

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛЕСОСЕК ДЛЯ СПЛОШНЫХ РУБОК ГЛАВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

The algorithm for delineation of cut units for final felling in the GIS environment is proposed. The principle of its functioning is described in case of employing area or width constraints for cut units. The delineation of cut units was made for 4 parts of Petrykovski and Rossonski forest enterprises.

The quantity of cut units ranges from 110 to 431 in case of width constraints, and from 36 to 193 for area constraints. About 2,5 time increase of mean area of cut unit was detected while employing area constraints. The form of cut units is closer to rectangular in case of width constraints, but their compactness is slightly lower. The proposed algorithm may be useful for shaping cut units while optimizing their scheduling for final felling in GIS environment.

Введение. Одним из этапов составления плана рубок главного пользования является определение размещения и формы будущих лесосек. Размещение лесосек в значительной степени предопределено расположением и конфигурацией таксационных выделов, составляющих эксплуатационный фонд. Вместе с тем отдельные выделы, отграниченные при лесоустройстве, могут иметь площадь, которая превышает максимально допустимую площадь лесосеки согласно правилам рубок [1]. Проведение сплошноучастковой рубки на всей площади таких выделов не допускается, а для проведения сплошнолесосечных полосной рубки требуется предварительно выполнить разделение выделов на лесосеки – нарезку лесосек. В настоящей работе предлагаются 2 алгоритма для решения этой задачи.

Литературный обзор. Вопросу автоматизированного формирования лесосек посвящено ряд работ. К. Баррет представил метод разбиения исходных участков на лесосеки с использованием диаграммы Вороного (Voronoi tessellation) [2]. В качестве критериев разделения использовались площадь и компактность лесосек. Автор отмечает, что эффективность метода зависит от способа создания лесных карт, способов рубок и специфических условий территории, таких как рельеф, дороги и типы леса.

Дж. Нельсон выполнил сравнение результатов долгосрочного планирования рубок при использовании лесосек, сформированных программно и на основании ручного проектирования [3]. Деление участков выполнялось путем оценки разных положений разделяющей линии, соединяющей 2 вершины полигона.

Дж. Борджес и Х. Хогансон исследовали влияние формы лесосек на пространственные характеристики ландшафта и доходы от проведения лесопользования [4]. Сравнивались стратегии нарезки лесосек, ведущие к максимальной и минимальной фрагментации ландшафта, а также к уменьшению затрат на соблюдение сроков примыкания лесосек.

В работах [5, 6] авторы представили алгоритмы для формирования динамических хозяй-

ственных участков на основании растрового представления лесного покрова. Хозяйственные участки формируются из совокупности смежных пикселей изображения в процессе оптимизационных вычислений. Границы таких участков могут изменяться в течение периода планирования.

Е. В. Лопатин [7] разработал автоматизированную процедуру нарезки лесосек в рамках программного комплекса для составления плана рубок. Нарезка выполняется на основании заданных значений ширины, площади или длины лесосеки.

Алгоритм нарезки с контролем по площади. Алгоритм реализует дихотомическое деление исходного выдела до тех пор, пока лесосеки, образовавшиеся после очередной его итерации, не соответствуют требованиям по площади. Для определения положения разделяющей линии оцениваются различные варианты деления. Целевой функцией является минимизация длины разделяющей линии с учетом штрафов за отклонения от установленного направления нарезки, отклонения от оптимальной площади и за раздробленность получаемых лесосек:

$$z = l \left(1 + p_\alpha |\alpha_{\text{опт}} - \alpha| \right) \left(1 + p_f \left| 1 - \frac{f}{f_{\text{опт}}} \right| \right) \times \left(1 + p_d (n - 1) \right), \quad (1)$$

где l – длина разделяющей линии, м; p_α , p_f , p_d – величина штрафов за отклонения от оптимального угла, оптимальной площади лесосеки и за раздробленность соответственно; α , $\alpha_{\text{опт}}$ – текущий и оптимальный углы нарезки; f , $f_{\text{опт}}$ – текущая и оптимальная площади лесосеки, га; n – количество частей отделяемой лесосеки. Оптимальная площадь лесосеки рассчитывается по формуле

$$f_{\text{опт}} = \frac{f}{n_{\text{min}}}, \quad (2)$$

где n_{min} – минимальное число лесосек, на которые должен быть разделен выдел для выполнения лесоводственных требований.

Алгоритм отграничения одной лесосеки включает следующие этапы.

1. Определение минимальной и максимальной площади для отделяемой лесосеки. Максимальная площадь лесосеки устанавливается правилами рубок в зависимости от преобладающей породы и группы лесов. Минимальная площадь рассчитывается по формуле

$$f_{\min} = f - f_{\max} (n_{\min} - 1), \quad (3)$$

где f – площадь исходного выдела, га; f_{\max} – максимальная площадь лесосеки, га.

Отграничение лесосеки площадью меньше f_{\min} приведет к росту числа образованных лесосек.

2. Определение пределов, в которых может находиться разделяющая линия, для заданного угла нарезки. Первоначально определяется горизонтальная линия, проходящая через центр полигона (линия АВ на рис. 1). Каждому из положений некоторой точки С на отрезке АВ соответствует площадь полигона, лежащего слева от разделяющей линии. Задача сводится к нахождению таких точек C_1 и C_2 , что при прохождении через них разделяющей линии под заданным углом область полигона слева от линии деления окажется равной соответственно минимальной f_{\min} и максимальной f_{\max} площадям, определенных на предшествующем этапе. Схема алгоритма, используемого для нахождения этих точек, приведена на рис. 2.

Алгоритм основывается на последовательном сужении пределов, в которых может находиться искомая точка. Уточненное положение точки на очередной итерации рассчитывается по формулам:

$$X = X_r - \frac{(f_g - f_r)(X - X_r)}{(f - f_r)}, \quad (4)$$

$$X = X_l + \frac{(f_g - f_l)(X - X_l)}{(f - f_l)}, \quad (5)$$

где X_l, X_r – абсциссы левого и правого пределов положения точки деления соответственно, м; f_g – искомая площадь лесосеки, га; f_l, f_r – площади лесосеки для левого и правого пределов

положения точки деления, га; X – абсцисса текущего положения точки деления, м; f – площадь лесосеки при текущем положении точки деления, га.

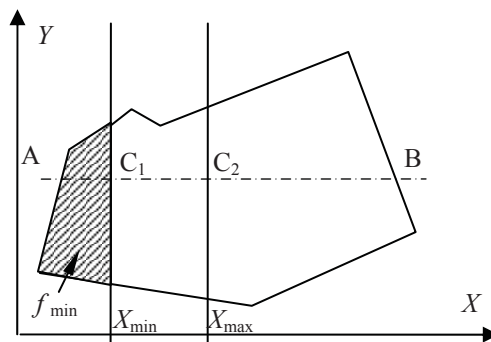


Рис. 1. Определение пределов для разделяющей линии

Когда площадь лесосеки отличается от искомой менее чем на величину допустимой ошибки, алгоритм прекращает свою работу и возвращает положение точки деления.

3. Оценка заданного числа вариантов положения разделяющей линии. Абсцисса i -й точки деления определяется по формуле

$$X_i = X_{\min} + \frac{i(X_{\max} - X_{\min})}{k}, \quad (6)$$

где X_{\min}, X_{\max} – абсциссы точек C_1 и C_2 соответственно, м; k – количество оцениваемых вариантов деления для каждого угла нарезки.

Этапы 2 и 3 повторяются для разных углов нарезки в диапазонах, установленных правилами рубок. Вариант деления с наименьшим значением целевой функции считается оптимальным. Линии деления, проверяемые алгоритмом для выполнения одного деления, представлены на рис. 3.

Для выделов с большой длиной с севера на юг алгоритм позволяет первоначально выполнить деление в направлении запад – восток. Длину выдела, начиная с которой следует выполнять такое деление, можно задавать в виде параметра. Принципы работы алгоритма в этом случае остаются прежними.

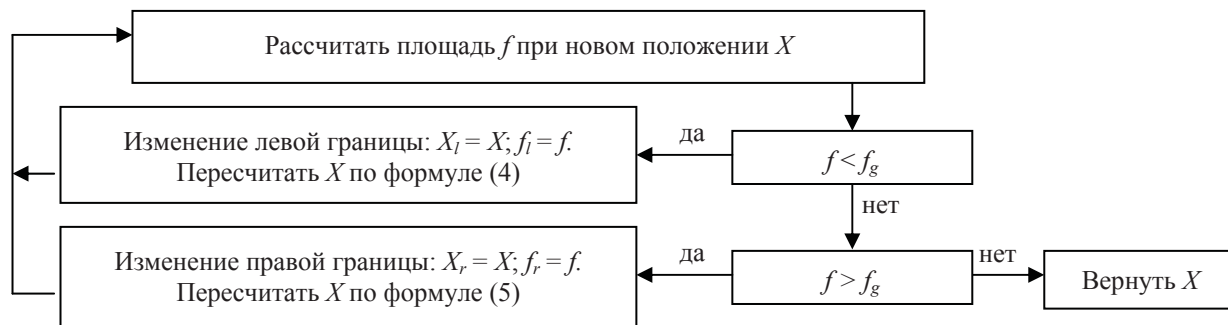


Рис. 2. Алгоритм определения пределов для положения точки деления

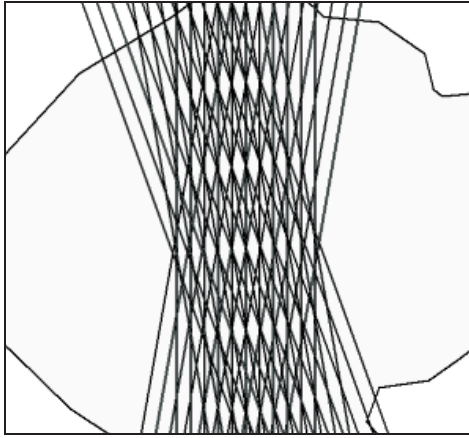


Рис. 3. Возможные линии деления для отграничения одной лесосеки

Алгоритм нарезки с контролем по ширине лесосеки. В случае каждой из отграничиваемых лесосек определяются пределы, в которых может находиться ее ширина. Максимальная ширина лесосеки устанавливается в правилах рубок. Минимальная ширина w_{\min} рассчитывается по формуле

$$w_{\min} = w - w_{\max} (n - 1), \quad (7)$$

где w – текущая ширина лесосеки, м; w_{\max} – максимальная ширина лесосеки, м.

Чтобы избежать нарезки слишком узких лесосек, минимальная ширина устанавливается не меньше, чем половина максимальной ширины. Оптимальная ширина $w_{\text{опт}}$ определяется как среднеарифметическое значение между минимальной и максимальной.

На следующем этапе возможные положения разделяющей линии, лежащие в установленных пределах, оцениваются в соответствии с целевой функцией. Вместо штрафа за отклонение от площади лесосеки в ее состав вводится множитель, начисляющий штраф за отклонение от оптимальной ширины нарезки:

$$z = l \left(1 + p_b \left| \bar{b}_{\text{опт}} - \bar{b} \right| \right) \left(1 + p_w \left| 1 - \frac{w}{w_{\text{опт}}} \right| \right) \times \left(1 + p_d (n - 1) \right), \quad (8)$$

где p_w – штраф за отклонения по ширине.

Методы и объекты исследования. Рассмотренные алгоритмы были реализованы в программе, написанной автором с использованием картографической библиотеки MapWinGis 4.6. Для проверки алгоритмов была выполнена нарезка лесосек для 2 лесничеств Петриковского лесхоза (Кошевичское и Сметаничское) и 2 лесничеств Россонского лесхоза (Руднянское и Соколищанское). Исходными данными послужили векторные слои с таксационными выделами и повидельные базы данных проектов геоинформационной системы (ГИС) «Лесные ресурсы». Нарезке подвергались участки эксплуатационного фонда второй группы лесов с площадью выше предела, установленного правилами для проведения сплошноучастковых рубок. Данный норматив составляет 10 га для хвойных, 5 га для твердолиственных, 15 га для мягколиственных насаждений.

Для каждого из лесничеств использовались 4 варианта нарезки лесосек, характеристика которых приведена в табл. 1. Для первых 2 вариантов ширина лесосеки устанавливалась равной 100 м. В случае контроля по площади лесосеки (варианты 3, 4) использовались ограничения, приведенные выше. При использовании разных направлений нарезки (варианты 2, 3) предпочтительным устанавливалось направление СЗ 0°.

Для характеристики разных вариантов нарезки оценивались количество лесосек и их средняя площадь, а также индексы формы. Первый индекс формы I_1 для совокупности лесосек рассчитывался по формуле

$$I_1 = \frac{\sum_{i=1}^m (0,25 p_i)^2}{\sum_{i=1}^m f_i}, \quad (9)$$

где p_i – периметр i -й лесосеки, м; f_i – площадь i -й лесосеки, м²; m – количество нарезанных лесосек.

Значение данного индекса увеличивается с ухудшением формы лесосек. Для лесосеки квадратной формы величина индекса будет равна 1.

Второй индекс формы I_2 рассчитывался как отношение минимальной площади прямоугольника, описанного вокруг лесосеки, к площади самой лесосеки. Для лесосеки прямоугольной формы величина индекса будет равна 1.

Таблица 1

Варианты нарезки лесосек

Вариант нарезки	Способ контроля	Угол нарезки	Предельная длина в направлении север – юг
1	По ширине (100 м)	СЗ 0°	Не устанавливалась
2	По ширине (100 м)	СЗ 45° – СВ 20°	Не устанавливалась
3	По площади	СЗ 45° – СВ 20°	Не устанавливалась
4	По площади	СЗ 0°	500 м

Результаты. Характеристика вариантов нарезки лесосек приведена в табл. 2. Время расчетов составило от 1 до 15 с и увеличивалось с ростом числа исходных выделов, а также при использовании нескольких углов нарезки (варианты 3, 4). Величина лесосек оказалась в 2–3 раза больше в случае контроля по площади по сравнению с вариантами 1, 2. Использование контроля по ширине привело к формированию лесосек средней площадью около 2,5 га, что значительно меньше предельно допустимой площади для сплошных рубок во второй группе лесов для всех пород [1]. Средняя площадь лесосеки при использовании контроля по площади оказалась существенно больше – около 8–9 га для Россонского лесхоза, где преобладают хвойные и мягколиственные насаждения, и порядка 5–6 га для Петриковского, где существенную долю составляют насаждения дуба.

Использование разных углов нарезки при контроле по ширине в большинстве случаев привело к уменьшению средней площади лесосеки (на 0,06–0,17 га). Путем улучшения этого варианта алгоритма может стать выбор угла нарезки, исходя из минимизации числа лесосек, образуемых после деления.

При контроле по ширине форма участков чаще всего близка к вытянутому прямоугольнику, о чем свидетельствует сравнительно большие значения I_1 (1,8–2,4) и малые значения I_2 (1,4–1,7). Для вариантов 3, 4 форма лесосек менее близка к прямоугольной, что проявляется в больших значениях I_2 (1,5–1,9). При использовании 500-метрового ограничения макси-

мальной длины лесосеки в направлении север-юг повышается как компактность лесосек I_1 , так и близость их формы к прямоугольнику I_2 .

Примеры лесосек, сформированных при разных вариантах нарезки, приведены на рис. 4. Выделы представляют собой насаждения сосны для вариантов 1, 2 и насаждения дуба для вариантов 3, 4. Размеры и форма приведенных лесосек соответствуют используемым параметрам алгоритма: не превышает 100-метровая ширина лесосеки для вариантов 1, 2 и максимальная площадь лесосеки для вариантов 3 и 4.

Заключение. В настоящей работе были предложены алгоритмы для выполнения нарезки лесосек. Результаты расчетов свидетельствуют о гибкости алгоритмов и возможности формирования лесосек, отвечающих требованиям правил рубок.

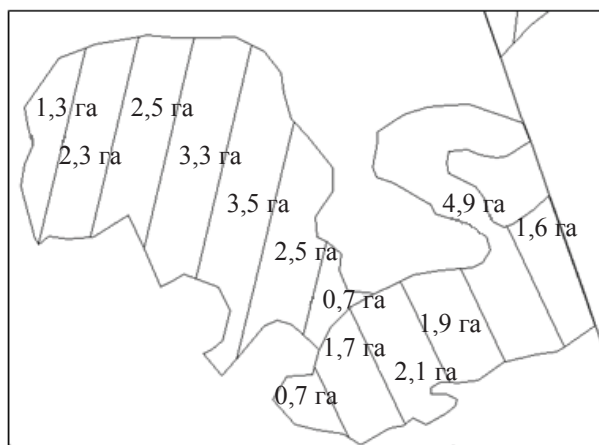
Интерес представляет использование контроля по площади лесосеки в сочетании с контролем по ширине, если это оправдано с точки зрения лесоводства. Последняя редакция правил рубок [1] отменяет ограничения по ширине лесосеки для сплошных рубок при малой площади нарезаемых лесосек (3 га для хвойных и мягколиственных пород и 1 га для твердолиственных пород). Реализация подобного смешанного контроля при выполнении нарезки лесосек является путем усовершенствования алгоритма.

Лесосеки, формируемые автоматизированным путем, следует рассматривать как первоначальный вариант нарезки, который должен подвергаться корректировке в ручном режиме с учетом дополнительных факторов [2, 3].

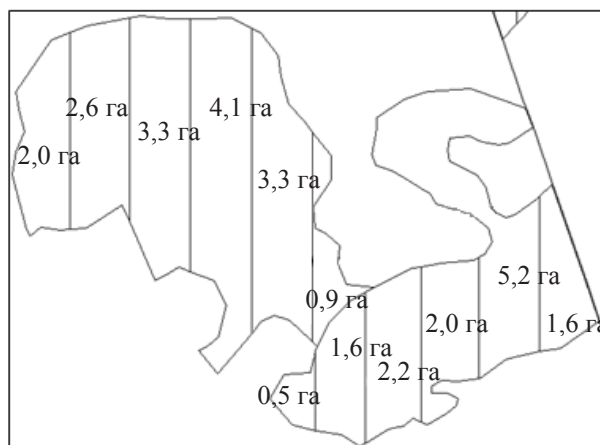
Таблица 2

Характеристика сформированных лесосек

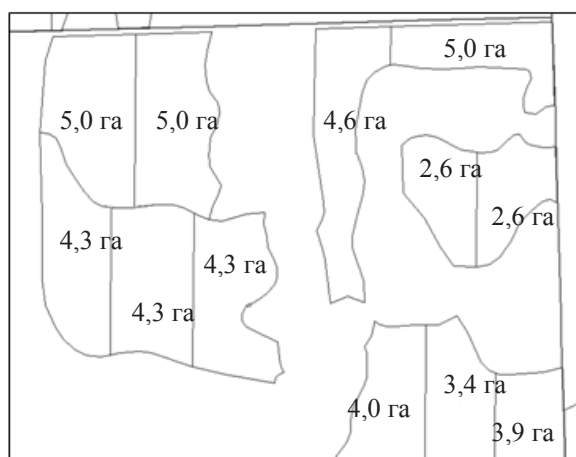
Вариант нарезки	Количество выделов для нарезки	Количество лесосек	Средняя площадь лесосеки, га	Индекс формы I_1	Индекс формы I_2
Кошевичское лесничество, Петриковский лесхоз					
1	71	431	2,21	1,887	1,387
2		443	2,14	1,886	1,477
3		167	5,96	1,762	1,652
4		167	5,66	1,802	1,717
Сметаническое лесничество, Петриковский лесхоз					
1	62	376	2,75	2,240	1,349
2		400	2,58	2,146	1,486
3		192	5,35	2,036	1,571
4		192	5,41	1,678	1,548
Руднянское лесничество, Россонский лесхоз					
1	17	114	2,47	1,973	1,375
2		122	2,31	1,896	1,431
3		37	7,63	1,805	1,692
4		37	7,63	1,633	1,633
Соколищанское лесничество, Россонский лесхоз					
1	16	110	2,78	2,435	1,703
2		105	2,91	2,555	1,803
3		36	8,49	2,563	1,931
4		36	8,49	2,163	1,824



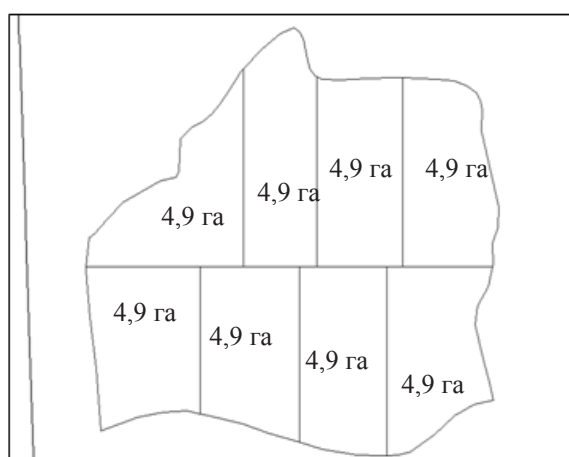
Вариант 1



Вариант 2



Вариант 3



Вариант 4

Рис. 4. Примеры нарезки лесосек

Сформированные лесосеки могут служить основой для оптимизации очередности назначения участков в рубку главного пользования. При этом обеспечивается возможность соблюдения лесоводственных требований, анализа пространственного размещения лесосек и визуализации плана рубок в ГИС. Кроме того, метод может использоваться для оценки влияния лесоводственных нормативов на форму и величину выделов, а также для выполнения долгосрочных прогнозов пространственной структуры лесных массивов [3, 4].

Литература

1. Правила рубок леса в Республике Беларусь. – Минск, 2008. – 93 с.
2. Barret, T. M. Voronoi tessellation methods to delineate harvest units for spatial forest planning / T. M. Barret // *Can. J. For. Res.* – 1997. – Vol. 27. – P. 803–810.
3. Nelson, J. Assessment of harvest blocks generated from operational polygons and forest

cover polygons in tactical and strategic planning / J. Nelson // *Can. J. For. Res.* – 2001. – Vol. 31 (4). – P. 682–693.

4. Borges, J. G. Assessing the impact of management unit design and adjacency constraints on forestwide spatial conditions and timber revenues / J. G. Borges, H. M. Hoganson // *Can. J. For. Res.* – 1999. – Vol. 29. – P. 1764–1774.

5. Lu, F Formation of harvest units with genetic algorithms / F. Lu, L. O. Eriksson // *Forest Ecol. Manage.* – 2000. – Vol. 130. – P. 57–67.

6. Holmgren, P. Applying objectively estimated and spatially continuous forest parameters in tactical planning to obtain dynamic treatment units / P. Holmgren, T. Thuresson // *For. Sci.* – 1997. – Vol. 43(3). – P. 317–326.

7. Лопатин, Е. В. Автоматизированная подготовка проектов организации рубок главного пользования на основе анализа лесохозяйственной информации в геоинформационных системах / Е. В. Лопатин // *Тр. Сыктывкарского лесн. ин-та.* – Сыктывкар: СЛИ, 2002. – С. 30–36.