

УДК 631.31, 004.94

МЕТОД ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОЙ КОМПОНОВКИ МТА  
МОДУЛЬНЫМИ ЛЕСНЫМИ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИМИ ОРУДИЯМИ

Лысыч М.Н.

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

Email: miklynea@yandex.ru

**Аннотация:** В статье описывается разработанный трехэтапный метод поиска оптимальной компоновки МТА модульными лесными почвообрабатывающими орудиями, позволяющий проанализировать все возможные варианты компоновки, исключить невозможные варианты по ограничивающим критериям и выбрать наиболее экономически выгодный вариант. Приводится пример поиска оптимальных компоновок МТА, предназначенного для обработки почвы и посадки лесных культур с применением предлагаемых методов и разработанной компьютерной программы.

**Ключевые слова:** машинно-тракторный агрегат, модульные орудия, оптимизация, лесовосстановление.

THE METHOD FOR SEARCHING THE OPTIMAL LAYOUT OF THE  
MACHINE-TRACTOR UNIT BY MODULAR FOREST TREATMENT  
SOIL PROCESSING TOOLS

Lysych M.N.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Voronezh State Forestry University. G.F. Morozova»

Email: miklynea@yandex.ru

**Summary:** The article describes the developed three-stage method for finding the optimal layout of a machine-tractor unit with modular forest tillage implements, which allows us to analyze all possible layout options, exclude impossible options by limiting criteria and choose the most economically viable option. An example of the search for the optimal layout of a machine-tractor unit designed for tillage and planting of forest plantations using the proposed methods and the developed computer program is given.

**Keywords:** machine-tractor unit, modular implements, optimization, reforestation.

## **Введение**

Современные эколого-ресурсосберегающие технологии обработки почвы предусматривают совмещение двух и более операций за один проход агрегата. Это позволяет, с одной стороны, повысить эффективность совмещаемых операций, а с другой – уменьшить техногенное влияние на окружающую среду, снизить затраты труда, ГСМ, сократить сроки выполнения работ и пр. При этом орудия (модули) в комбинированном МТА размещают последовательно друг за другом. Выбор и размещение орудий в составе МТА зависят от ландшафта, технологического назначения, параметров тягового средства ряда других факторов. Например, для работы в лесу, учитывая специфику условий (разброс небольших участков на значительной территории, узкие разворотные полосы, длительные переезды по лесным дорогам и т.п.), длинные прицепные и широкозахватные МТА непригодны. Здесь могут найти применение МТА с многорядным расположением рабочих органов. Это достигается использованием фронтальных и задненавесных одно- и двухрядных модульных орудий [1-3]. При этом вопрос выбора конфигураций отдельных орудий и машинно-тракторных агрегатов в целом, требует детальной проработки с применением методов компьютерной оптимизации [4-12].

## **Цель исследования**

Целью исследования является разработка методик поиска оптимальной компоновки машинно-тракторных агрегатов модульными орудиями для выполнения операций обработки почвы в процессе лесовосстановления.

## **Материал и методы исследования**

1. Метод поиска оптимальной компоновки МТА применительно к операциям подготовки почвы при посадке леса

Проиллюстрируем работу предлагаемого метода на примере операций по посадке леса. Для определенности будем считать, что в конкретном хозяйстве, с учетом местного типа почвы и количества препятствий, для посадки культур принято решение использовать последовательно четыре типа почвообрабатывающих орудий:

- глубокорыхлитель (условное обозначение «Г», тяговое сопротивление при номинальной глубине обработки  $F_{тГ} = 6000$  Н);
- плуг («П»,  $F_{тП} = 8000$  Н);
- дисковый культиватор («К»,  $F_{тК} = 4000$  Н);
- сажалка («С»,  $F_{тС} = 1500$  Н).

2. Факторы, определяющие количество вариантов компоновки

Первым фактором, определяющим количество вариантов компоновки, является план обработки. Учитывая, что МТА могут комплектоваться несколькими модульными орудиями (передненавесное, задненавесное одно- и двухрядное) и специализированной сажалкой размещенными последовательно, возможны 8 планов обработки почвы (табл. 1).

Таблица 1 – Варианты планов обработки почвы модульными орудиями различных типов

№	Условное обозначение плана обработки	Проход № 1 агрегата	Проход № 2 агрегата	Проход № 3 агрегата	Проход № 4 агрегата
1	Г, П, К, С	Г	П	К	С
2	Г + П, К, С	Г + П	К	С	–
3	Г, П + К, С	Г	П + К	С	–
4	Г, П, К + С	Г	П	К + С	–
5	Г + П, К + С	Г + П	К + С	–	–
6	Г + П + К, С	Г + П + К	С	–	–
7	Г, П + К + С	Г	П + К + С	–	–
8	Г + П + К + С	Г + П + К + С	–	–	–

Четырехкратный проход с модулем только одного типа (Г, П, К, С) может быть экономически нецелесообразным, особенно при использовании тракторов высокого тягового класса. Комбинация сразу трех или четырех модулей для одного прохода (Г + П + К, П + К + С, Г + П + К + С) может быть невозможна из за слишком высокого суммарного тягового сопротивления, особенно при использовании тракторов малого тягового класса и сложности их компоновки. Поэтому целесообразно найти оптимальный план обработки, определяющийся минимальными экономическим затратами и ограничениями по тяговому сопротивлению.

Вторым фактором, определяющим количество вариантов, является тип используемого трактора. Для определенности взяты тракторы двух тяговых классов:

- класс 1,4 т.с. (обозначение «Т1», максимальная тяга  $F_{T1} = 14$  кН);
- класс 3,0 т.с. (обозначение «Т2», максимальная тяга  $F_{T2} = 30$  кН).

Также, для дальнейших расчетов времени обработки необходимо использовать такой параметр, как мощность двигателя трактора. Для определенности в качестве трактора класса 1,4 т.с. выбран МТЗ-82.1 с эксплуатационной мощностью 80 л.с. (58,8 кВт); в качестве трактора класса 3,0 т.с. выбран МТЗ-1523 с эксплуатационной мощностью 150 л.с. (110,3 кВт).

Третьим фактором, определяющим количество вариантов, является ширина модульного орудия. Для определенности считается возможным размещать в од-

ном ряду от одной до трех секций ( $B = 1 \dots 3$ ). При этом для снижения количества вариантов принято, что для выбранного плана обработки почвы все проходы производятся орудиями одной и той же ширины (одно и тоже количество секций).

Таким образом, в данном примере используются два принципа компоновки:

- объединение разнотипных модулей, которые должны обрабатывать почву поочередно, в пределах одного орудия и (или) одного МТА за счет размещения их друг за другом (рядами);

- повышение ширины обрабатываемой полосы за счет размещения максимального числа секций на брусе рамы.

### 3. Трехэтапный метод поиска оптимального варианта компоновки МТА

Предлагаемый метод поиска оптимальной компоновки МТА состоит из трех основных этапов (рис. 1). На первом этапе составляется множество возможных вариантов компоновки путем перебора комбинаций плана обработки, типа трактора, количества секций в одном ряду. Количество возможных вариантов обработки определяется перемножением вариантов каждого из рассмотренных выше факторов: [количество планов обработки]  $\times$  [количество типов тракторов, возможных на каждом проходе плана обработки]  $\times$  [количество секций]. В рассматриваемом примере количество вариантов составляет  $N_V = 216$ .



Рисунок 1 – Схема поиска оптимальных вариантов компоновки МТА модульными почвообрабатывающими орудиями

На втором этапе исключаются невозможные варианты по критериям-ограничениям. Для данного примера используется только одно ограничение – суммарное тяговое сопротивление модульного орудия не должно превышать тяговую способность трактора:

$$B \sum_{i=1}^{N_M} F_{Ti} < F_{Tj}, \quad (1)$$

где  $B$  – ширина модульного орудия (количество секций в ряду);  $i$  – номер модуля среди разнотипных модулей;  $N_M$  – количество разнотипных модулей;  $F_{Ti}$  – тяговое сопротивление модуля;  $F_{Tj}$  – тяговая способность трактора.

Для рассматриваемого примера после исключения по данному условию количество вариантов снизилось с 216 до 80.

На третьем этапе из оставшихся вариантов выбирается наиболее экономически выгодный вариант. Оценка удельных экономических затрат производится по формуле:

$$Z = \sum_{i=1}^{N_{np}} \left( \frac{S_1(T_i)}{B} + \frac{S_2(T_i)}{F_{Ti}} \sum_{j=1}^{N_M} F_{Tj} \right), \quad (2)$$

где  $Z$  – удельные экономические затраты,  $p/m^2$ ;  $i$  и  $N_{np}$  – номер прохода агрегата и количество проходов агрегата в плане обработки;  $S_1$  и  $S_2$  – постоянные (зависящие от обработанной площади) и переменные (зависящие от тягового сопротивления) удельные затраты для трактора типа  $T_i$ ,  $p/m$  и  $p/m^2$ ;  $B$  – количество секций в ряду;  $F_{Tj}$  – тяговая способность трактора, Н;  $F_{Tj}$  – тяговое сопротивление модуля  $j$ , Н.

В данном примере для простоты рассматриваются только путевые и энергетические затраты трактора, но не рассматривается комплекс затрат, связанных с длительностью обработки почвы.

Вторым из важных показателей эффективности является удельное время обработки почвы  $T$  (измеряется в секундах на метр квадратный  $c/m^2$ ). Расчет данного показателя производится исходя из мощности трактора, тягового сопротивления и ширины модульного орудия:

$$T = \sum_{i=1}^{N_{np}} \frac{F_{cTi} + \sum_{j=1}^{N_M} F_{Tj}}{\alpha N_{Ti} B}, \quad (3)$$

где  $F_{сГi}$  – приведенная сила сопротивления движению трактора, осуществляющего проход  $i$ , дополнительная к силе сопротивления орудия, Н;  $N_{Гi}$  – мощность двигателя трактора, Вт;  $\alpha$  – коэффициент использования мощности трактора в процессе обработки (принят равным 0,4, при этом запас мощности является дополнительной до единицы величиной и составляет 0,6).

#### 4. Алгоритмическая реализация предлагаемого метода

Список вариантов составляется по следующему алгоритму (рис. 2).

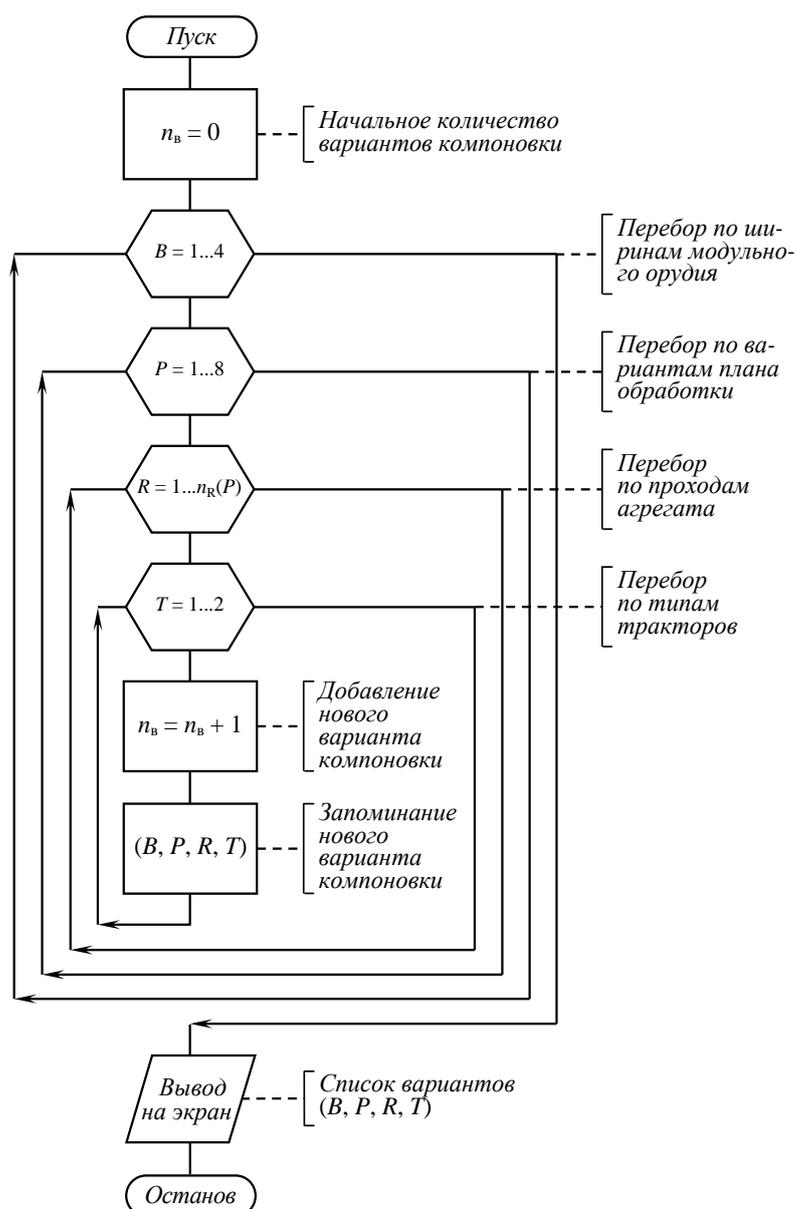


Рисунок 2 – Схема алгоритма составления полного списка вариантов

После составления списка вариантов компоновки производится оценка теоретической возможности варианта по условию соответствия суммарного тя-

гового сопротивления тяговому классу трактора, расчет удельных экономических затрат и удельных затрат времени для каждого варианта, а также поиск наилучшего варианта компоновки по критерию минимума удельных экономических затрат (рис. 3).

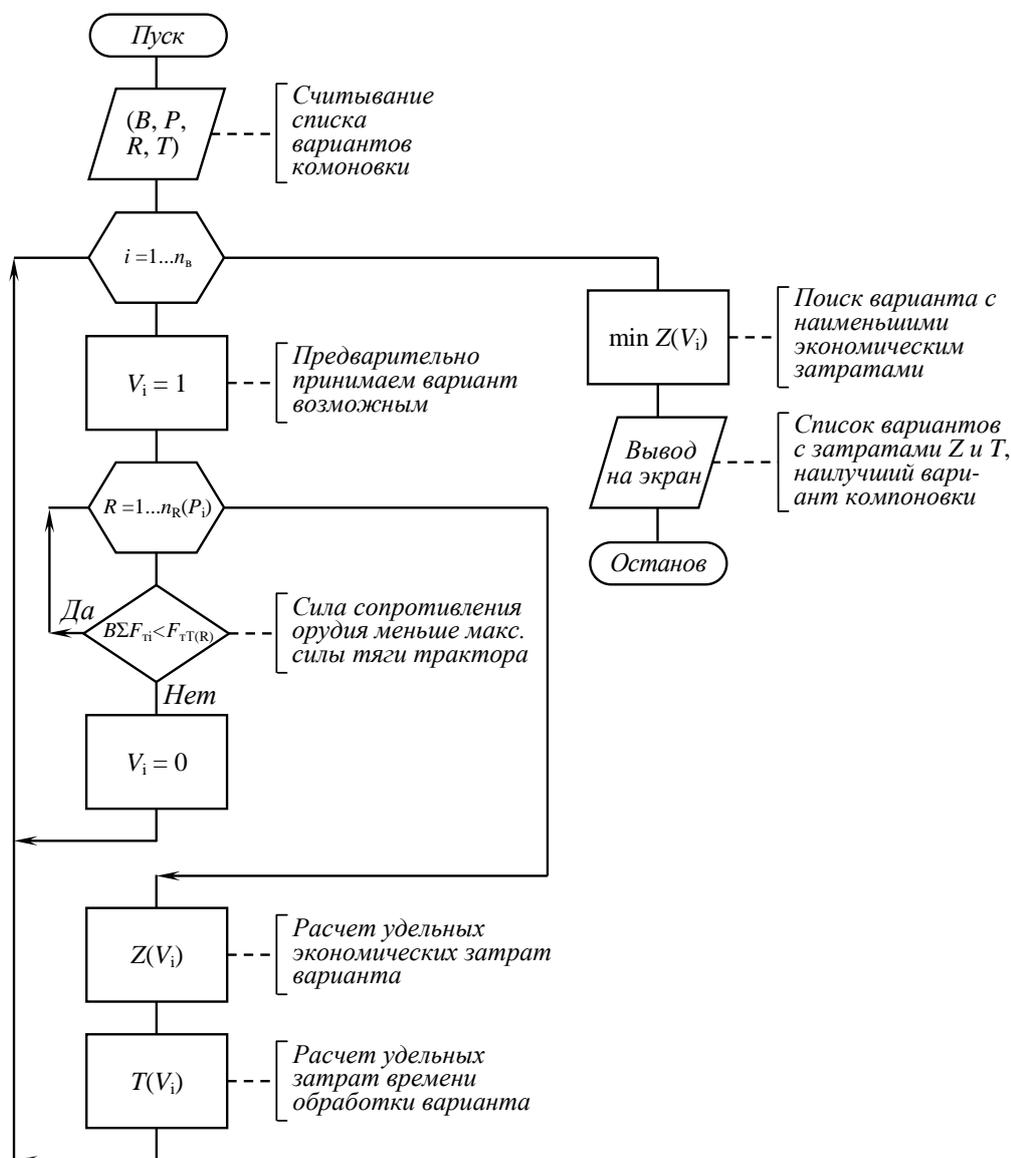


Рисунок 3 – Схема алгоритма выбора вариантов, возможных по тяговому сопротивлению, и расчета экономических и временных затрат

## 5. Программа для поиска оптимального варианта компоновки МТА модульными почвообрабатывающими орудиями

Предложенный метод поиска оптимальной компоновки МТА модульными почвообрабатывающими орудиями реализован программно на языке Object Pascal в среде разработки Delphi 7.

«Программа для выбора оптимальной компоновки модульных почвообрабатывающих орудий для лесовосстановительных работ» предназначена для определения множества вариантов компоновки МТА модульными орудиями и поиска оптимального варианта компоновки, обеспечивающего непротиворечивость компоновки и наибольший экономический эффект.

Программа позволяет составить и проанализировать полный список вариантов компоновки МТА для подготовки почвы и посадки саженцев, отличающихся: типом орудий, количеством модулей в орудии, планами обработки почвы, использованием тракторов различного тягового класса.

Программа выводит на экран список вариантов с указанием их теоретической возможности и прогнозируемым экономическим эффектом, а также выбирает оптимальный вариант компоновки. Применяется для планирования работ на предприятиях лесного хозяйства различных форм.

### **Результаты исследования и их обсуждение**

#### **1. Результаты поиска оптимальных вариантов компоновки**

Разработанный метод поиска оптимальной компоновки МТА модульными почвообрабатывающими орудиями и реализующая его компьютерная программа позволили найти наиболее оптимальные варианты компоновок модульных орудий. В таблице 2 приведены семь наиболее оптимальных вариантов и семь наименее оптимальных. Варианты отсортированы по убыванию удельных экономических затрат.

Наилучшим вариантом является вариант компоновки 97, который заключается в двух проходах МТА с двумя секциями рабочих органов в одном ряду. Условная ширина обработки агрегата равняется 2 м (принимается по ширине двух наиболее широкозахватных рабочих органов – дисковых батарей). Первый проход осуществляется трактором тягового класса 3,0 т.с., с последовательно установленными модулями укомплектованными глубокорыхлящими и дисковыми плужными рабочими органами. Здесь возможны два варианта: применение передненавесного и задненавесного однобрусных орудий, и задненавесного двубрусного орудия. Выбор варианта осуществляется исходя из наличия трактора оборудованного передним навесным устройством и устойчивости получаемого агрегата. Второй проход осуществляется трактором тягового класса 1,4 т.с., с последовательно установленным культиваторным модулем и сажалкой. Здесь возможен только один вариант компоновки: культиваторный модуль – переднее навесное устройство, сажалка – заднее навесное устройство. В этом случае удастся достигнуть минимальных среди всех

вариантов экономических затрат в 2,826 р./м<sup>2</sup>.

Второй по оптимальности вариант соответствует также двукратному проходу: первый раз трактором класса 1,4 т.с. только модулем с глубокорыхлителями, второй раз трактором класса 3,0 т.с. с последовательно установленными плужным, культиваторным модулями и сажалкой. Ширина орудий также 2 метра. В этом случае экономические затраты также очень малы – 2,829 р./м<sup>2</sup>. Однако время обработки 0,4996 с/м<sup>2</sup> что выше, чем в первом варианте 0,3117 с/м<sup>2</sup>. Также данная схема на практике фактически нереализуема, так как требует установки двух модулей на передней навеске, а специализированного посадочного орудия на задней. Такой МТА из-за значительной длины будет обладать низкой продольной и поперечной динамической устойчивостью. Курсовая устойчивость агрегата также будет низкой, вследствие возникновения разворачивающего момента от передненавесных модулей.

Таблица 2 – Примеры вариантов компоновки, включая наиболее оптимальный и наименее оптимальный варианты (варианты отсортированы по возрастанию экономических затрат)

№ варианта	План обработки	Тракторы на проходах плана	Ширина орудия В, м	Экономические затраты Z, р/м <sup>2</sup>	Время обработки T, с/м <sup>2</sup>
97	Г + П, К + С	2, 1	2	2,826	0,3117
104	Г, П + К + С	1, 2	2	2,829	0,4996
54	Г + П + К + С	2	1	3,300	0,5326
106	Г, П + К + С	2, 2	2	3,300	0,3117
148	Г, П, К + С	2, 2, 2	3	3,300	0,2380
98	Г, П + К, С	2, 2	2	3,300	0,3117
75	Г + П, К, С	2, 1, 1	2	3,326	0,3570
...	...	...	...	...	...
10	Г, П, К, С	2, 1, 1, 2	1	7,357	0,8046
4	Г, П, К, С	1, 1, 2, 2	1	7,367	1,1692
15	Г, П, К, С	2, 2, 2, 1	1	8,307	0,8046
14	Г, П, К, С	2, 2, 1, 2	1	8,319	0,8046
8	Г, П, К, С	1, 2, 2, 2	1	8,329	1,1692
12	Г, П, К, С	2, 1, 2, 2	1	8,338	0,8046
16	Г, П, К, С	2, 2, 2, 2	1	9,300	0,8046

Наименее оптимальные варианты компоновки объединяет нерациональность четырехкратного прохода тракторами различных классов, оснащенными только одним типом орудия и имеющим узкую ширину в 1 модуль (1 м). Такие компоновки являются очевидно неоптимальными, что и подтвердил разработанный метод оценки оптимальности компоновки.

## 2. Теоретическое исследование трехэтапного метода поиска оптимально-

го варианта компоновки МТА модульными орудиями

Возможность достижения наилучших значений показателей оптимальности определяется характерными значениями исходных данных для метода. Дальнейшее теоретическое исследование производится в соответствии со следующей схемой (рис. 4).



Рисунок 4 – Исходные данные для компоновки и показатели оптимальности метода поиска оптимального варианта компоновки МТА

К исходным данным для компоновки относятся  $F_{т.ср}$  – средний тяговый класс тракторов, используемых для агрегатирования с модульными орудиями. Параметр  $F_{т.ср}$  определяется усреднением тяговой способности тракторов, участвующих в проходах в пределах выбранного плана обработки.

$$F_{т.ср} = \frac{1}{N_{пр}} \sum_{i=1}^{N_{пр}} F_{тГi} \quad (4)$$

где  $N_{пр}$  – количество проходов заданной площади в пределах выбранного плана обработки.

В качестве показателей оптимальности варианта компоновки модульного орудия далее рассматриваются следующие два показателя:  $Z$  – приведенные к площади обработки (удельные) экономические затраты на подготовку почвы и посадку леса в рамках конкретного варианта плана обработки и набора модульных орудий;  $T$  – приведенное к площади обработки (удельное) время предварительной подготовки почвы и посадки леса в рамках конкретного варианта плана обработки и набора модульных орудий.

В процессе дальнейшего теоретического исследования необходимо:

- выяснить влияние параметров  $F_{т.ср}$ ,  $N_{пр}$ ,  $B$  на показатели оптимальности

$Z, T$ ;

– установить диапазоны параметров  $F_{т.ср}$ ,  $N_{пр}$ ,  $B$ , в которых показатели оптимальности  $Z, T$  достигают наилучших (наименьших) значений:

$$\begin{cases} Z(F_{т.ср}, N_{пр}, B) \rightarrow \min; \\ T(F_{т.ср}, N_{пр}, B) \rightarrow \min; \end{cases} \Rightarrow F_{т.ср}^{opt}, N_{пр}^{opt}, B^{opt}. \quad (5)$$

### 3. Анализ распределения удельных экономических и временных затрат

Каждый из 80 теоретически возможных вариантов компоновки характеризуется удельными экономическими затратами  $Z$  и удельным временем обработки  $T$ . Зная законы распределения величин  $Z$  и  $T$  можно оценить, насколько велик выбор оптимальных вариантов компоновки.

По виду гистограммы распределения экономических затрат  $Z$  можно сделать вывод, что с уменьшением экономических затрат повышается количество вариантов компоновки (рис. 5, а). Это означает, что предоставляется большой выбор вариантов компоновки, обеспечивающих низкие экономические затраты. Так, из 80 теоретически возможных вариантов компоновки 22 обеспечивают экономические затраты менее 4 р./м<sup>2</sup>. В случае большого выбора вариантов компоновки, близких к оптимальным, предоставляется возможность при выборе учитывать дополнительные условия, накладываемые особенностями конкретного экономического субъекта лесного комплекса.

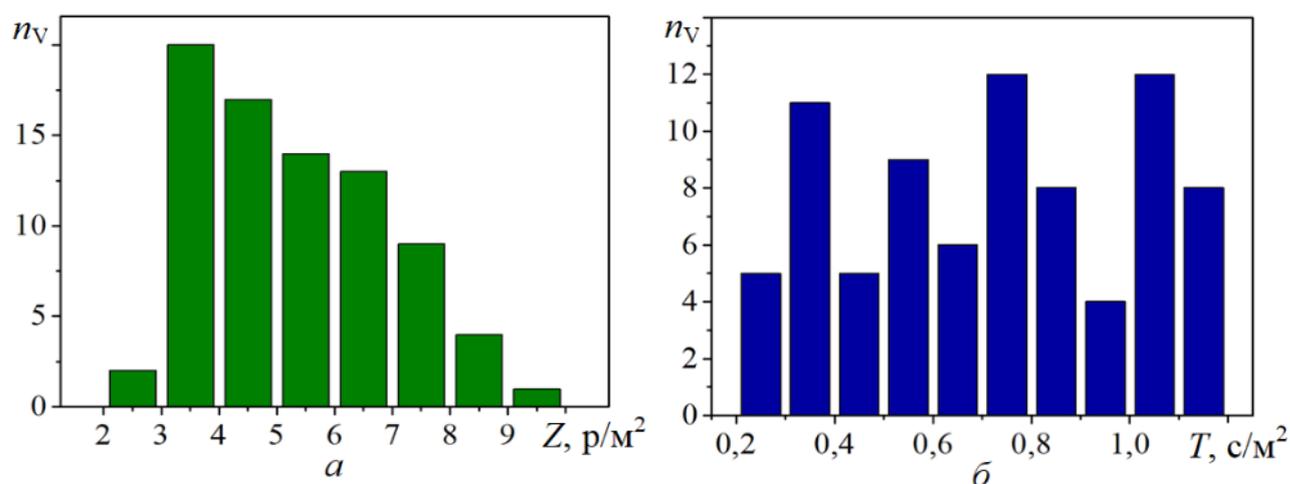


Рисунок 5 – Распределение возможных вариантов  $n_v$  по удельным экономическим затратам  $Z$  на подготовку почвы с посадкой леса (а) и по удельному времени  $T$  подготовки почвы с посадкой леса (б)

В то же время распределение удельного времени обработки имеет слож-

ный немонотонный вид с четырьмя пиками (рис. 5, б). К относительно оптимальным вариантам можно отнести 16 вариантов, для которых время обработки не превышает  $0,4 \text{ с/м}^2$ . Однако более половины возможных вариантов характеризуются значительным временем обработки от  $0,7$  до  $1,2 \text{ с/м}^2$ .

В какой-то мере рассматриваемые два критерия оптимальности  $Z$  и  $T$  имеют один и тот же смысл: они снижаются при уменьшении количества проходов и увеличении числа модулей в одном агрегате. Однако эти критерии не являются жестко связанными (рис. 6).

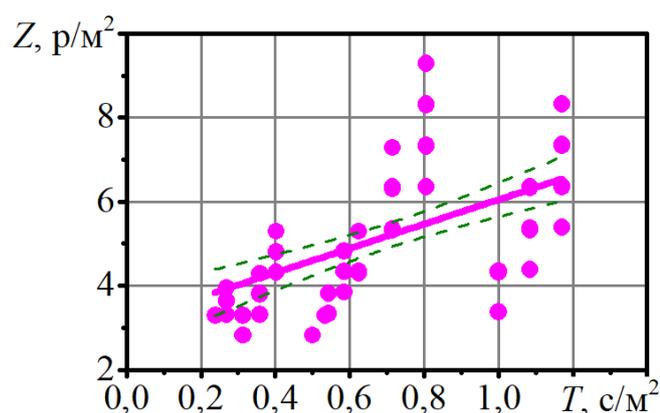


Рисунок 6 – Взаимосвязь показателей оптимальности компоновки: удельных экономических затрат  $Z$  и времени обработки  $T$  для 80 возможных вариантов компоновки

В целом между ними существует линейная взаимосвязь, однако для многих вариантов компоновки наблюдаются существенные отклонения (до 80 %) от жесткой линейной связи между  $Z$  и  $T$ . Таким образом, критерии  $Z$  и  $T$  являются независимыми, и в дальнейшем рассматриваются и тот, и другой.

#### 4. Факторы, определяющие удельные экономические затраты

С целью изучения закономерностей влияния факторов компоновки на удельные экономические затраты на основе 80 теоретически возможных компоновок МТА построены три графика и аппроксимирующие линии в виде полиномов 2 или 3 порядка (рис. 7). В целом, необходимо отметить значительный разброс точек по плоскости графика, что свидетельствует о том, что рассматриваемые однофакторные закономерности не описывают исчерпывающим образом взаимосвязь, и необходимо более глубокое исследование.

Средний тяговый класс трактора слабо влияет на экономические затраты: некоторого минимума экономических затрат можно достичь для тракторов малого тягового класса (менее 20 кН) (рис. 7, а).

Экономические затраты существенно снижаются при уменьшении количе-

ства проходов, необходимых для предпосадочной подготовки почвы и посадки леса (рис. 7, б). Поэтому желательно объединять четыре операции (глубокорыхление, вспашку, культивирование, посадку) в 1 ... 2 прохода тракторов.

С увеличением ширины модульного орудия снижаются экономические затраты (рис. 7, в) (при необходимости осуществления сплошной или широкополосной обработки). Оптимальная ширина модульных орудий составляет около 2,8 м, что соответствует примерно 3 модулям в одном ряду.

Таким образом, экономические затраты снижаются при использовании тракторов малого тягового класса (менее 20 кН), объединении четырех операций (глубокорыхления, вспашки, культивирования, посадки) в 1 ... 2 прохода трактора, увеличении ширины модульного орудия до 3 модулей в ряд.

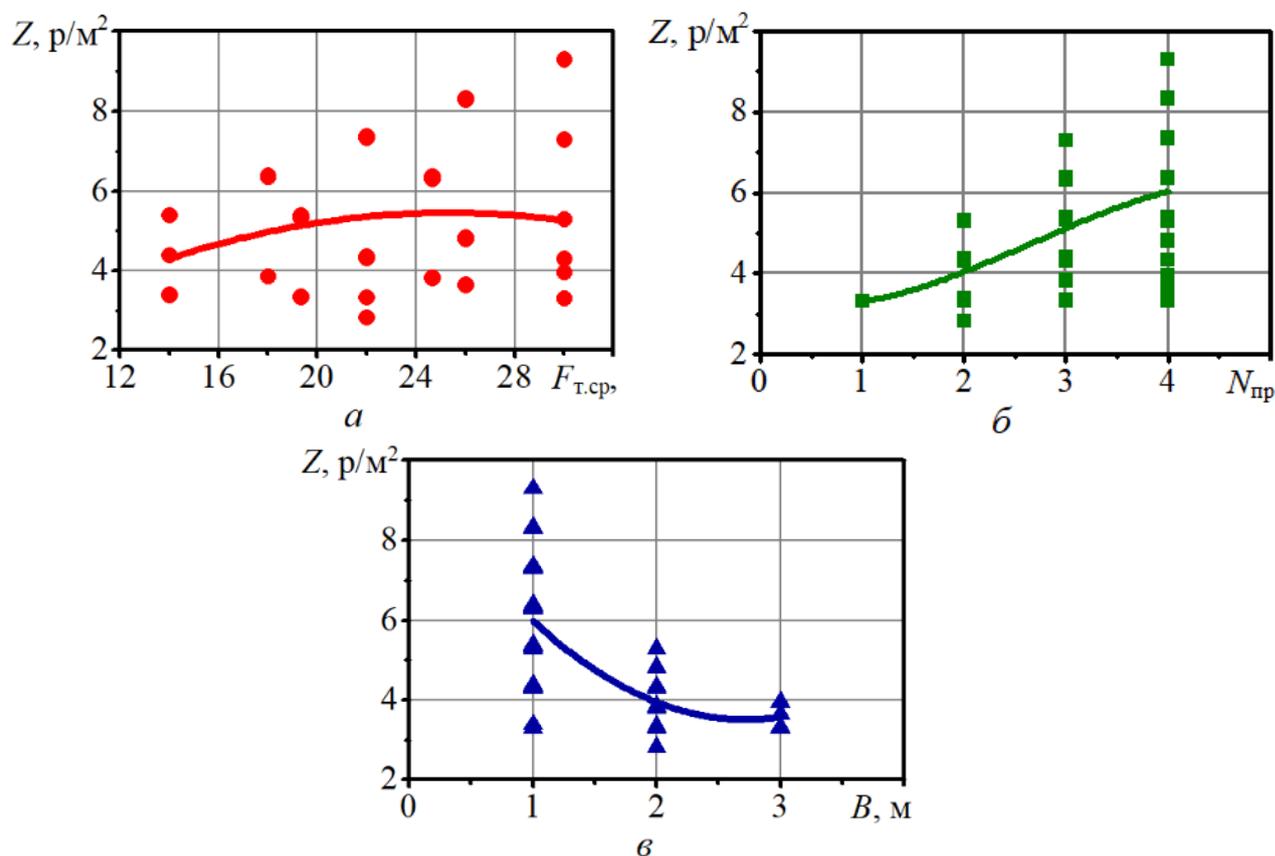


Рисунок 7 – Зависимость удельных экономических затрат на посадку леса  $Z$  от среднего по плану обработки тягового класса трактора  $F_{\text{T,ср}}$  (а), количества проходов агрегата по плану  $N_{\text{пр}}$  (б) и ширины модульного орудия  $B$  (в)

##### 5. Факторы, определяющие удельное время обработки

Удельное время подготовки почвы и посадки  $T$  практически линейно уменьшается при использовании тракторов более высокого тягового класса (рис. 8, а). Для трактора класса 3,0 т.с. время обработки  $0,5 \text{ с/м}^2$ , что более чем вдвое

ниже времени обработки  $1,1 \text{ с/м}^2$  рассчитанного для тракторов класса 1,4 т.с.

Время обработки можно снизить, уменьшая количество проходов в пределах плана обработки (рис. 8, б). Для этого целесообразно объединять модульные орудия таким образом, чтобы выполнить обработку в 1 ... 2 прохода трактора.

Время обработки существенно снижается при увеличении ширины орудия. Так, при увеличении ширины орудия с 1 до 3 модулей в ряд удельное время обработки снижается более чем втрое: с  $0,90$  до  $0,25 \text{ с/м}^2$  (рис. 8, в).

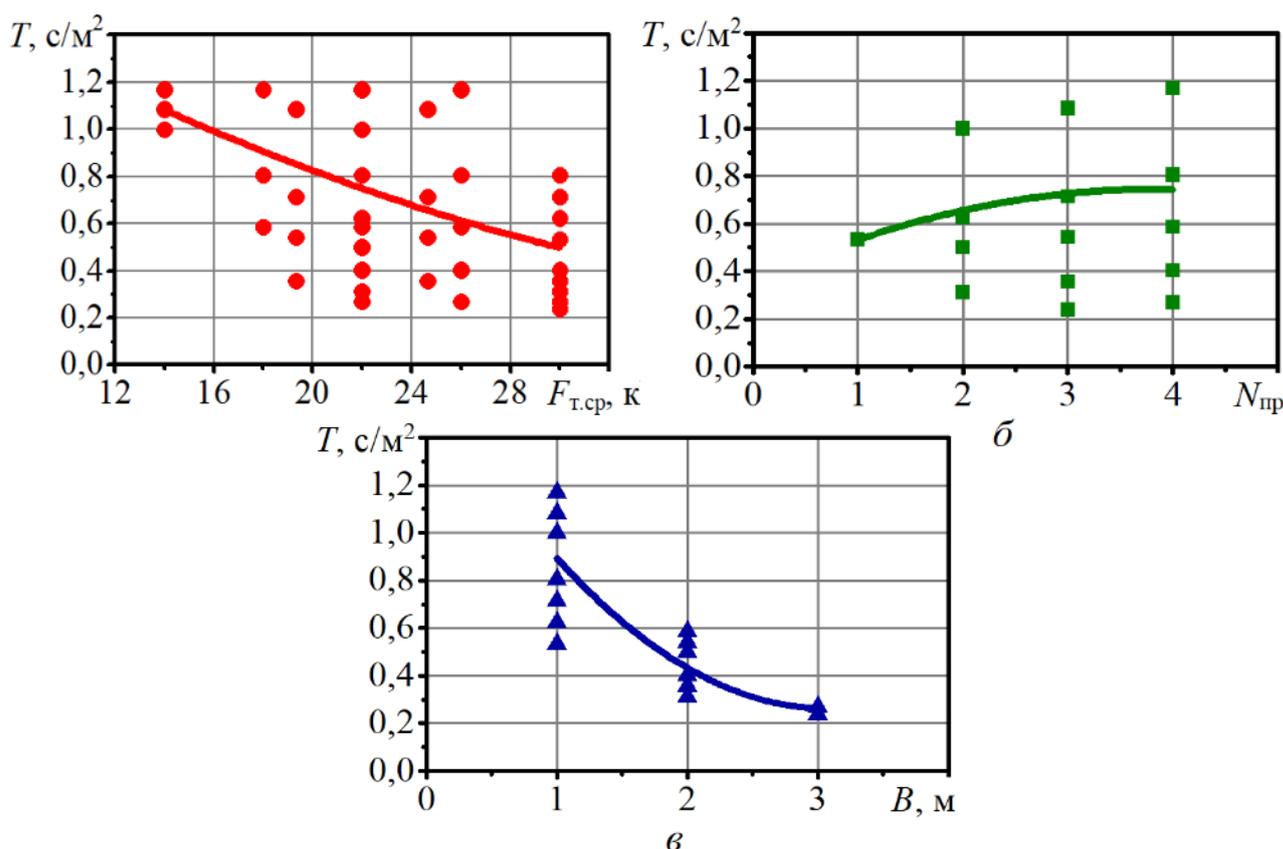


Рисунок 8 – Зависимость удельного времени подготовки почвы и посадки  $T$  от среднего по плану обработки тягового класса трактора  $F_{\text{т.ср}}$  (а), количества проходов агрегата по плану  $N_{\text{пр}}$  (б) и ширины модульного орудия  $B$  (в)

Таким образом, для снижения времени обработки целесообразно использовать тракторы большего тягового класса, объединять орудия (модули) последовательно для сокращения числа проходов трактора, увеличивать ширину орудий до 3 секций в ряд при использовании сплошной и широкополосной технологий обработки почвы.

#### 6. Определение оптимальных параметров компоновки

Выше исследовано влияние отдельных факторов компоновки (тяговый класс трактора, количество повторных проходов по обрабатываемой площади, ширина модульного орудия) на показатели оптимальности компоновки. Более

детальную информацию о перечисленных зависимостях можно получить из исследования многомерного факторного пространства.

Исследовано двумерное факторное пространство: выбраны два параметра, наиболее существенно влияющие на показатели оптимальности: средний тяговый класс трактора  $F_{т.ср}$  и ширина модульного орудия  $B$ . В этом случае задачу оптимальной компоновки можно записать аналитически следующим образом:

$$\begin{cases} Z(F_{т.ср}, B) \rightarrow \min; \\ T(F_{т.ср}, B) \rightarrow \min; \end{cases} \Rightarrow F_{т.ср}^{opt}, B^{opt}. \quad (6)$$

Решение задачи оптимизации заключается в поиске такой области изменения факторов  $F_{т.ср}$  и  $B$ , в которой удельные экономические затраты  $Z$  и время обработки  $T$  будут одновременно минимальными.

Для установления зависимости между факторами и критериями в рамках рассматриваемого примера (подготовка почвы и посадка леса) использовали 80 теоретически возможных вариантов компоновки и получили аналитические формулы для функций  $Z(F_{т.ср}, B)$  и  $T(F_{т.ср}, B)$ . Аналитические выражения данных функций искали в виде полиномов второго порядка в виде:

$$K(F_{т.ср}, B) = k_1 F_{т.ср}^2 + k_2 B^2 + k_3 F_{т.ср} \cdot B + k_4 F_{т.ср} + k_5 B + k_6, \quad (7)$$

где  $K$  – критерий оптимизации ( $Z$  или  $T$ );  $k_1 \dots k_6$  – параметры полинома.

Параметры полиномов определены методом наименьших квадратов (МНК) [11], в рамках которого минимизировалась сумма квадратов отклонений аналитической зависимости от набора данных по вариантам компоновки:

$$\sum_{i=1}^{N_{\epsilon}} \left( K_{\text{аналит.}}(F_{т.ср}^i, B^i) - K_{\epsilon}^i(F_{т.ср}^i, B^i) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (8)$$

где  $i$  и  $N_{\epsilon}$  – порядковый номер и общее количество вариантов компоновки;  $K_{\text{аналит.}}$  – искомая аналитическая (полиномиальная) зависимость критерия  $K$  от факторов  $F_{т.ср}$  и  $B$ ;  $K_{\epsilon}^i$  – значения критерия  $K$ , определенные для  $i$ -го варианта компоновки  $F_{т.ср}^i$  и  $B$ .

Для аппроксимации методом МНК использовали математическую программу MathCAD 14. В результате получены следующие аналитические формулы для показателей оптимальности компоновки:

$$Z(F_{т.ср}, B) = -0,013 F_{т.ср}^2 + 0,944 B^2 - 6,769 \cdot 10^{-3} F_{т.ср} \cdot B + 0,709 F_{т.ср} - 5,068 B + 1,026; \quad (9)$$

$$T(F_{т.ср}, B) = -5,341 \cdot 10^{-4} F_{т.ср}^2 + 0,117 B^2 + 0,013 F_{т.ср} \cdot B - 0,015 F_{т.ср} - 1,085 B + 2,170, \quad (10)$$

где  $Z$  измеряется в рублях на метр квадратный;  $T$  – в секундах на метр квадратный;  $F_{т.ср}$  в киловаттах;  $B$  – в метрах.

Полученные формулы могут использоваться для быстрой (без выполнения расчетов многочисленных вариантов) оценки показателей эффективности компоновки.

Для дальнейшего анализа функции  $Z(F_{т.ср}, B)$  и  $T(F_{т.ср}, B)$  представлены в виде графиков (рис. 9) и картограмм (рис. 10).

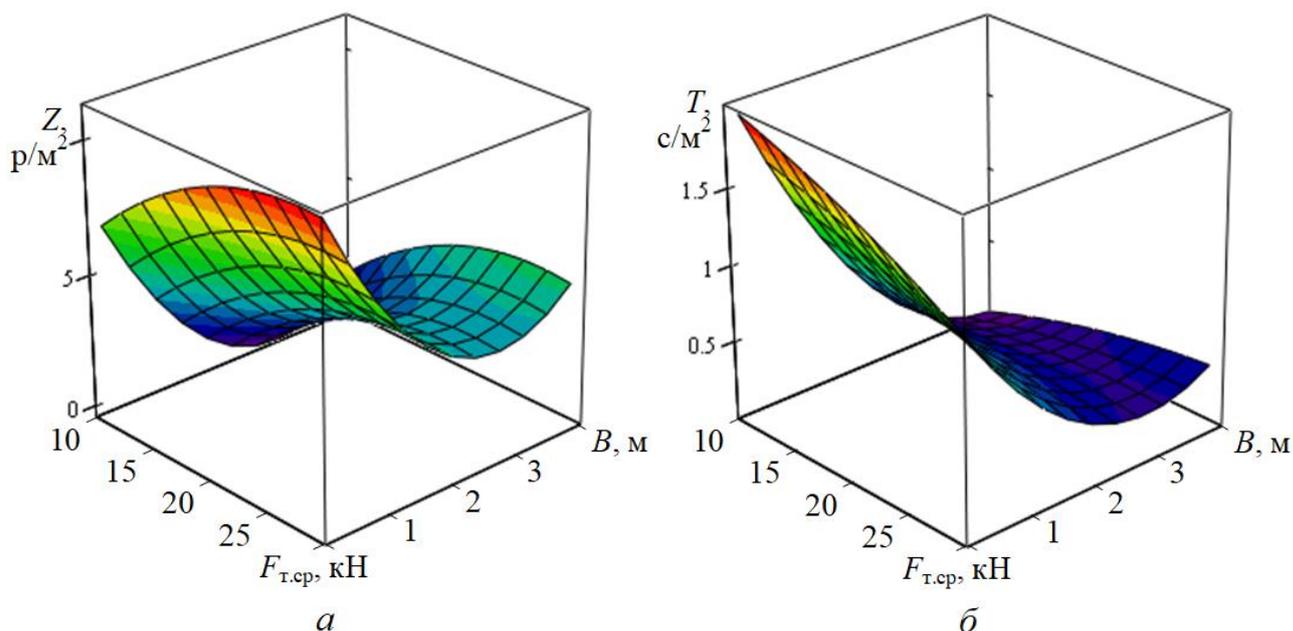


Рисунок 9 – Графики влияния среднего тягового класса  $F_{т.ср}$  трактора в пределах плана обработки и ширины модульного орудия  $B$  на удельные экономические затраты  $Z$  и удельное время обработки  $T$

Графики позволяют визуально понять характер влияния среднего тягового класса трактора и ширины модульного орудия на удельные экономические затраты и время обработки. По внешнему виду графиков можно заключить, что затраты  $Z$  и  $T$  снижаются при уменьшении среднего тягового класса трактора  $F_{т.ср}$  и увеличении ширины модульных орудий  $B$ .

Недостатком графиков является возможность понять закономерности только на качественном уровне; для количественного же анализа графики целесообразно перестроить в картограммы оптимизации, которые представляют со-

бой виды на графики сверху с изображением поверхности отклика линиями уровня (рис. 10).

Пример использования картограмм оптимизации показан на рисунке 10, а. Если средний тяговый класс трактора 15 кН (точка *A*), а ширина модульных орудий составляет 2 м (точка *B*), то соответствующая точка факторного пространства *C* попадает между линиями уровня 2 и 3 р./м<sup>2</sup>, но ближе к линии уровня 2 р./м<sup>2</sup>. То есть, удельные экономические затраты составят около 2,3 р./м<sup>2</sup>.

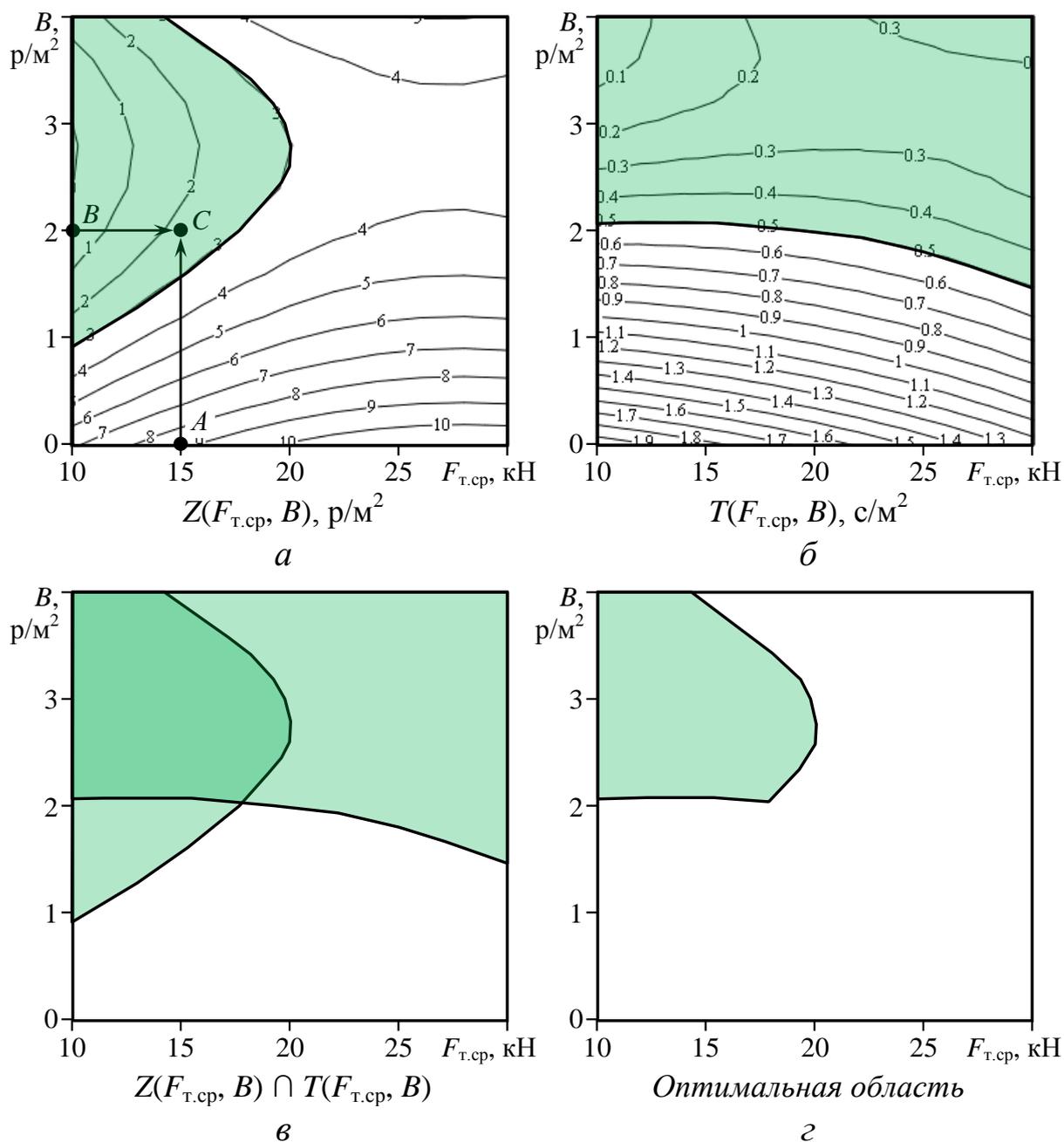


Рисунок 10 – Картограммы оптимизации параметров компоновки МТА, оснащенных модульными орудиями (затемнены благоприятные области факторного пространства)

На картограммах затемнены области благоприятного значения критериев:

низких удельных экономических затрат и малого удельного времени обработки. Пороговые значения для разделения на благоприятную и неблагоприятную области выбраны  $Z = 3 \text{ р./м}^2$  (рис. 10, а) и  $T = 0,5 \text{ с/м}^2$  (рис. 10, б) исходя из условий:

- благоприятная область занимает значительную долю факторного пространства;
- благоприятная область включает наименьшие значения критерия;
- граница между благоприятной и неблагоприятной областями представляет собой линию уровня на картограмме;
- благоприятные области всех критериев пересекаются между собой и пересечение занимает не менее 10 % факторного пространства.

Пересечение благоприятных областей (рис. 10, в) представляет собой оптимальную область, в которой одновременно учитываются требования минимума удельных экономических и временных затрат.

По расположению оптимальной области в факторном пространстве (рис. 10, г) можно сделать следующий вывод. Средний тяговый класс трактора должен составлять 10 ... 20 кН, оптимальная ширина модульного орудия должна составлять 2 ... 3 м. При этом удельные экономические затраты составят не более  $3 \text{ р./м}^2$ , удельное время обработки составит не более  $0,5 \text{ с/м}^2$ .

### **Выводы**

В работе представлен разработанный трехэтапный метод поиска оптимальной компоновки МТА модульными орудиями, позволяющий проанализировать все возможные варианты компоновки, исключить невозможные варианты по ограничивающим критериям и выбрать наиболее экономически выгодный вариант.

В приведенном примере наилучшим вариантом является вариант компоновки, который заключается в двух проходах МТА с шириной модульного орудия 2 м (два модуля в ряду). Первый проход осуществляется трактором тягового класса 3,0 т.с., с последовательно установленными глубокорыхлящим и плужным модулем. Второй проход осуществляется трактором тягового класса 1,4 т.с., с последовательно установленными культиваторным модулем и сажалкой. В этом случае удастся достигнуть минимальных среди всех вариантов экономических затрат  $2,826 \text{ р./м}^2$ .

Разработанный метод поиска оптимальных вариантов компоновки МТА предлагает большой выбор вариантов компоновки, близких к оптимальным. За счет этого предоставляется возможность учитывать дополнительные условия,

накладываемые особенностями конкретного экономического субъекта лесного комплекса.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00920

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Донцов, И. Е. Устойчивость движения МТА с орудиями фронтальной или задней навески // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2008. – № 9 – С. 31-34.

2 Бартенев И. М., Лысыч М. Н. Общая концепция блочно-модульного построения лесных почвообрабатывающих орудий // Тракторы и сельхозмашины. – 2019. – № 2. – С. 18-26.

3 Лысыч, М. Н. Моделирование колесных МТА с использованием специализированных приложений для инженерных расчетов // Воронежский научно-технический вестник. – 2019. – Т. 2, № 2 (28). – С. 143-151.

4 Орлов, А. И. Прикладная статистика. – М. : Экзамен, 2006. – 671 с.

5 Шмойлова, Р. А. Теория статистики. – 4 изд. – М : Финансы и статистика, 2004. – 656 с.

6 Адамов В. Е., Вергилес Э. В. Статистика промышленности : Учеб. пос. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 326 с.

7. Бикел П., Доксам К. Математическая статистика / Пер. с англ. – Вып.1. – М. : Финансы и статистика, 1983. – 278 с.

8 Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ : Подход с использованием ЭВМ. – М. : Мир, 1982. – 488 с.

9 Справочник по прикладной статистике. В 2-х т. Т.1 : Пер. с англ. / Под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана, Ю. Н. Тюрина. – М. : Финансы и статистики, 1989. – 510 с. Т. 2 : 1990. – 526 с.

10 Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ : В 2-х кн. Кн. 2 / Пер. с англ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Финансы и статистика, 1987. – 351 с.

11 Королев, Ю. Г. Метод наименьших квадратов в социально-экономических исследованиях. – М. : Статистика, 1980. – 112 с.

12 Статистическое моделирование и прогнозирование : Учеб. пособие / Г. М. Гамбаров, Н. М. Журавель, Ю. Г. Королев и др. / Под ред. А. Г. Гранберга. – М. : Финансы и статистика, 2000. – 340 с.