

УДК 630*.232.216

UDC 630*.232.216

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ДВУХФАКТОРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ УНИВЕРСАЛЬНОГО ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОРУДИЯ**EXPERIMENTAL TWO-FACTOR OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF THE UNIVERSAL SOIL-PROCESSING INSTRUMENT**Попов Игорь Владимирович
аспирантPopov Igor Vladimirovich
postgraduate student

РИНЦ SPIN-код: 2267-1998

RSCI SPIN-code: 2267-1998

e-mail: ip100001@rambler.rue-mail: ip100001@rambler.ru*ФГБОУ ВО "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова"
г. Воронеж, Российская Федерация**FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russia*

В статье рассмотрена проблема лесовосстановительных работ на сложных для обработки участках, такие как вырубки, овражно-балочные и горные склоны. Для повышения эффективности посадочных работ предложена конструкция универсального почвообрабатывающего орудия (УПО), способного формировать дискретные посадочные места в виде микроповышений в условиях временно переувлажняемых почв или микропонижений (с удалением верхнего слоя) на дренированных почвах с одновременным образованием лунок под посадку лесных культур. Для оценки эффективности его работы был разработан экспериментальный образец УПО и проведены его полевые испытания. В ходе решения задачи двухфакторной оптимизации показателей эффективности работы УПО были выбраны критерии оптимизации, а именно показатели производительности, качества и экономической целесообразности работы орудия, а также варьируемые параметры, оказывающие на них наибольшее влияние. Для выявления аналитических зависимостей между этими параметрами проведена серия из девяти экспериментов, выполнена аппроксимация полученных функций полиномами второго порядка. В результате получены аналитические формулы, характеризующие влияние варьируемых параметров УПО на качество его работы. Также получены графические поверхности отклика и выполнен их визуальный анализ, что позволило определить оптимальные значения варьируемых параметров УПО

The article considers the problem of reforestation on of processing stations, such as coupe, gully and mountain slopes. To improve the efficiency of the planting work proposed a construction of universal soil-processing instrument (USPI), is able to form discrete planting spot in the form of spot mounding in conditions temporarily humid soil or spot area (with removal of the top layer) on drained soils with simultaneous formation of planting cup for planting of forest plantation. For assessing effectiveness of his work, there was developed an experimental sample of the USPI and conducted its field trials. During the two-factor solution of the problem of optimization of the performance of the USPI there were selected optimization criteria, namely performance, quality and economic feasibility of work instrument, as well as the varied parameters exerting the most influence. To detection the analytical dependences between these parameters, we have performed a series of nine experiments, performed the approximation of functions by polynomials of second order. The result was obtained analytical formulas characterizing the influence of the varied parameters of the USPI on the quality of his work. Also, we have found graphical surfaces response and performed a visual analysis, which allowed determining the optimal values of the varied parameters of the USPI

Ключевые слова: ОПТИМИЗАЦИЯ, ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕЕ ОРУДИЕ, ДИСКРЕТНОЕ ПОСАДОЧНОЕ МЕСТО, ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ, АНАЛИТИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ

Keywords: OPTIMIZATION, SOIL-PROCESSING INSTRUMENT, DISCRETE PLANTING SPOT, FIELD TRIALS, ANALYTICAL DEPENDENCES

Воспроизведение лесных ресурсов и повышение продуктивности лесов – важнейшая государственная проблема. Центральное место в ее решении отводится искусственному лесовосстановлению.

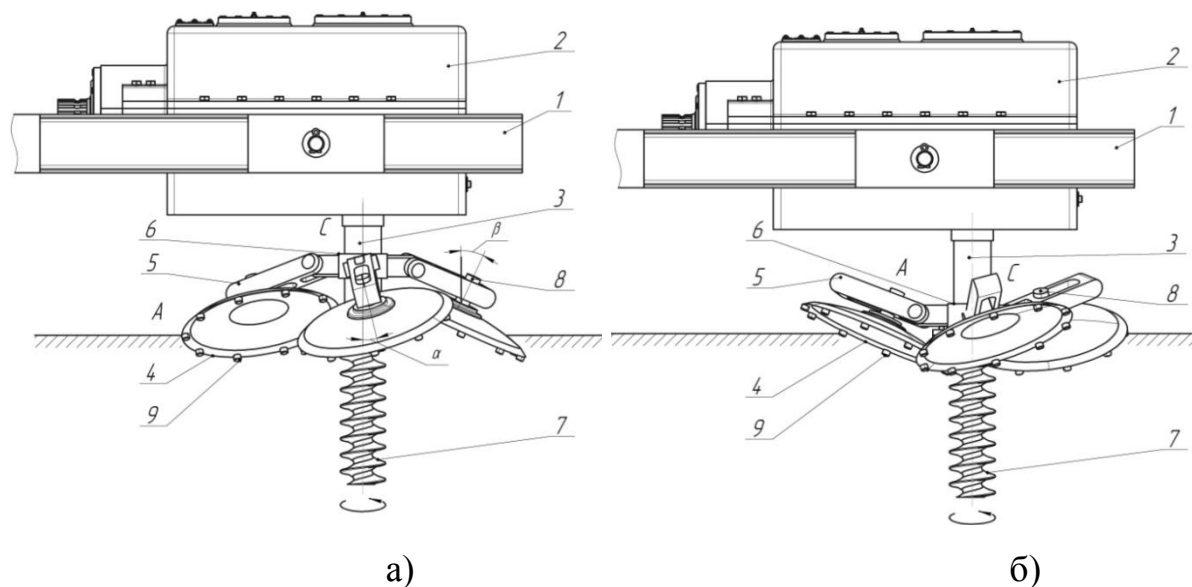
Большую часть лесных территорий, на которых следует проводить лесовосстановительные работы, занимают сложные для обработки участки, такие как вырубки, овражно-балочные и горные склоны. Несмотря на многолетний опыт по совершенствованию технологии лесовосстановления на данных территориях, решение этого вопроса до сих пор не решено на должном уровне.

В России широкое распространение получил линейный метод подготовки почвы, который заключается в предварительной раскорчевке и расчистке полос от порубочных остатков, нарезке борозд и минерализованных полос и последующей посадке с использованием линейных сажалок. Однако, этот метод обладает рядом недостатков, таких как истощение верхнего плодородного слоя почвы, значительное уплотнение, образование подпневых ям и захламлению межполосного (кулисного) пространства выкорчеванными пнями и порубочными остатками.

Для повышения эффективности посадочных работ в последние годы активно внедряются новые методы предпосадочной обработки почвы. Одним из наиболее действенных является дискретный (точечный). При этом методе подготовки почвы снижается энергоёмкость подготовки посадочных мест и материалоёмкость используемых машин, уменьшается вероятность встречи с препятствиями, повышается проходимость машинно-тракторного агрегата на заросших и захламлённых вырубках. Характер работы машин для формирования дискретных посадочных мест отвечает требованиям подготовки почв в условиях горных и овражно-балочных склонов, где оператор может выбрать оптимальной участок посадки и принимать во внимание естественную регенерацию и окружающую растительность. Формирование отдельных посадочных мест также важно на участках, где почвы подвержены эрозии и применение линейных методов обработки почвы нецелесообразно.

Учитывая перспективность темы подготовки дискретных посадочных мест при проведении лесовосстановительных работ в условиях выру-

бок, горных и овражно-балочных склонов был разработан экспериментальный образец универсального почвообрабатывающего орудия (УПО) (рис. 1). Он способен формировать посадочные места в виде микроповышений в условиях временно переувлажняемых почв или микропонижений (с удалением верхнего слоя) на дренированных почвах с одновременным образованием лунок под посадку лесных культур [7, 8].



1 – рама орудия; 2 – редуктор; 3 – выходной вал редуктора; 4 – сферические диски; 5 – поводки; 6 – обойма; 7 – бур; 8 – ось диска; 9 – резцы

Рисунок 1 – Универсальное почвообрабатывающее орудие: а – диски установлены «всвал» для образования микроповышений; б – диски установлены «вразвал» для образования углублений или площадок.

Для полевых экспериментальных исследований был использован агрегат, состоящий из колесного трактора ЛТЗ-60А и навешенного на заднюю навеску УПО (рис. 2). Привод орудия осуществляется от вала отбора мощности трактора. Для оценки эффективности работы универсального почвообрабатывающего орудия был выбран относительно ровный лесной участок с песчаной почвой. Участок располагается на территории учебно-опытного лесхоза ВГЛТУ (Воронежская область, Кожевенный кордон). В

качестве базовых параметров полевых испытаний были выбраны: угол схождения дисков $\beta = 22,5^\circ$ (формирование микроповышений), либо $\beta = -22,5^\circ$ (формирование микропонижений), угловая скорость вращения ротора $\omega_0 = 0,5$ об/с; количество оборотов, совершаемое ротором в процессе формирования одного посадочного места $N_{об} = 6$; длина поводка (пересчитанная в расстояние между осью ротора и центром сферического диска) $l_D = 0,5$ м.



Рисунок 2 – Экспериментальный образец универсального почвообрабатывающего орудия в процессе формирования: а) микроповышений; б) микропонижений

При решении задачи оптимизации необходимо выбрать критерии оптимизации, а именно показатели производительности, качества и экономической целесообразности работы орудия [4, 10]. В качестве этих критериев в ходе экспериментальных полевых исследований были выбраны показатели, влияющие на потребляемую мощность и качество формируемого конуса:

– $h(x)$ и $h(\varphi)$ – поперечный и окружный профили формируемого посадочного места;

– h_K – высота конуса микроповышения или глубина конуса микропонижения;

– Δh_H – неоднородность высоты конуса микроповышения (микропонижения) в окружном направлении;

– N_{cp} – характерная мощность, потребляемая универсальным почвообрабатывающим орудием.

При планировании двухфакторного эксперимента в качестве варьируемых параметров выбраны были входные параметры, оказывающие наибольшее значение на критерии оптимизации:

– β – угол схождения дисков;

– $N_{об}$ – количество оборотов, совершаемое ротором орудия в процессе формирования одного посадочного места;

В ходе оптимизации необходимо найти такие значения варьируемых параметров, при которых высота конуса микроповышения (глубина конуса микропонижения) h_K будет максимальной, неоднородность высоты конуса микроповышения (микропонижения) в окружном направлении Δh_H будет минимальной, потребляемая орудием мощность N_{cp} будет минимальной. Поэтому задачу оптимизации можно представить в виде:

$$\begin{cases} h_K(\beta, N_{об}) \rightarrow \max; \\ \Delta h_H(\beta, N_{об}) \rightarrow \min; \\ N_{cp}(\beta, N_{об}) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (1)$$

В ходе решения задачи двухфакторной оптимизации показателей эффективности работы универсального почвообрабатывающего орудия была проведена серия из девяти экспериментов, в ходе которой параметр β принимал значение $17,5^\circ$, $22,5^\circ$, $27,5^\circ$, а параметр $N_{об}$ – 2, 6, 10 шт. (табл. 1).

Для выявления аналитических зависимостей в полученных данных компьютерных экспериментов выполнена аппроксимация функций $h_K(\beta, N_{об}), \Delta h_H(\beta, N_{об}), N_{ср}(\beta, N_{об})$ полиномами второго порядка. В данном случае их можно представить в виде:

$$P(\beta, N_{об}) = k_1 \cdot \beta^2 + k_2 \cdot N_{об}^2 + k_3 \cdot \beta \cdot N_{об} + k_4 \cdot \beta + k_5 \cdot N_{об} + k_6, \quad (2)$$

где P – рассчитываемый показатель ($h_K, \Delta h_H$ или $N_{ср}$); $k_1 \dots k_6$ – коэффициенты многочлена [2, 3].

Таблица 1 – Результаты двухфакторного эксперимента по изучению влияния на эффективность УПО угла схождения дисков β и количества оборотов, совершаемых ротором орудия в процессе формирования одного посадочного места $N_{об}$

№	β , град.	$N_{об}$	h_K , см	Δh_H , см	$N_{ср}$, кВт
1	17,5	2	10,3	6,3	6,0
2	17,5	6	17,2	10,1	7,8
3	17,5	10	19,2	12,5	11,1
4	22,5	2	10,9	6,9	6,3
5	22,5	6	18,4	9,4	8,2
6	22,5	10	21,2	12,0	12,0
7	27,5	2	12,3	7,2	7,0
8	27,5	6	20,6	8,7	9,1
9	27,5	10	22,1	11,9	14,2

При определении коэффициентов многочлена $P(\beta, N_{об})$ был использован метод наименьших квадратов [1, 5, 6]. Сущность метода состоит в решении обратного уравнения для определения коэффициентов $k_1 \dots k_6$.

При этом необходимо, чтобы суммарное квадратичное отклонение аналитической зависимости от данных двухфакторного эксперимента было наименьшим:

$$\sum_{i=1}^{N_{КЭ}} \left(P_{\text{аналит.}}(\beta^i, N_{об}^i) - P_{КЭ}^i(\beta^i, N_{об}^i) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где i – порядковый номер эксперимента; $N_{КЭ}$ – суммарное количество экспериментов; $P_{\text{аналит.}}$ – аналитическая зависимость показателя P от входных параметров; $P_{КЭ}^i$ – табличное значение показателя P для i -го эксперимента.

В результате аппроксимации, выполненной с использованием математической программы MathCAD 14, были получены следующие аналитические формулы:

$$h_k(\beta, N_{об}) = 4,67 \cdot 10^{-3} \cdot \beta^2 - 0,171 \cdot N_{об}^2 + 0,011 \cdot \beta \cdot N_{об} - 8,33 \cdot 10^{-4} \cdot \beta + 3,005 \cdot N_{об} + 2,91; \quad (4)$$

$$\Delta h_H(\beta, N_{об}) = 6,667 \cdot 10^{-4} \cdot \beta^2 + 4,167 \cdot 10^{-3} \cdot N_{об}^2 - 0,019 \cdot \beta \cdot N_{об} + 0,046 \cdot \beta + 1,039 \cdot N_{об} + 4,17; \quad (5)$$

$$N_{cp}(\beta, N_{об}) = 0,015 \cdot \beta^2 + 0,067 \cdot N_{об}^2 + 0,026 \cdot \beta \cdot N_{об} - 0,637 \cdot \beta - 0,641 \cdot N_{об} + 12,94; \quad (6)$$

где β измеряется в градусах, $N_{об}$ – в количествах оборотов, h_k и Δh_H – в сантиметрах, N_{cp} – в килоВаттах.

Представленные выше аналитические выражения $h_k(\beta, N_{об})$, $\Delta h_H(\beta, N_{об})$, $N(\beta, N_{об})$ необходимо использовать при оценке эффективности работы универсального почвообрабатывающего орудия. Они рекомендованы для применения конструкторами при наладке серийного производства орудия, а также для работы в полевых условиях для оптимальной настройки УПО для решения различных задач.

Благодаря наличию двух регулируемых входных параметров, появляется возможность получения графических поверхностей отклика и выполнения их визуального анализа (рис. 3) [2]. Также поверхности отклика можно рассматривать в двумерном пространстве, если их перестроить при помощи линии уровня. При этом полученное факторное пространство можно условно разделить на две области: благоприятную, в которой критерии оптимизации принимают искомые минимальные или максимальные значения, и неблагоприятную. Граница между областями подбирается экспертным путем, при этом благоприятная область не должна включать в себя участки резкого перепада функции и занимать значительную область факторного пространства (10...60 %) [9].

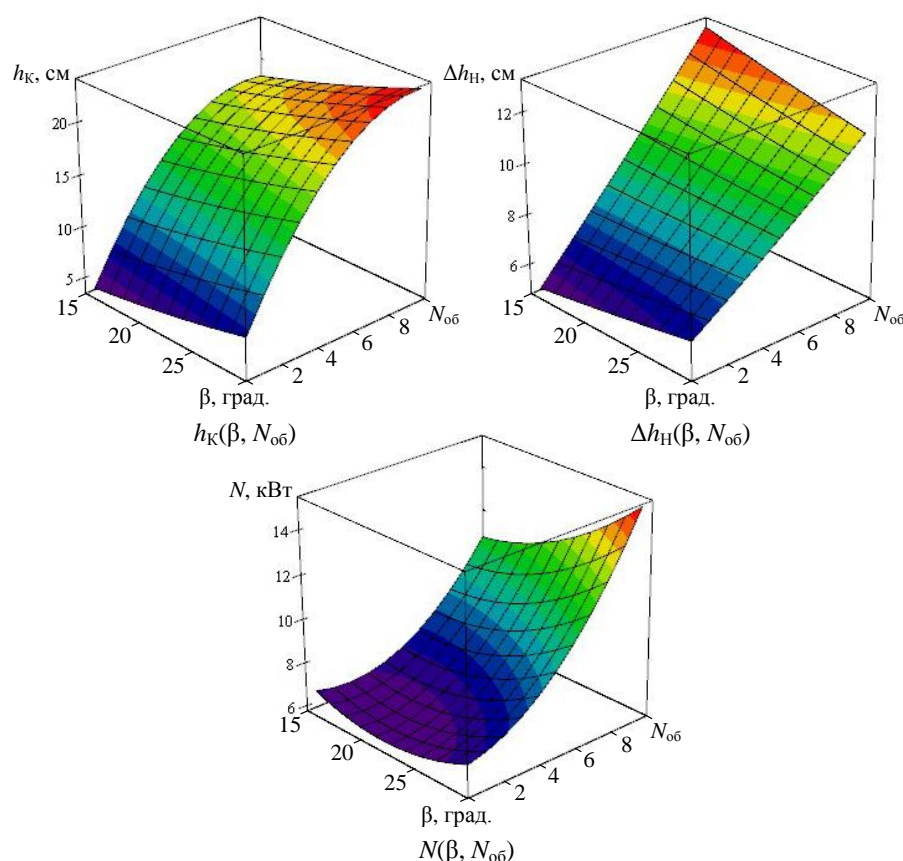


Рисунок 3 – Поверхности отклика к оптимизации параметров β и $N_{об}$ универсального почвообрабатывающего орудия для режима формирования микроповышений

На рисунке 4, *а, б, в* благоприятные области факторного пространства затемнены. В качестве границы между областями факторного пространства приняты изолинии $h_K = 15$ см (достаточная высота конуса), $\Delta h_H = 10$ см (малая неоднородность высоты конуса микроповышения в окружном направлении) и $N = 8$ кВт (низкая характерная мощность, потребляемая УПО). На рис. 4.10, *г* черным цветом выделена область, в которой происходит пересечение благоприятных областей для всех критериев оптимизации. Оптимальной области соответствует диапазон изменения угла схождения дисков $\beta = 15^\circ \dots 25^\circ$ и количество оборотов в рабочем цикле $N_{об} = 4 \dots 6$, а центральной части оптимальной области – $\beta = 22,5^\circ$ и $N_{об} = 5$.

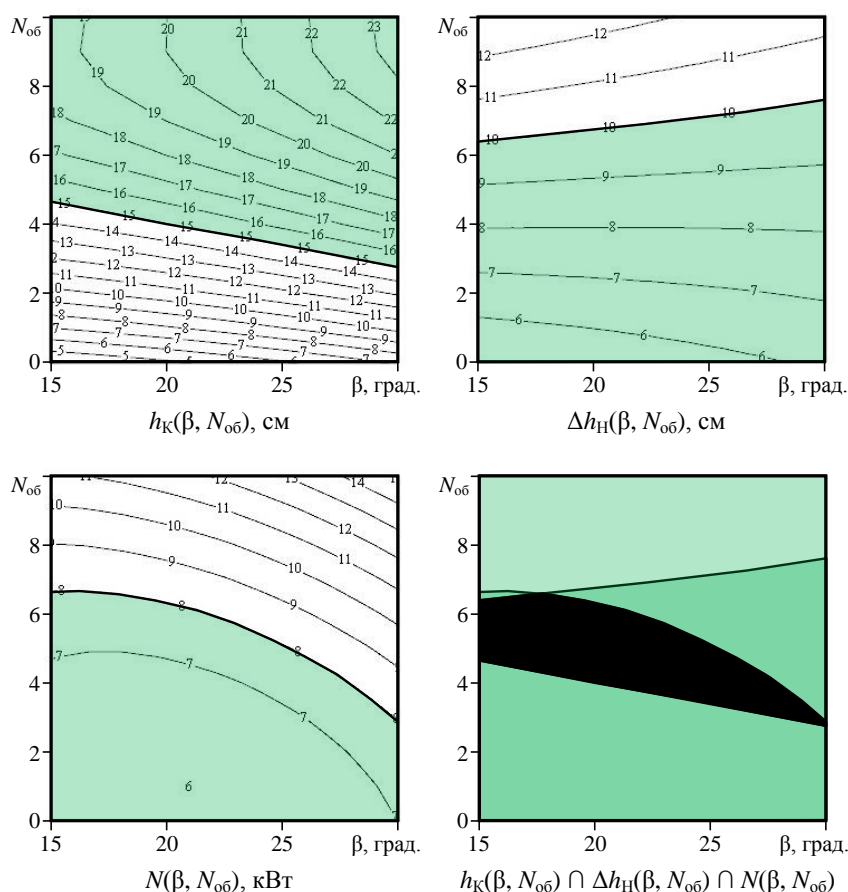


Рисунок 4 – Карты оптимизации параметров β и $N_{об}$ универсального почвообрабатывающего орудия для режима формирования микроповышений

Таким образом, в ходе анализа полученных в результате двухфакторного эксперимента карты оптимизации, были получены оптимальные значения угла схождения дисков β в режиме формирования микроповышений около $22,5^\circ$ и количество оборотов, совершаемое ротором орудия в процессе формирования одного посадочного места $N_{об}$ около 5 оборотов. При таких значениях входных параметров высота конуса микроповышения h_k достаточно высока (более 15 см), неоднородность высоты конуса микроповышения в окружном направлении Δh_H достаточно мала (менее 10 см), а характерная потребляемая УПО мощность не превышает 8 кВт.

Литература

1. Аренс, Х. Многомерный дисперсионный анализ [Текст] / Х. Аренс, Ю. Лейтер: перев. с нем. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 231 с.
2. Афифи, А. Статистический анализ: подход с использованием ЭВМ [Текст] / А. Афифи, С. Эйзен. – М.: Мир, 1982. – 488 с.
3. Бикел, П. Математическая статистика. Выпуск 1. [Текст] / П. Бикел, К. Доксам: перев. с англ. — М.: Финансы и статистика, 1983. – 278 с.
4. Дегтярев, Ю.И. Методы оптимизации [Текст]: учеб. пособие для вузов / Ю. И. Дегтярев. – М.: Сов. радио, 1980. – 272 с.
5. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ: в 2-х кн. кн. 2 [Текст] / Н. Дрейпер, Г. Смит: пер. с англ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 351 с.
6. Линник, Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений [Текст] / Ю. В. Линник. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 333 с.
7. Пат. 2508619 РФ, МПК А01С5/04, [А01В33/14](#), [А01В13/04](#). Универсальное почвообрабатывающее орудие [Текст] / И. М. Бартенев, П. И. Титов, И. В. Попов; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Воронежская государственная лесотехническая академия". – № 2012148511/13; заявл. 14.11.2012; опубл. 10.03.2014.
8. Попов, И. В. Универсальное почвообрабатывающее орудие [Текст] / И. В. Попов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – Воронеж, 2014. – №2 ч.2 (7-2). – с. 84-88
9. Румшицкий, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента [Текст] : справочное руководство / Л. З. Румшицкий – М. : Наука, 1971. – 192 с.
10. Федоров, В.В. Теория оптимального эксперимента [Текст] / В. В. Федоров. – М.: ГРФМЛ изд-ва Наука, 1971. – 312 с.

References

1. Arens, H. *Mnogomernyj dispersionnyj analiz* [Tekst] / H. Arens, Ju. Ljojter: perev. s nem. – M.: Finansy i statistika, 1985. – 231 s.

2. Afifi, A. Statisticheskij analiz: podhod s ispol'zovaniem JeVM [Tekst] / A. Afifi, S. Jeizen. – M.:Mir, 1982. – 488 s.
3. Bikel, P. Matematicheskaja statistika. Vypusk 1. [Tekst] / P. Bi-keľ, K. Doksam: perev. s angl. — M.: Finansy i statistika, 1983. – 278 s.
4. Degtjarev, Ju.I. Metody optimizacii [Tekst]: ucheb. posobie dlja vuzov / Ju. I. Degtjarev. – M.: Sov. radio, 1980. – 272 s.
5. Drejper, N. Prikladnoj regressionnyj analiz: v 2-h kn. kn. 2 [Tekst] / N. Drejper, G. Smit: per. s angl. – 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Finansy i statistika, 1987. – 351 s.
6. Linnik, Ju. V. Metod naimen'shih kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoi teorii obrabotki nabljudenij [Tekst] / Ju. V. Linnik. – M.: GIFML, 1958. – 333 s.
7. Pat. 2508619 RF, MPK A01S5/04, A01B33/14, A01B13/04. Uni-versal'noe pochvoobrabatyvajushhee orudie [Tekst] / I. M. Bartenev, P. I. Titov, I. V. Popov; patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija "Voronezhskaja gosudarstvennaja lesotekhnicheskaja akademija". – № 2012148511/13; zajavl. 14.11.2012; opubl. 10.03.2014.
8. Popov, I. V. Universal'noe pochvoobrabatyvajushhee orudie [Tekst] / I. V. Popov // Aktual'nye napravlenija nauchnyh issledovanij XXI veka: teorija i praktika. – Voronezh, 2014. – №2 ch.2 (7-2). – s. 84-88
9. Rumshiskij, L. Z. Matematicheskaja obrabotka rezul'tatov jeksperimenta [Tekst] : spravocnoe rukovodstvo / L. Z. Rumshiskij – M. : Nauka, 1971. – 192 s.
10. Fedorov, V.V. Teorija optimal'nogo jeksperimenta [Tekst] / V. V. Fedorov. – M.: GRFML izd-va Nauka, 1971. – 312 s