

## Проведение многофакторного эксперимента для определения производительности системы лесозаготовительных машин

Н.А. Романова<sup>а</sup>, А.В. Баранов<sup>б</sup>

Дальневосточный государственный аграрный университет, ул. Ленина 180, Благовещенск, Россия

<sup>а</sup>2zydfhz@mail.ru, <sup>б</sup>baranovmex@mail.ru

Статья поступила 12.02.2016, принята 21.03.2016

*В статье рассмотрены системы машин для заготовки древесины в условиях Амурской области. Исследованы факторы, влияющие на производительность данных машин. Изучена плотность древесины лиственницы по районам Амурской области. Выявлено, что мощность машины зависит от породы, плотности и влажности древесины. Для определения влияния плотности древесины на мощность машин при ее пилении использовались образцы лиственницы оптимального для эксплуатационной рубки возраста. Лабораторным путем была определена затрачиваемая мощность при пилении древесины лиственницы, произрастающей в разных районах Амурской области, — 2 870 – 4 000 Вт. Исходя из анализа факторов, влияющих на производительность системы лесозаготовительных машин, были выбраны варьируемые факторы эксперимента, а также пределы их варьирования. Все факторы, формирующие процесс экспериментальных исследований, изменялись одновременно, по определенным зависимостям, а конечным результатом проведения многофакторного эксперимента стала математическая модель сменной производительности системы машин. Построено уравнение регрессии в кодированном виде, получен вид обобщенной формулы зависимости производительности от мощности пиления, плотности и влажности древесины лиственницы. Сечение поверхности отклика производительности в зависимости от мощности и плотности древесины (при зафиксированной на нулевом уровне влажности  $W = 46\%$ ) наглядно показало, что максимальное значение производительности достигается при следующих значениях факторов: плотность древесины — от 600 до 800 кг/м<sup>3</sup>, мощность — от 3 160 до 3 600 Вт.*

**Ключевые слова:** производительность; система лесозаготовительных машин; плотность; мощность.

## Multivariable experiment for testing the productivity of the system of wood harvesting machines

N.A. Romanova<sup>а</sup>, A.V. Baranov<sup>б</sup>

Far Eastern State Agrarian University; 180, Lenin St., Blagoveshchensk, Russia

<sup>а</sup>2zydfhz@mail.ru, <sup>б</sup>baranovmex@mail.ru

Received 12.02.2016, accepted 21.03.2016

*The article examines systems of machines for wood harvesting under the conditions of Amurskaya oblast. Factors influencing the productivity of these systems of machines have been investigated. The wood density for larch has been studied in various districts of Amurskaya oblast. It has been found out that machine capacity depends on wood breed, density and humidity. To determine the influence of the wood density on the machine capacity when sawing, the samples of larch have been used. The samples used have been of suitable age for operating harvesting. It has been determined in the laboratory that the expended machine capacity, when sawing the larch growing in different districts of Amurskaya oblast, is 2,870-4,000 Wt. According to the analysis of the factors influencing the productivity of the system of wood harvesting machines, variable experimental factors have been chosen, as well as their limits. All the factors, forming the process of experimental research, have changed simultaneously on certain dependences, and the mathematical model of the shifting productivity of the system of machines has become the final result of the multivariable experiment. Regression equation has been built in the encoded kind. Thus, the generalized formula has been received for productivity dependence on larch wood sawing capacity, density and humidity. The section of productivity response surface, depending on wood sawing capacity and density (under humidity fixed at zero level  $W = 46\%$ ), has showed evidently that the maximum productivity value can be reached under the following factor values: wood density is from 600 to 800 kg/m<sup>3</sup>, capacity is from 3,160 to 3,600 Wt.*

**Key words:** productivity; system of tree felling machines; wood density; capacity.

### Введение

На сегодняшний день системы лесозаготовительных машин по качественному и количественному уровню представляют собой разрозненную картину. При анализе лесозаготовительных предприятий, работающих в Амурской области, было выявлено несколько наиболее

часто встречающихся систем машин: бензопила (Husqvarna 576XP) и трелевочный трактор (ТЛТ-100А), харвестер (Timberjack 1270) и форвардер (Timberjack 1110), а также валочно-трелевочная машина (ЛЗ-235, применяется только при сплошных рубках на лесосеках, не обеспеченных подростом). В большей степени

присутствует импортная техника из Японии, Финляндии, Швеции и США. Отечественные лесозаготовительные машины обладают большой энергоемкостью, весом и по своим техническим характеристикам не отвечают физико-механическим свойствам пород древесины, произрастающих в Амурской области [1].

Сменная производительность машин — наиболее важный показатель эффективности лесозаготовки. Основными параметрами условий применения системы машин являются породный состав деревьев, средний объем хлыста в насаждении, распределение деревьев по объему (или диаметру на высоте груди), средняя высота и распределение высот деревьев, плотность древесины, количество деревьев на га, запас леса на га, уклон лесосеки, несущая способность грунта, наличие на лесосеке подроста, камней, ветровальной древесины и т. д. Помимо этого учитываются температурные условия, осадки, направление и сила ветра. Таким образом, необходимо определить плотность разных пород древесины, произрастающих в Амурской области, и, в зависимости от района, выбрать оптимальные системы машин [2].

Факторами, обусловленными технологическими и эксплуатационными показателями, являются виды рубки деревьев, применяемые технологические схемы разработки лесосек и требуемая производительность. Видом рубки определяются способы выполнения технологических операций, их очередность и задаваемые ограничения, а, следовательно, и тип машины [3].

Исследованием взаимодействия лесных машин и оборудования с внешней средой и предметом труда занимались многие ученые [4; 5], тем не менее, вопрос взаимозависимости между плотностью древесины и производительностью лесозаготовительной машины изучен недостаточно.

Для решения данного вопроса необходимо знать плотность древесины, произрастающей в Амурской области, и провести многофакторный эксперимент по ее влиянию на производительность машины.

**Определение плотности древесины по районам области.** Плотность древесины — это один из важных природных показателей, от которого зависит производительность системы машин. Именно плотность определяет требуемую мощность лесозаготовительной машины и бензопилы, а также объем и вес пачки древесины.

Лесистость Амурской области составляет 64,4 %, она изменяется с северо-запада на юг области от 74 до менее 0,3 %. Сеть административных районов, или 78 % территории, относится к многолесным. Для экспериментальных исследований мы брали образцы пород древесины из тех районов, где оценка лесистости более высокая (Тындинский, Зейский, Сковородинский, Магдагачинский, Селемджинский, Шимановский) и районов со средней лесистостью (Свободненский, Бурейский) [6].

Состав древесных пород представлен 20 видами, из которых значительное распространение имеют 8 видов. Из хвойных пород наибольшую площадь занимает лиственница Гмелина — 59,8 %, в том числе в северных районах — до 80 % площади, в западных — 50–60 %, в

центральных и восточных — от 12 до 35 %. По сырьевым запасам лиственница составляет 72,1 % [7].

Лиственница Гмелина (*Larix gmelinii*) — уникальное дерево, растет практически на всех формах рельефа, поднимается в горы до 2–2,5 тыс. м. Чистые древостои образуются только в неблагоприятных для роста других пород условиях: на болотах, промерзших почвах, крутосклонах. На остальных типах почв растет вместе с сосной и березой [7].

По методике [8] были проведены лабораторные исследования и определена зависимость плотности древесины от влажности (рис. 1).

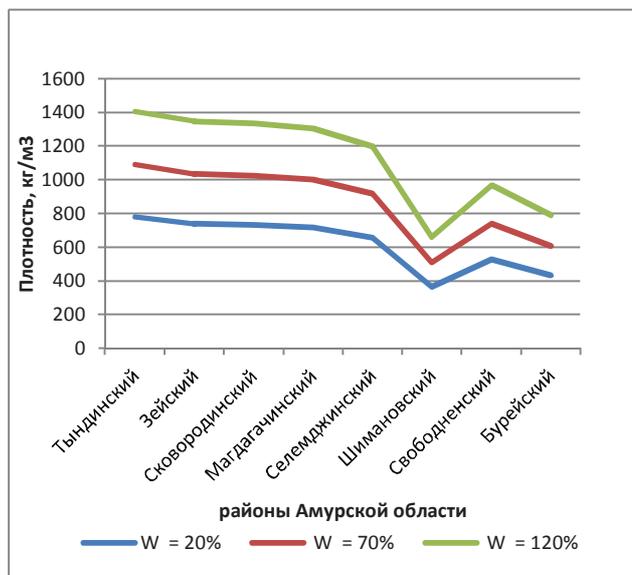


Рис. 1. Зависимость плотности древесины лиственницы от влажности по районам Амурской области

Определим влияние плотности древесины на мощность машин при ее пилении. Для экспериментального исследования использовались образцы лиственницы Гмелина оптимального для эксплуатационной рубки возраста [9]. По методике [9] была определена затрачиваемая мощность при пилении древесины лиственницы, произрастающей в разных районах Амурской области. Мощность варьируется в пределах 2 870 – 4 000 Вт.

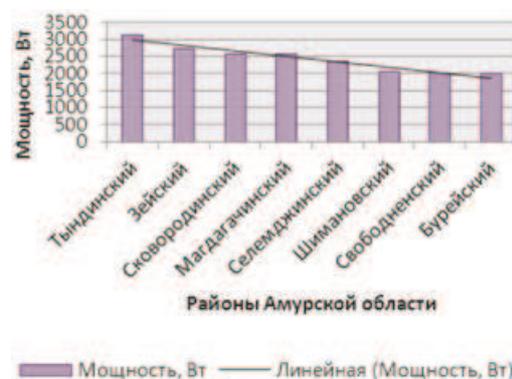


Рис. 2. Зависимость мощности пиления от района произрастания древесины

Анализ полученных данных (рис. 2) показал, что зависимость — линейная,  $y = -157,23x + 3134,4$ , коэффициент детерминации равен 0,927.

Изучив работы ряда авторов (П.Б. Рябухина, А.П. Ковалева, Н.В. Козакова, В.Н. Меньшикова, В.Ф. Кушляева) применительно к поставленным задачам исследования, обобщим формулу производительности и получим общую формулу производительности системы машин [11]:

$$P_{см} = \sum_{i=1}^n P_{см} \quad (1)$$

$$P_{см} = \frac{(T_{см} - t_{n-3})q_{хл}K_uQ}{t_u} = \frac{(T_{см} - t_{n-3})q_{хл}NK_uQ}{a_n a_w a_p v} \quad (2)$$

где  $N$  — потребляемая мощность,  $кВт$ ;  $q_{хл}$  — средний объем хлыста,  $м^3$ ;  $v$  — скорость резания,  $м/с$ ;  $a_n$  — коэффициент, учитывающий плотность породы древесины;  $a_w$  — коэффициент, учитывающий влажность древесины;  $a_p$  — коэффициент, учитывающий затупление режущего инструмента;  $t_{n-3}$  — подготовительно-заключительное время,  $с$ ;  $K_u$  — коэффициент использования номинального объема пачки;  $Q$  — расчетная рейсовая нагрузка трелевочного трактора,  $м^3$ ;  $P_{см}$  — сменная производительность системы машин,  $м^3/см$ .

**Многофакторный эксперимент** широко используется в современной научной деятельности и является эффективным средством обработки и планирования экспериментальных исследований.

Исходя из анализа факторов, влияющих на производительность системы лесозаготовительных машин, были выбраны варьируемые факторы эксперимента, а также пределы их варьирования. Было принято решение о постановке классического эксперимента.

Планированием многофакторного эксперимента называется процедура выбора числа опытов и условий их проведения, необходимых для решения поставленной задачи с требуемой точностью. Все факторы, формирующие процесс экспериментальных исследований изменяются одновременно, по определенным зависимостям, а конечным результатом проведения многофакторного эксперимента будет математическая модель исследуемой функции [12–18].

Результирующая функция — производительность.

Поскольку, согласно предварительным исследованиям, функции отклика должны быть нелинейными, факторы имели три уровня варьирования (табл. 1).

Таблица 1

Факторы и уровни их варьирования

Факторы	Мощность, $N Вт$	Плотность, $\rho кг/м^3$	Влажность, $W \%$
Обозначение	$x_1$	$x_2$	$x_3$
Верхний уровень (+1)	4 000	1 000	80
Основной уровень (0)	3 435	750	46
Нижний уровень (-1)	2 870	500	12

Для нахождения коэффициентов полинома использовался ортогональный центрально-композиционный план второго порядка. Значимость коэффициентов регрессии проверялась по критерию Стьюдента.

В нашем случае, для трех степеней свободы и при 95%-ном уровне значимости,  $t = 2,776445105$ .

Общий вид функции для матрицы ортогонального центрально-композиционного плана второго порядка будет иметь следующий вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (3)$$

Из полученных данных определили, что значимыми коэффициентами являются  $b_0, b_2, b_{123}, b_{11}, b_{22}$ .

Уравнения регрессии в кодированном виде будут выглядеть следующим образом:

$$y_1 = 56,964 - 1,92x_2 - 2,99x_1x_2x_3 - 5,552x_1^2 - 5,07x_2^2 \quad (4)$$

Адекватность полученных уравнений проверялась по критерию Фишера.

В нашем случае, при  $f_1 = 15 - 3 - 1 = 11$ ;  $f_2 = 3 - 1 = 1$  и 95%-ном уровне значимости,  $F = 19,4$ .

Значения выходного параметра дисперсии адекватности, вычисленные по уравнению регрессии, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Расчет дисперсии адекватности

№ опыта	Y		
	$y_u$	$\hat{y}_u$	$(y_u - \hat{y}_u)$
1	51,420	46,214	27,106541243
2	53,370	51,574	3,225511824
3	55,390	65,583	103,891953440
4	53,410	64,532	123,704989748
5	57,450	54,816	6,940273815
6	51,360	53,765	5,784478644
7	55,420	67,774	152,616511335
8	61,280	66,723	29,629948121
9	57,470	60,312	8,078585756
10	52,950	59,036	37,03390952
11	52,100	51,799	0,090485759
12	59,610	67,549	63,02205351
13	61,820	58,342	12,09365388
14	64,080	61,005	9,452995078
15	66,410	59,674	58,71772829

Расчетные значения критерия Фишера составили:  $F = 16,499$ . Значит, полученное уравнение регрессии адекватно описывает процесс в пределах исследуемой области.

При построении поверхностей откликов (программа SigmaPlot v.11.0) варьировались два фактора (рис. 3).

Таким образом, обобщенная формула зависимости производительности от мощности пиления, плотности и влажности древесины лиственницы имеет вид:

$$y = -162,98 + 0,108N + 0,102p - 0,000016N^2 - 0,000073p^2, \quad (5)$$

что нас полностью удовлетворяет.

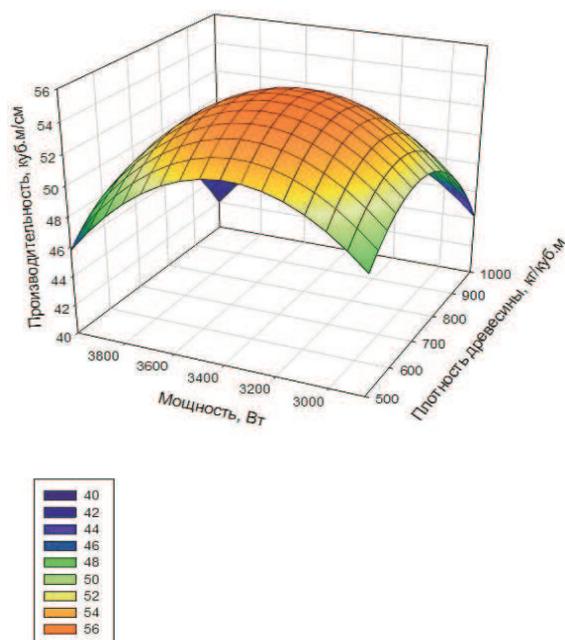


Рис. 3. Поверхность отклика производительности в зависимости от мощности и плотности древесины (при зафиксированной на нулевом уровне влажности  $W = 46\%$ )

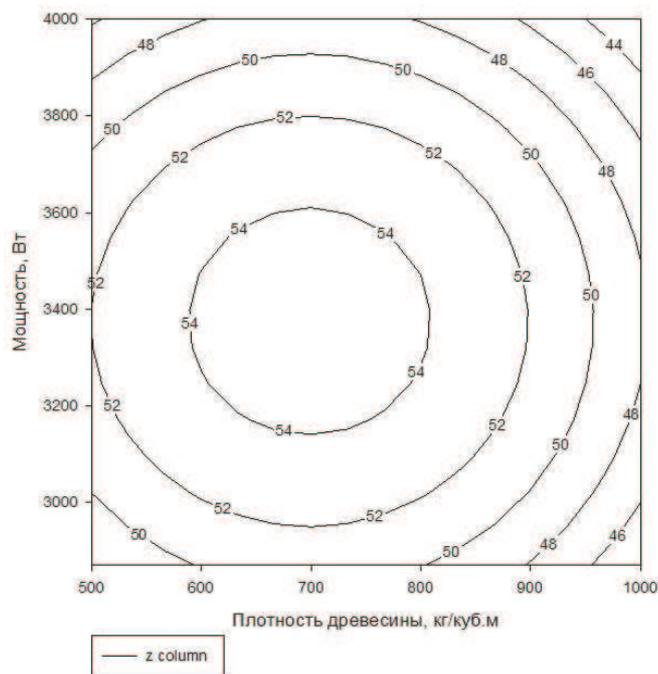


Рис. 4. Сечение поверхности отклика производительности в зависимости от мощности и плотности древесины (при зафиксированной на нулевом уровне влажности  $W = 46\%$ )

В результате проведения факторного эксперимента получены следующие выводы.

1. Плотность древесины лиственницы, произрастающей в Амурской области, возрастает от южных районов к северным и составляет, при влажности  $70\%$ , от  $600$  до  $1\ 000\ \text{кг/м}^3$ .

2. Мощность, полученная лабораторным способом, возрастает при резании более плотной древесины и составляет от  $3\ 160$  до  $3\ 600\ \text{Вт}$ .

3. Максимальное значение производительности достигается при следующих значениях факторов: плотность древесины — от  $600$  до  $800\ \text{кг/м}^3$ , мощность — от  $3\ 160$  до  $3\ 600\ \text{Вт}$ .

#### Литература

1. Костенко Н.А. Влияние плотности древесины на производительность лесозаготовительных систем машин, используемых в Амурской области // Вестн. КрасГАУ. 2012. № 2. С.187-191.
2. Романова Н.А., Баранов А.В. Определение производительности лесозаготовительных машин от плотности древесины // Лесной и химический комплексы проблемы и решения: всероссийская научно-практическая конференция. Красноярск: СибГТУ, 2012. С. 100-103.
3. Григорьев И.О. Системы машин для лесосечных работ // Дерево. гу. Янв.-февр. 2009. С. 44-47.
4. Скурихин В.И., Корпачев В.П. Технология и оборудование лесопромышленных производств. Техника и технология лесосечных работ при заготовке сортиментов. Красноярск: СибГТУ, 2004. 186 с.
5. Кочегаров В.Г., Бит Ю.А., Меньшиков В.Н. Технология и машины лесосечных работ: учебник для вузов. М.: Лесная промышленность, 1990. 392 с.
6. Яборов В.Т. Основы введения лесного хозяйства и организация лесопользования. Благовещенск: Изд-во ДальГАУ, 2005. 284 с.
7. Амурская область. Опыт энциклопедического словаря / науч. ред. В.В. Воробьев, А.П. Деревянко. Хабаровск, 1989. 416 с.
8. Filer A. Larch, its properties and grades. Canada, 1945.
9. Muller L. Western Larch for veneer. Timberman, 1951. Vol. 52. № 8. P. 1.
10. Earle. Christopher J. Larix (larch) description // The Gymnosperm Database. 2011.
11. Givnish T. Adaptive significance of evergreen vs. deciduous leaves: solving the triple paradox // Silva Fennica. 2002. Vol. 36, № 3. P. 703-743.
12. Gernandt D.S., Liston A. Internal transcribed spacer region evolution in Larix and Pseudotsuga (Pinaceae) // American Journal of Botany. 1999. Vol. 86, № 5. P. 711-723.
13. ГОСТ 16483.1 – 84. Древесина. Метод определения плотности. Введ. 13.04.84. М.: Изд-во стандартов, 1999. 5 с.
14. Романова Н.А. Эксплуатационные свойства древесины лиственницы Гмелина // Материалы XIV региональной научно-практической конференции с межрегиональным и международным участием «Молодежь XXI века: шаг в будущее». Благовещенск: ДальГАУ, 2013. С. 147-148.
15. Костенко Н.А. Математическая модель производительности системы лесозаготовительных машин // Взаимодействие научно-образовательных учреждений, бизнеса и власти: региональная научно-техническая конференция. Благовещенск: ДальГАУ, 2011. С. 198-201.
16. Адамов В.Е. Факторный индексный анализ (Методология и проблемы). М.: Статистика, 1977. 200 с.
17. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. изд. 2-е перераб. и доп. М.: Наука, 1976. 136 с.
18. Вучков И., Бояржиева Л., Солаков Е. Прикладной линейный регрессионный анализ / пер. с болгар. Ю.П. Адлера. М.: Финансы и статистика, 1987. 119 с.

19. Дегтярев Д.А., Лонцева И.А. Графоаналитический метод проведения отсеивающего эксперимента // Механизация и электрификация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве: сб. науч. тр. ДальГАУ. Благовещенск: ДальГАУ, 2013. С. 57-60.

20. Шульженко В.Н., Носатова Е.А. Основы научных исследований: моногр. Белгород: БГУС, 2008. 133 с.

21. Харман Г. Современный факторный анализ / под ред. Э.М. Бравермана; пер. с англ. В.Я. Лумельского. М.: Статистика, 1972. 484 с. (Зарубежные статистические исследования).

#### References

1. Kostenko N.A. Influence of closeness of wood on the productivity of the tree felling systems of the machines used in the Amur region // The Bulletin of KrasGAU. 2012. № 2. P. 187-191.

2. Romanova N.A., Baranov A.V. Determination of the productivity of tree felling machines from the closeness of wood // Lesnoi i khimicheskii komplekсы проблемы i resheniya: vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Krasnoyarsk: SibGTU, 2012. P. 100-103.

3. Grigor'ev I.O. Machines systems for logging activities // Derevo. ru. Yanv.-fevr. 2009. P. 44-47.

4. Skurikhin V.I., Korpachev V.P. Technology and equipment of wood industry production. Technique and technology of cutting area works at the purveyance of sortimentes. Krasnoyarsk: SibGTU, 2004. 186 p.

5. Kochegarov V.G., Bit Yu.A., Men'shikov V.N. Technology and machines cutting area work: uchebnik dlya vuzov. M.: Lesnaya promyshlennost', 1990. 392 p.

6. Yaborov V.T. Bases of introduction of forestry and organization of the forest use. Blagoveshchensk: Izd-vo Dal'GAU, 2005. 284 p.

7. Amur region. Experience of the encyclopedic dictionary / nauch. red. V.V. Vorob'ev, A.P. Derevyanko. Khabarovsk, 1989. 416 p.

8. Filer A. Larch, its properties and grades. Canada, 1945.

9. Muller L. Western Larch for veneer. Timberman, 1951. Vol. 52. № 8. P. 1.

10. Earle. Christopher J. Larix (larch) description // The Gymnosperm Database. 2011.

11. Givnish T. Adaptive significance of evergreen vs. deciduous leaves: solving the triple paradox // Silva Fennica. 2002. Vol. 36, № 3. P. 703-743.

12. Gernandt D.S., Liston A. Internal transcribed spacer region evolution in Larix and Pseudotsuga (Pinaceae) // American Journal of Botany. 1999. Vol. 86, № 5. P. 711-723.

13. GOST 16483.1 - 84. Wood. Method of determination of closeness. Vved. 13.04.84. M.: Izd-vo standartov, 1999. 5 p.

14. Romanova N.A. Operational properties of wood of larch Gmelina // Materialy XIV regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhregional'nym i mezhdunarodnym uchastiem «Molodezh' XXI veka: shag v budushchee». Blagoveshchensk: Dal'GAU, 2013. P. 147-148.

15. Kostenko N.A. Mathematical model of the productivity of the system of tree felling machines // Vzaimodeistvie nauchno-obrazovatel'nykh uchrezhdenii, biznesa i vlasti: regional'naya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya. Blagoveshchensk: Dal'GAU, 2011. P. 198-201.

16. Adamov V.E. Factor index analysis (Methodology and problems). M.: Statistika, 1977. 200 p.

17. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. Planning of experiment at the search of optimal terms. M.: Nauka, 1976. 136 p.

18. Vuchkov I., Boyarzhieva L., Solakov E. Applied linear regressive analysis / per. s bolgar. Yu.P. Adlera. M.: Finansy i statistika, 1987. 119 p.

19. Degtyarev D.A., Lontseva I.A. Analytical method of realization of sifting from experiment // Mechanization and electrification of technological processes in agriculture: sb. nauch. tr. Dal'GAU. Blagoveshchensk: Dal'GAU, 2013. P. 57-60.

20. Shul'zhenko V.N., Nosatova E.A. Basic scientific research: monogr. Belgorod: BGUS, 2008. 133 p.

21. Kharman G. Modern factor analysis / pod red. E.M. Braвермана; per. s angl. V.Ya. Lumel'skogo. M.: Statistika, 1972. 484 p. (Zarubezhnye statisticheskie issledovaniya).