

## ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ЛЕСНОГО ДЕЛА

УДК 630\*624.3

*Ю. А. Ширнин, Н. И. Роженцова*

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЙ РУБОК ЛЕСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС

*Анализируется и автоматизируется процесс создания технологической карты разработки лесосеки с использованием ГИС и программных средств. Представлен алгоритм работы системы, позволяющей осуществлять выбор способов разработки лесосеки, а также процесс приведения лесосечных выделов к правильным геометрическим формам с последующим разбиением на делянки.*

**Введение.** Документом, регламентирующим технологию, организацию работ и охрану труда на лесосеке ( выделе ) является технологическая карта. При составлении карты используются материалы лесоустройств, абрис лесосеки, расчетные и нормативные показатели. Технологическая карта должна содержать: таксационные характеристики лесосеки, схему ее разработки с технологическими указаниями, отражающими порядок работы, технико-экономические показатели (ТЭП), сведения о проведении подготовительных работ [1].

На лесопромышленных предприятиях технологическую карту составляют без учета многочисленных факторов и вариантов технологических схем по готовому шаблону. Вместе с тем каждая лесосека имеет свои отличительные свойства: таксационные параметры, площадь, рельеф, форму и т.д.

На сегодняшний день рынок лесозаготовительной техники предлагает множество машин и механизмов как российских, так и зарубежных. Перед лесозаготовителем, взявшим в аренду площадь леса или модернизирующим свои основные фонды, встает вопрос о марке, виде приобретаемого оборудования, которое более всего подходит к условиям лесных участков. Возникает необходимость оценить возможность использования оборудования, занятого на лесозаготовках при работе его по различным технологическим схемам.

**Целью** настоящей работы является разработка процедуры оценки параметров лесосеки, выбора комплекта лесосечных машин и получение технологической карты в автоматическом режиме, используя средства, создающие возможность применения предложенного способа разработки к любой лесосеке. Для этого решаются следующие задачи: выявление и выбор признаков, характерных для различных схем разработки лесосек; представление разрабатываемого участка в виде фигуры (фигур) правильной геометрической формы; определение возможных и выбор оптимального, по заданному

критерию, способа разработки лесосеки; получение схематичного изображения схемы разработки лесосеки для конкретного участка.

### 1. Формирование данных для системы выбора

Способы разработки лесосеки определяются рядом условий, при которых возможно их применение [1–4]. Это может обуславливать возможность разработки участка только по одной схеме, либо по нескольким схемам или же не удовлетворять выбору ни одной. Условия или признаки могут быть общими для ряда участков, а могут принадлежать только одному выделу. Комбинация определенных условий дает представление о месте нахождения разрабатываемого участка, его таксационных характеристиках, почвенно-грунтовых условиях, условиях его размещения в квартале, рельефе местности и т.д. Исходя из сочетания всех имеющихся характеристик, необходимо принять обоснованное решение о выборе технологической схемы разработки лесосеки и комплекта машин.

Для решения данной задачи необходима оценка ряда возможных способов разработки лесосеки. Нужно выявить признаки, которые будут удовлетворять определенной технологической схеме, а именно той, для которой количество подходящих к ней признаков будет наибольшим, по сравнению с другими, альтернативными схемами. Для этой цели предлагается система выбора, реализованная в виде программы, написанной на языке VBA, способной учесть значительное количество оценочных показателей.

Анализировались схемы разработки лесосек, информация о которых содержится в [1–4]. Каждой схеме был присвоен определенный номер. Параметры, характеризующие разрабатываемый лесной участок и определяющие возможность его разработки по конкретной схеме, сведены в табл. 1.

Таблица 1

Оценочная таблица разрабатываемого лесного участка

Параметры, определяющие выбор схемы	Значения параметров	Схема									
		№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10
1. Возраст, лет	21-40	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	41-80	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
2. Класс бонитета, ед	1,1А	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2,3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	4,5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
3. Объем хлыста, м <sup>3</sup>	0,15-0,3	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
	0,31-0,55	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
	>0,55	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
4. Почвенные характеристики по категориям:	Первая (сухие пески, каменная почва)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Вторая (супеси, мелкие суглинки)	1	1	1	1	1	1		1	1	1
	Третья (глинистые, супеси с глинистыми прослойками)	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1
	Четвертая (торфянисто-болотные, перегнойно-глеевые)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Параметры, определяющие выбор схемы	Значения параметров	Схема									
		№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10
5. Рельеф (продольный уклон, °)	0-25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	26 и выше	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	овраг	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
6. Групповое распределение деревьев (подроста) на участке		0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
7. Вид трелюемой древесины	хлысты	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1
	сортименты	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1
9. Наличие подроста		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	1	1
10. Тяготение деланки к нескольким лесовозным усам		0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
11. Объем заготовки, м <sup>3</sup> /см на бригаду	20-25	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
	26-40	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	>=40	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Признаки, используемые при построении оценочной таблицы, могут быть либо бинарными, либо принимать значения в диапазоне от 0 до 1 в зависимости от уровня важности того или иного признака для данной технологической схемы. Состав оценочной таблицы может меняться и дополняться, в зависимости от требований, предъявляемых к данной программе.

## 2. Алгоритм работы системы выбора

Программа выбора схемы разработки лесосеки базируется на анализе признаков, характерных для каждой из возможных технологических схем и вынесении рекомендаций в пользу той схемы, которая в максимальной степени удовлетворяет набору признаков анализируемого участка. Для этого в признаковом пространстве формируется набор плоскостей, разделяющих это пространство на подобласти, соответствующие каждой из возможных схем разработки лесосеки. Решение принимается в результате анализа значений, получаемых путем подстановки значений признаков в уравнения разделяющих поверхностей:

$$y_j = \sum_{i=1}^M b_{ji} x_i, \quad j=1...N, \quad (1)$$

где  $N$  – количество анализируемых схем разработки;  $M$  – количество анализируемых признаков;  $b_{ji}$  – коэффициенты уравнений разделяющих поверхностей;  $x_i$  – значения признаков. После вычисления значений  $y_j$  для всех возможных схем система выносит суждение в пользу схемы с максимальным значением  $y_j$ . В качестве возможных альтернатив могут предлагаться схемы с ближайшими к лидеру значениями  $y_j$ .

Коэффициенты  $b_{ji}$  формируются путем последовательного сопоставления результатов выбора на примерах в соответствии со следующими правилами. Первоначально значения коэффициентов  $b_{ji}$  обнуляются. Затем системе предъявляется вектор  $\mathbf{x}$  параметров, соответствующий схеме с номером  $n$ . В результате вычисления и анализа значений вектора  $\mathbf{y}$  определяется номер схемы  $\hat{n} = j$ , соответствующей  $y_{j_{\max}}$ . Если  $\hat{n} = n$ , то значения коэффициентов  $b_{ji}$  на данном шаге оценки параметров не изменяются и системе предъявляется для анализа новый пример. Если  $\hat{n} \neq n$ , то значения коэффициентов корректируются по следующему правилу:

$$b_{ni} = b_{ni} + x_i, \quad i = 1 \dots M; \quad (2)$$

$$b_{ji} = b_{ji} - x_i, \quad i = 1 \dots M \text{ при } y_j \geq y_{j_{\max}}, \quad j \neq n. \quad (3)$$

Процесс сопоставления заканчивается после того, как по всем предъявляемым для обучения примерам будут вынесены правильные решения.

Алгоритм работы программы выбора схемы разработки лесосеки представлен на рис.1. При его разработке учитывалась методика, изложенная в [5]. ГИС [6] представлена в виде таблиц и карт: почвенной, рельефа, транспортной сети, групп лесов, категорий защитности, таксационных характеристик и т.д. Программа использует эти данные для оценки предложенных ей схем и вынесения решения по поставленной задаче (блок 2). Выбор конкретного участка для исследования осуществляется путем ввода его координат или обозначением на карте. Далее происходит определение границ участка и его размеров (блок 3), (методика изложена в разделе 3 настоящей статьи). Затем из слов (карт) ГИС происходит считывание значений всех необходимых для принятия решений признаков участка (блок 4). Программа позволяет лесопользователю задавать систему машин для разработки лесосеки. В этом случае работа системы будет осуществляться по программе, учитывающей вначале технологические характеристики оборудования, например, тип валочно-пакетирующей машины, а только затем возможные схемы разработки (блок 6,7).

Программа должна сформировать слой, в котором на основании полученных признаков (блок 8) будут представлены все рекомендуемые схемы для указанного участка (блок 9). Выбор конкретной схемы требует проведения экономических и технологических расчетов с целью оптимизации лесозаготовительных работ по заданному критерию. Методика расчета изложена в [7] (блок 10). В итоге выбирается технологическая схема, обеспечивающая минимальные затраты на лесозаготовку (блок 11). Результатом работы программы для поставленной задачи будет изображение рациональной технологической схемы разработки лесосеки по заданному критерию (блок 12).

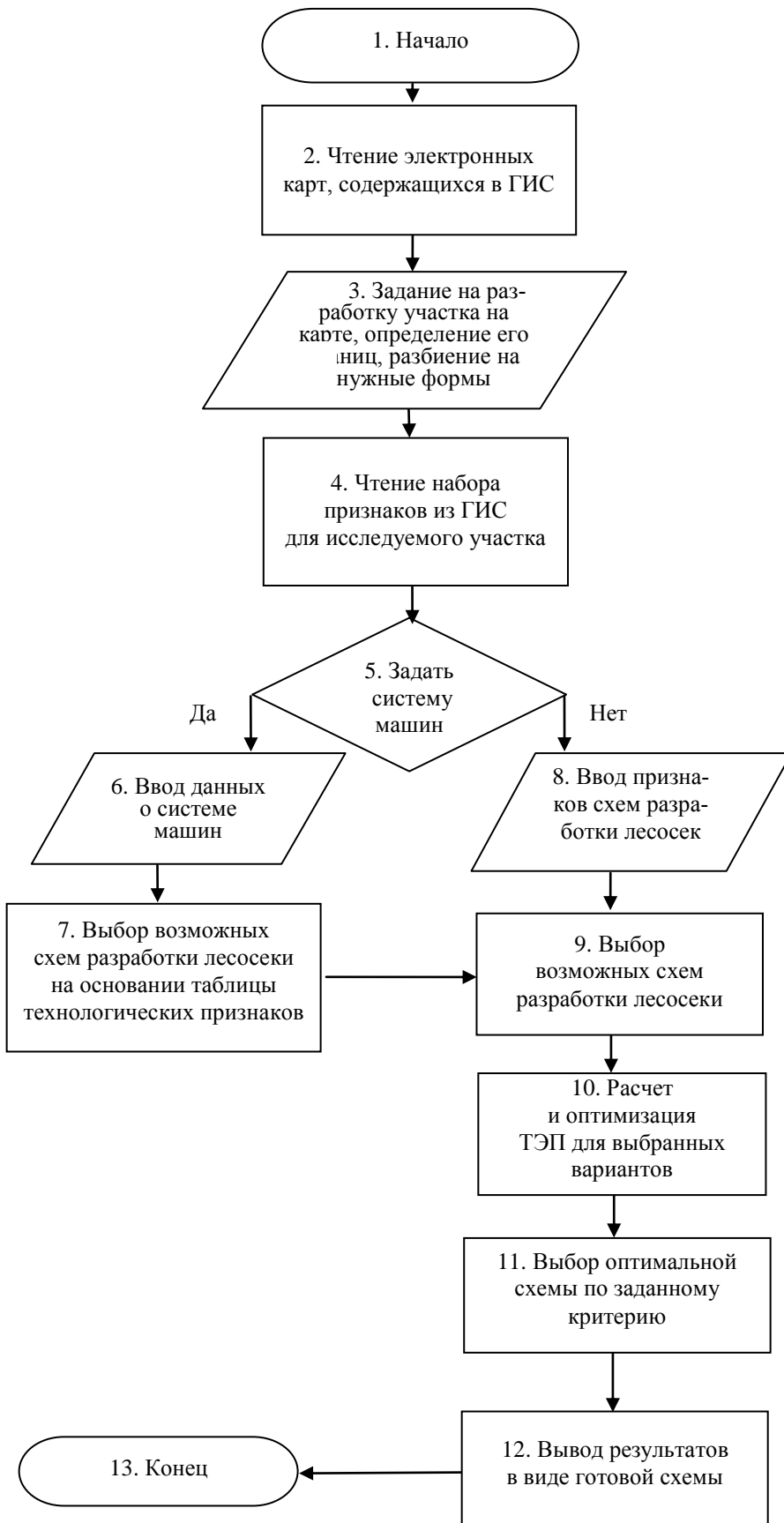


Рис.1. Алгоритм работы программы выбора схемы разработки лесосеки

### 3. Методика определения границ лесосеки

Все лесные и нелесные земли в пределах одного лесхоза представлены на планшетах по кварталам. Наряду с разбивкой на кварталы имеется разделение на выделы (условно отграниченная площадь, отличающаяся по ряду признаков от окружающих ее участков). Выделы с произрастающим на нем древостоем подвергаются различным видам рубок определенной интенсивности. Разбиение привязывается к границам выделов. Большинство лесных участков, на которых проводятся рубки, имеют неправильную, с точки зрения геометрии, форму. Для наложения на лесосеку технологической схемы ее разработки необходимо привести ее границы к прямолинейной форме, а затем разбить всю площадь на делянки и пасеки. Это разделение необходимо для рационального проведения рубок с учетом технологических, экономических, лесоводственных, лесозащитных и прочих критериев.

Задача состоит в том, чтобы, используя существующую информацию в ГИС в виде карт лесного фонда, производить автоматическое разбиение лесосек и делянок на участки правильной геометрической формы, на которые можно впоследствии наложить соответствующую технологическую схему разработки.

В основу автоматического разбиения лесосек на правильные геометрические формы был взят алгоритм триангуляции (разбиения фигур на треугольники). Исследовались правильные и неправильные выделы различной формы, с наличием прямолинейных и криволинейных участков. На первом этапе обработке в контуре участка выделяются прямолинейные фрагменты. Вторым этапом является объединение точек, задающих концы прямолинейных фрагментов, в треугольники и формирование описанных окружностей вокруг них. Третий этап – это выбор треугольников, описанная окружность которых не содержит внутри себя других точек (вершин). Уравнение значений радиуса  $R$  и координат центра описанной окружности  $(x_0; y_0)$  было выведено из системы уравнений (3.1), полученной на основе уравнения окружности.

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^3 ((x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2 - R^2) = 0 \\ \sum_{n=1}^3 ((x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2 - R^2)(y_n - y_0) = 0, \\ \sum_{n=1}^3 ((x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2 - R^2)(x_n - x_0) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

где  $x_n; y_n$  – координаты вершин треугольника;  $R$  – радиус описанной окружности;  $n$  – количество вершин.

После решения системы уравнений (4), были получены уравнения (5) и (6) центра описанной окружности, (7) – радиуса описанной окружности:

$$x_0 = \frac{1}{2} \left( \frac{x_1 x_3^2 - x_2 x_3^2 - x_3 y_1^2 + x_3 x_2^2 + x_3 y_2^2 - x_3 x_1^2 + x_2 x_1^2 - x_2 y_1^2 + x_1 y_3^2 - x_1 x_2^2 - x_1 y_2^2}{x_1 x_3 - y_2 y_3 + y_2 x_1 - y_3 x_1 - y_1 x_2 + y_3 x_2} \right); \quad (5)$$

$$y_0 = \frac{1}{2} \left( \frac{x_2 y_1^2 - x_3 y_1^2 - x_1 x_2^2 - x_1 y_2^2 + x_1 y_3^2 - x_2 x_3^2 - x_3 x_1^2 + x_3 x_2^2 + x_2 x_1^2 + x_1 x_3^2 - x_2 y_3^2 + x_3 y_2^2}{y_1 x_2 - y_1 x_3 + y_2 x_3 - y_2 x_1 - y_3 x_2 + y_3 x_1} \right); \quad (6)$$

$$R \leftarrow \sqrt{\frac{2}{3} \sum_{n=0}^2 \sqrt{(x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2}}. \quad (7)$$

Далее рассматриваются все комбинации групп из смежных треугольников и выбирается комбинация, содержащая фигуры, наиболее близкие по форме к геометрически правильным. Для этого использовалась методика контурного анализа [8].

Эталонная фигура и анализируемая комбинация треугольников представляются внешним контуром, задаваемым комплекснозначным кодом. В качестве эталонных задаются фигуры в виде квадратов, прямоугольников, трапеций, ромбов, правильных треугольников. Для каждой комбинации треугольников вычисляется ее мера схожести  $\eta_{m,j}$  в виде модуля нормированного скалярного произведения со всеми правильными фигурами:

$$\eta_{m,j} = \left| \sum_{n=0}^{k-1} v_j \langle \gamma_m^* | \zeta \rangle / \|\Gamma_m\| \|\mathbf{N}_j\| \right|, \quad m=0,1,\dots,M-1, \quad j=0,1,\dots,J-1, \quad (8)$$

где  $\Gamma_m$  и  $\mathbf{N}_j$  – контуры эталонной геометрической фигуры и комбинации треугольников соответственно;  $M$  – количество эталонных фигур правильной формы;  $m$  – номер эталона;  $J$  – количество групп треугольников;  $j$  – номер группы;  $v_j \langle \zeta \rangle$  – элементарные векторы контура комбинации треугольников;  $\gamma_m \langle \zeta \rangle$  – элементарные векторы контуров эталонных фигур. Для выравнивания размерностей контуров эталонов и контуров комбинаций треугольников перед вычислением меры схожести выполняется процедура эквализации (спрямления) контуров. Среди всех эталонных фигур выбирается одна, соответствующая максимальному значению величины  $\eta_{m_{\max},j}$ . Данная процедура повторяется для всех групп треугольников при текущем разбиении фигуры участка, после чего вычисляется интегральный показатель качества для данного разбиения

$$\eta = \sum_{j=0}^{J-1} \eta_{m_{\max},j} / J. \quad (9)$$

После перебора всех возможных разбиений участка на группы выбирается разбиение с максимальным значением величины  $\eta$ .

На рис.2. представлен участок (выдел № 39), на примере которого проводилось разделение на деланки правильной геометрической формы.

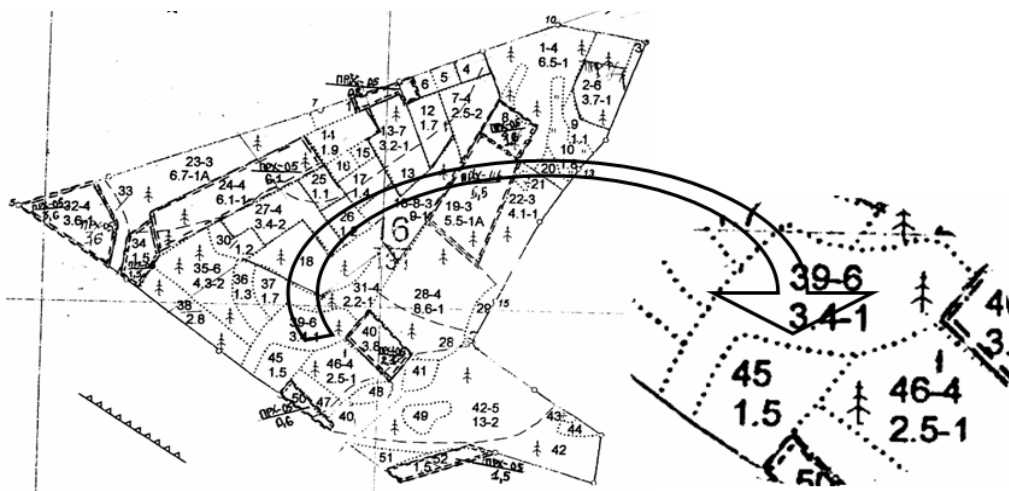


Рис. 2. Пример выбора случайного выдела с целью приведения его форм к геометрически правильным

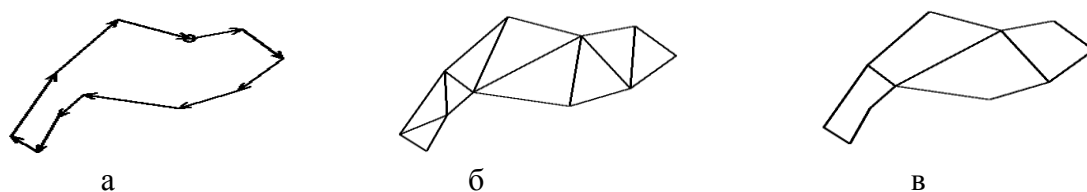


Рис. 3. Разбиение участка по методу триангуляции:  
 а – выделение прямолинейных фрагментов на контуре участка; б – процесс разбиения выдела на треугольники; в – результат разбиения

#### 4. Выбор вариантов схем разработки лесосеки

Процесс выбора того или иного способа разработки основан на анализе всех признаков, которые принадлежат или не принадлежат заложенным в табл. 1 схемам. Такая оценка дается программой после проведения ряда технологических и экономических расчетов, которые определяют уровень затрат на заготовку древесины при работе по выбранным схемам. В качестве примера работы программы был выбран лесной участок – выдел № 18, квартал № 16 Санчурского лесничества со следующими характеристиками, представленными в табл. 2:

Таблица 2

#### Характеристики выдела

Показатель	Значение показателя
Площадь, га	2,6
Порода	сосна
Возраст древостоя, лет	51
Средний объем хлыста, м <sup>3</sup>	0,38
Бонитет, ед.	I
Рельеф	равнина
Запас, м <sup>3</sup> /га	270
Состав подроста, ед. (характеристики)	10Е (высота 1,5 м, 2000 штук на 1га)
Вид ухода	проходная рубка
Изреживание, %	40

Тип условий местопроизрастания (ТУМ) – С2 (свежий сугрудок по классификации П.С. Погребняка). В табл. 1, показатели которой определяют решения программы, нет элемента ТУМ. Необходимо ТУМ привести к почвенной классификации по категориям [9] (табл. 1, показатель № 4). Поскольку сугрудок (С) характеризуется как богатая суглинистая почва, показатель 2 относится к категории «свежий», исходя из ряда гидротопов [4, с. 85]. На этом основании возможно отнесение данного участка ко второй категории, а именно: супеси, мелкие суглинки.

Методика расчета таксационных показателей лесосек изложена в [7]. Представленные выше характеристики участка для осуществления расчетов берутся из базы данных ГИС, где они представлены в табличной форме. Значение любого элемента занимает определенную ячейку таблицы со своим адресом. Адресация необходима для связи данных о выделе, содержащихся в ГИС с программой, принимающей решение о выборе схем разработки.

На основании методики, изложенной в главе 2 настоящей статьи, системой было предложено пользователю четыре варианта схем: №2, №5, №7, №8. В представленном



примере в работу программы было введено так называемое дисциплинирующее условие [10], выраженное в виде условия: трелевка осуществляется сортиментами.

Следующим этапом является расчет экономических затрат по каждой предложенной схеме. Механизм расчета себестоимости и ТЭП изложен в [7]. Производительность машин и оборудования, занятого на лесозаготовке, рассчитывается по методике, изложенной в [1,2,3], ее расчет также рассмотрен в [7].

### 5. Процесс выбора оптимального способа разработки лесосеки. Наложение изображения готовой схемы на разрабатываемый участок

Проведенный расчет экономических показателей для определения себестоимости лесозаготовительных работ по каждому из предложенных вариантов является основой для выбора одного или нескольких оптимальных. Из четырех предложенных, исходя из значения затрат, программа выбрала схему № 2. Способ разработки по этой схеме предполагает использование бензопил на валке и раскряжевке, форвардер – на трелевке. Вариантов сочетания таких машин и механизмов на лесоразработке может быть достаточно много. В связи с этим расчеты проводились для техники российского производства, имеющей широкое распространение на лесозаготовительных работах, а именно валка – б/п типа МП – 5 Урал 2; обрезка сучьев и раскряжевка – б/п типа Крона – 202, Тайга – 214, Хускварна – 242ХР; трелевка – форвардер ТБ–1–16. Величина исследуемой себестоимости заготовки леса по данной схеме составляет 300 рублей на один кубометр древесины. Результатом работы системы выбора является схема разработки лесосеки, представленная на рис. 4.

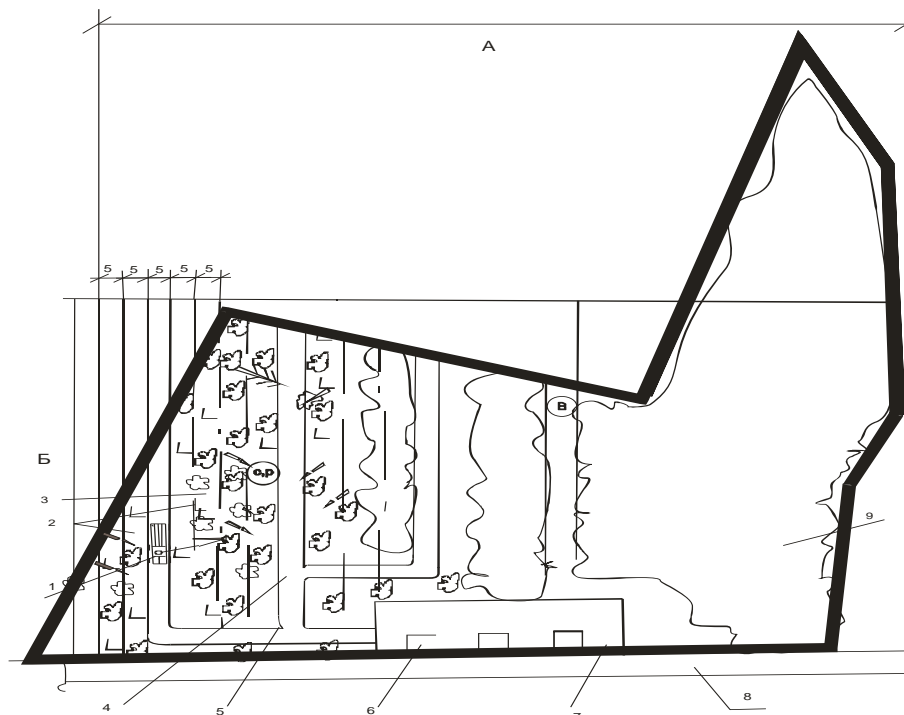


Рис. 4. Схема разработки лесосеки: A, B – ширина и длина лесосеки; 1 – форвардер; 2 – лента, примыкающая к волоку; 3 – отдаленная лента; 4 – сортименты; 5 – магистральный волок; 6 – штабель сортиментов; 7 – погрузочный пункт; 8 – ус лесовозной дороги; 9 – неразработанный участок лесосеки; C, P – обрезчик сучьев и раскряжевщик; B – вальщик

Технологическая карта разработки лесосеки наряду со схемой разработки подразумевает и содержание сведений о количестве рабочих в лесозаготовительной бригаде, единицах техники для проведения заготовок, сменности и проч. Эти данные берутся исходя из расчета ТЭП использования машин и механизмов.

**Выводы.** Разработан алгоритм и программа системы выбора технологий рубок леса в автоматическом режиме, отличающаяся использованием данных ГИС и сопоставлением по одиннадцати параметрам, характеризующим разрабатываемый участок. Выбор конкретной схемы базируется на расчетах, учитывающих прогнозируемые экономические и лесохозяйственные показатели, получаемые при ее реализации.

Предложена математическая модель преобразования криволинейных участков контура выдела в прямолинейные.

Использование предлагаемых методик и базирующихся на них программных продуктов позволяет анализировать весь комплекс мероприятий, связанных с созданием технологических карт разработки лесосек.

### Список литературы

1. *Ширнин, Ю.А.* Технология и оборудование малообъемных лесозаготовок и лесовосстановление: учеб. пособие / Ю.А. Ширнин, Ф.В. Пошарников. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2001. – 398 с.
2. Технология и эффективность рубок с естественным возобновлением леса: учеб. пособие / Ю.А. Ширнин, Е.И. Успенский, А.С. Белоусов. – Йошкар-Ола: МарПИ, 1991. – 100 с.
3. *Ширнин, Ю.А.* Технология и машины лесосечных работ: курс лекций / Ю.А. Ширнин. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004. – 304 с.
4. *Набатов, Н.М.* Лесоводство: учеб. пособие. 2-е изд., испр. и дополн. / Н.М. Набатов. – М.: МГУЛ, 2002. – 192 с.
5. *Нейлор, К.* Как построить свою экспертную систему / К. Нейлор; пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 286 с.:ил.
6. *Бугаевский, Л.М.* Геоинформационные системы: учеб. пособие для вузов / Л.М. Бугаевский, В.Я. Цветков. – М., 2000. – 222 с.,ил. 28.
7. Методика обоснования рационального плана рубок промежуточного пользования / Ю.А. Ширнин, Н.И. Роженцова. – Йошкар-Ола: Марийск. гос. техн. ун-т. – 2006. – 22 с.: ил. – Библиогр.: 11 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 20.12.06 № 1588 – В2006.
8. Введение в контурный анализ; приложения к обработке изображений и сигналов / Я.А. Фурман, А.В. Кревецкий, А.К. Передреев и др.; под ред. Я.А. Фурмана. – 2-е изд. испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – ISBN 5-9221-0374-1. ISBN 5-7120-2258-2.
9. *Возный, В.П.* Машина трелевочная ЛП-18-А и ее модификации / В.П. Возный, П.А. Кожевников, Б.С. Лозицкий. – М.: Лесн. промышленность, 1990. – 176 с.
10. *Венцель, Е.С.* Исследование операций: задачи, принципы, методология / Е.В. Венцель. – М.: Наука, 1980. – 208 с.

Поступила в редакцию 12.04.07.