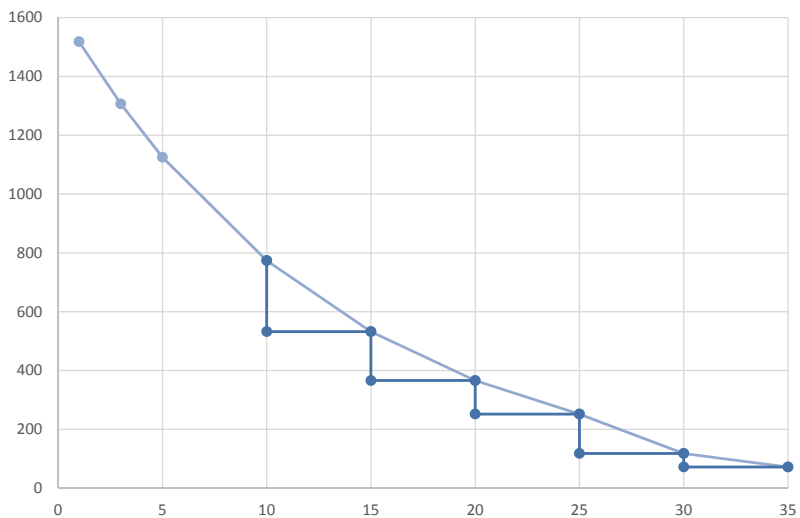


Рис. 3. График динамики числа деревьев эвкалиптовых насаждений
Fig. 3. Graph number of trees in the eucalyptus plantations

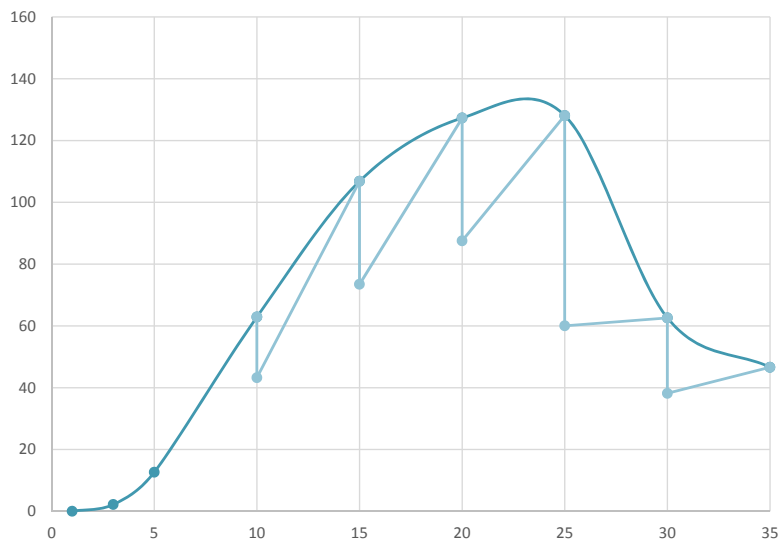


Рис. 4. График динамики роста-гибели запаса эвкалиптовых насаждений
Fig. 4. Graph of growth-death inventory eucalyptus plantations

Таблица 3

Ход роста насаждений акации

The growth course of acacia trees

Возраст, лет	Число стволов	Запас на 1 га, м ³	Число деревьев отпада	Запас отпада, м ³	Запас отпада, %	Остальной запас на 1 га
1	2100	0,01				
3	1722	2,63				
5	1412	14,75				
10	859	62,53	336	24,47	39	38,06
15	523	90,09	205	35,26	39	54,83
20	318	91,72	124	35,82	39	55,90
25	194	79,33	76	31,08	39	48,25
30	118	62,59	118	62,59	100	
Итого				189,22		

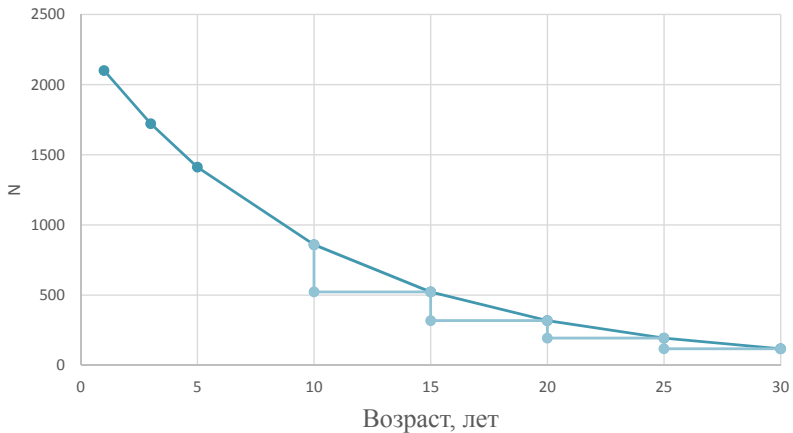


Рис. 5. График динамики числа деревьев насаждений акации

Fig. 5. Graph of the number of trees in plantations of acacia

Данные таблиц роста-гибели насаждений показывают, что запасы отпада по породам составляют: сосновых – 100%, эвкалиптовых – 400%, акациевых – 200%. Это означает, что для быстро растущих насаждений, у которых суммарная величина отпада запаса биомассы в процессе роста существенно превышает его асимптотическое значение, несплошные рубки становятся необходимостью.

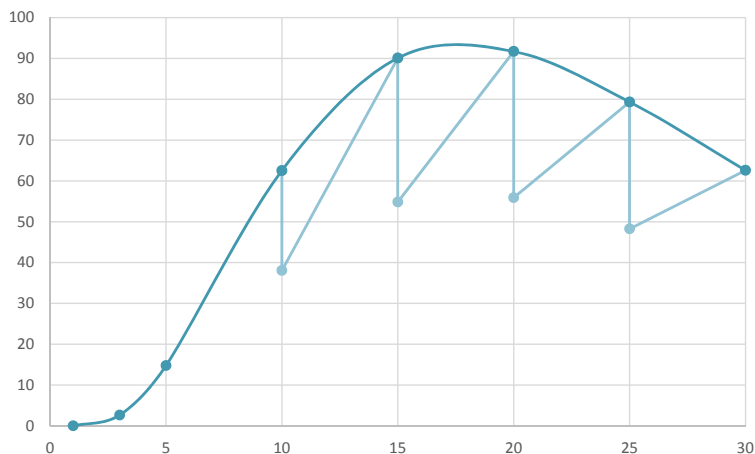


Рис. 6. График динамики роста-гибели запаса насаждений акации
 Fig. 6. Graph of growth-death inventory of plantations of acacia

К несплошным рубкам относятся [Матвейко, 2006]: равномерно-постепенные, длительно-постепенные, группово-выборочные, полосно-постепенные и добровольно-выборочные.

Анализ представленных высокопродуктивных рубок древостоев показал, что для насаждений с коротким оборотом рубок предпочтительной является равномерно-постепенная рубка, при которой вырубка древостоев производится при равномерном прореживании в течение одного класса возраста.

Анализ лесотаксационных таблиц и графиков приводит к следующим основным моментам структуры динамической картины развития запасов биомассы насаждений: начало, рост, асимптотическое значение (далее – старение-гибель), что соответствует типичной фазовой картине жизни природных структур.

Для роста насаждений структурная устойчивость увеличения биомассы может быть представлена кинетическим уравнением [Пригожин, 1985]:

$$dX / dt = k X(N - X) - b X = c X(1 - X/N) - b X = cX - c X^2/N - b X, \quad (1)$$

здесь X – запас, м³/га; N – асимптотическое значение запаса, м³/га; c – потенциальная скорость роста, 1/год; b – потенциальная скорость гибели, 1/год; t – время, год.

Первые два слагаемых определяют скорость роста при ограничении ресурса, а третье – гибель в процессе развития.

Перепишем уравнение (1) в виде

$$dX/dt = pX - cX^2/N,$$

или

$$dx/dt = px(1 - cx). \quad (2)$$

Здесь $p = c - b$, $x = X/N$. Решением уравнения (2) является логистическая кривая

$$x = p [c + p \exp(-pt)]^{-1}, \quad (3)$$

При $b = 0$

$$x = 1 / [1 + \exp(-ct)] \quad (4)$$

логистическая кривая становится суперпозицией двух асимметричных ветвей относительно $x = 1/2$ и соответствующего $t_{1/2}$:

$$\text{при } t > t_{1/2}, \quad x = 1 / [1 + \exp(-c(t - t_{1/2}))],$$

$$\text{при } t_{1/2} > t, \quad x = 1 / [1 + \exp(c(t_{1/2} - t))],$$

при $t_{1/2} = t$ имеет место максимум скорости роста $dx/dt = 1/2 c$.

Структурную устойчивость системы «лес–заготовка» при выборочных и сплошных рубках исследуем как аналогию осциллирующей системы «жертва–хищник» в экологии [Вольтера, 1976; Рабинович и др., 1984]: лес – жертва, хищник – заготовка.

Кинетическую систему уравнений, описывающих динамику сосуществования рассматриваемой системы «лес–заготовка», запишем в виде

$$dX/dt = X(c - mY), \quad (5)$$

$$dY/dt = -Y(g - nX), \quad (6)$$

здесь X – текущий запас леса, м³/га; Y – текущая заготовка леса, м³/га; g – потенциальная скорость уменьшения заготовки, 1/год; m – удельная скорость уменьшения заготовки, га/м³ год; n – удельная скорость роста запаса леса, га/м³ год.

Первые слагаемые в правой части уравнения: Xc – характеризует рост запаса насаждений без заготовки, Yg – определяет уменьшение объема только заготовки.

Из условий

$$dX/dt = 0, \quad dY/dt = 0$$

состояниям равновесия соответствуют значения

$$Y_0 = c/m, \quad X_0 = g/n. \quad (7)$$

На основании (7) отклонение от равновесного значения запишем в виде

$$X = X_0 + X(t), \quad Y = Y_0 + Y(t) \quad (8)$$

и после линеаризации (5), (6) на основании (8) получим систему кинетических уравнений

$$dX(t) = -m X_0 Y(t) = -(gm/n) Y(t), \quad (9)$$

$$dY(t) = n Y_0 X(t) = (cn/m) X(t). \quad (10)$$

После дифференцирования по времени (9) и (10) с учетом (7) получим уравнения осцилляции для подсистем «лес» и «заготовка» в системе «лес–заготовка»:

$$d^2 X(t) / dt^2 = -(gm/n) dY(t) / dt = -cg X(t) = -\omega^2 X(t), \quad (11)$$

$$d^2 Y(t) / dt^2 = (cn/m) dX(t) / dt = -cg Y(t) = -\omega^2 Y(t). \quad (12)$$

Из уравнений (11) и (12) видим, что частота колебания системы «лес–заготовка»

$$\omega = (cg)^{1/2} \quad (13)$$

и зависит от произведения потенциальных скоростей роста леса и заготовки.

Приведем оценки частот для представленных пород насаждений из условия равенства потенциальных скоростей роста леса и заготовки:

сосна $\omega \sim 0,30$ (1/год), эвкалипт $\omega \sim 0,75$ (1/год), акация $\omega \sim 0,38$ (1/год).

Выводы. Выращивание энергетических насаждений с коротким оборотом рубки в известной мере решает проблему получения возобновляемых энергоресурсов и экологической стабилизации природной среды. Анализ лесотаксационных таблиц быстрорастущих насаждений показывает, что суммарный объем отпада биомассы в процессе роста может равняться (сосна) или превосходить (эвкалипт, акация) асимптотическое значение объема запаса, соответствующее спелому состоянию. Поэтому несплошные рубки по классам возрастов в сочетании со сплошными рубками спелых древостоев обеспечивают получение максимально возможного объема биомассы выращиваемых насаждений.

Анализ динамического состояния системы «лес–заготовка» с позиции решения кинетических уравнений устойчивости экологической модели «зайцы–лисы» (зайцы – лес, лисы – заготовка) указывает на возможность устойчивого осциллирующего состояния лесопользования при естественном возобновлении ресурсов. В этом случае принцип гармонии природных структур реализуется естественным образом.

Библиографический список.

- Лесотаксационные таблицы. Петрозаводск: Институт леса КФ АН СССР, 1978. 33 с.
- Ву Тен Хинь*. Производительность леса. Вьетнам: ЛТУ, 2003.
- Вольтера В.* Математическая теория борьбы за существование. М.: Наука, 1976. 434 с.
- Рабирович М.И., Трубецков Д.И.* Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984. 432 с.
- Пригожин И.* От существующего к возникающему. М.: Наука, 1985. 328 с.
- Матвейко А.П.* Технология и оборудование лесозаготовительного производства. Минск: Техноперспектива, 2006. 447 с.

References

- Forest mensuration tables. Petrozavodsk: Forest Institute of the USSR Academy of Sciences, 1978. 33 p.
- Woo Ten Khin*. *Proizvoditel'nost' lesa*. V'etnam: LTU, 2003.
- Volterra V.* *Mathematical theory of struggle for existence*. Moscow: Science, 1976. 434 p.
- Rabinovich M.I., Trubetskov D.I.* *Introduction to the theory of oscillations and waves*. Moscow: Science, 1984. 432 p.
- Prigozhin I.* *From existing to emerging*. Moscow: Science, 1985. 328 p.
- Matveyko A.P.* *technologies and equipment of timber production*. Minsk: Theperspective, 2006. 447 p.

Материал поступил в редакцию 07.05.2018 г.

Базаров С.М., Беленький Ю.И., Бачериков И.В., Ильюшенко Д.А., Базарова М.В., Нгуен Фук Зюн. Повышение эффективности лесопользования на основе оптимизации несплошных рубок растущих насаждений // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. Вып. 226. С. 55–65. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.226.55-65

В результате анализа динамических таблиц роста высокопродуктивных сосновых, эвкалиптовых и акациевых насаждений с достаточно коротким оборотом рубок установлено, что в процессе роста древостоев общий объем уменьшения биомассы в результате естественного отпада деревьев равен (сосна) или превосходит (эвкалипт, акация) асимптотическое значение, соответствующее спелому состоянию. Поэтому равномерно-постепенные рубки древостоев по классам возрастов в сочетании со сплошными рубками спелых древостоев обеспечивают получение максимально возможного объема биомассы выращиваемых насаждений. Анализ динамического состояния системы «лес-заготовка» с позиции решения кинетических уравнений экологической модели «зайцы-лисы» (зайцы – лес, лисы – заготовка) указывает на возможность

устойчивого осциллирующего состояния лесопользования при естественном возобновлении ресурсов. В результате решения кинетических уравнений становятся возможными определение частоты устойчивых осцилляций системы «лес–заготовка» (решение прямой задачи) и реализация принципа гармонии природных и техногенных систем. Здесь процесс заготовки осуществляется несплошными (равномерно-постепенными) рубками, роль класса возрастов выполняет период колебания, соответствующий определяемой частоте. Данный подход предполагает также решение обратной задачи: при выбранных частоте устойчивых осцилляций системы и динамике роста насаждений – определение соответствующих параметров заготовки.

Ключевые слова: частота, класс возраста, система, устойчивость, отпад.

Bazarov S.M., Beleniy Yu.I., Bacherikov I.V., Ilyushenko D.A., Bazarova M.V., Nguen Phuc Sue. Improving the efficiency of forest management based on the optimization of non-continuous felling of growing plantations. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2019, is. 226, pp. 55–65 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2019.226.55-65

Analysis of the dynamic state of the system «forest–harvesting» from the standpoint of solving the kinetic equations of the ecological model «hares–foxes» (hares – forest, foxes – harvesting) indicates the possibility of a sustainable oscillating state of forest management with the natural renewal of resources. As a result of the kinetic equations solution it becomes possible to determine the frequency of stable oscillations of the forest-harvesting system (direct problem solution) and to realize the principle of natural and man-made systems harmony. Here the process of harvesting is carried out by non-flat (evenly-gradual) felling, the role of the age class performs the period of oscillation corresponding to the determined frequency. With this approach, it is possible to formulate the same inverse problem: the chosen frequency of stable oscillations of the system and the growth dynamics of plantings to determine the appropriate parameters of the work piece.

Key words: frequency, age class, system, stability, drop.

БАЗАРОВ Сергей Михайлович – профессор кафедры технологических процессов и машин лесного комплекса ФГБОУ «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», доктор технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: s.bazarow@yandex.ru

BAZAROV Sergey M. – DSc (Technical), Professor of «Technological processes and machines forest complex» department, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: s.bazarow@yandex.ru

БЕЛЕНЬКИЙ Юрий Иванович – ректор ФГБОУ «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», доктор технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия.

BELENKIY Yuri I. – DSc (Technical), Rector of St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia.

БАЧЕРИКОВ Иван Викторович – ФГБОУ «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», кандидат технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия.

BACHERIKOV Ivan V. – PhD (Technical), St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia.

ИЛЮШЕНКО Дмитрий Александрович – доцент кафедры технологических процессов и машин лесного комплекса ФГБОУ «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», кандидат технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия.

ILYUSHENKO Dmitrii A. – PhD (Technical), Associate Professor of «Technological processes and machines forest complex» department, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia.

БАЗАРОВА Мария Владимировна – аспирант кафедры технологических процессов и машин лесного комплекса ФГБОУ «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова».

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия.

BAZAROVA Maria V. – PhD student of «Technological processes and machines forest complex» department, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia.

НГУЭН Фук Зюн – аспирант кафедры технологических процессов и машин лесного комплекса ФГБОУ «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова».

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия.

NGUYEN Phuc Sue – PhD student of «Technological processes and machines forest complex» department, St.Peterburg Stage forestry engineering university named after S.M. Kirov.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia.