

Леса России и хозяйство в них. 2026. № 1 (96). С. 4–15.

Forests of Russia and economy in them. 2026. № 1 (96). P. 4–15.

Научная статья

УДК 630*181.5

DOI: 10.51318/FRET.2026.96.1.001

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ КАРТИРОВАНИЕ ДРЕВОСТОЕВ

**В. В. Фомин¹, А. П. Михайлович², Е. М. Агапитов³, В. Е. Рогачев⁴,
Е. А. Костоусова⁵, Е. Б. Коритняк⁶, С. П. Паршин⁷, Д. Д. Стратонов⁸, Ю. О. Сайко⁹**

¹⁻⁸ Уральский государственный лесотехнический университет,

Екатеринбург, Россия

¹⁻⁴ Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

⁹ Свердловский областной медицинский колледж, Екатеринбург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Валерий Владимирович Фомин,

fominvv@m.usfeu.ru

Аннотация. Разработана и апробирована методика автоматизированного картирования древостоев на основе точно распределенных данных о местоположении деревьев в пространстве. В основу методики положен оригинальный алгоритм, основанный на разбиении исследуемого пространства на ячейки Вороного с последующей их классификацией по густоте древостоя и объединением в выделы следующих типов фитоценозов: лес, редколесье, редина и тундра с отдельно стоящими деревьями. Разработанная методика картирования растительности на основе точно распределенных данных и пороговых значений густоты древостоев и площади выделов решает проблему субъективности традиционного геоботанического картирования за счет формализации всех его этапов. На примере района исследований, расположенного на юго-восточном макрослоне горного массива Рай-Из, создана карта фитоценозов с использованием разработанной методики данных, полученных в результате дешифрирования крон деревьев лиственницы сибирской на аэрофотоснимках, снятых при помощи беспилотного летательного аппарата.

Ключевые слова: древостой, густота, алгоритм выделения однородных участков, полигоны Вороного, картирование фитоценозов, экотон верхней границы древесной растительности, Полярный Урал

Финансирование: результаты исследований получены в рамках выполнения государственной госбюджетной темы Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (шифр проекта FEUG-2023-0002).

Для цитирования: Автоматизированное картирование древостоев / В. В. Фомин, А. П. Михайлович, Е. М. Агапитов [и др.] // Леса России и хозяйство в них. 2026. № 1 (96). С. 4–15.

Original article

AUTOMATED FOREST STAND MAPPING

Valery V. Fomin¹, Anna P. Mikhailovich², Egor M. Agapitov³, Vladimir E. Rogachev⁴,
Ekaterina A. Kostousova⁵, Egor B. Koritnyak⁶, Sergey P. Parshin⁷,
Dmitriy D. Stratonov⁸, Yulia O. Saiko⁹

¹⁻⁸ Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

¹⁻⁴ Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

⁹ Sverdlovsk Regional Medical College, Yekaterinburg, Russia

Corresponding author: Valery V. Fomin,
fominvv@m.usfeu.ru

Abstract. A method for automated forest stand mapping based on point-distributed spatial tree location data has been developed and tested. The method's core is an original algorithm based on dividing the research area into Voronoi cells, their subsequent classification by stand density, and combining the following types of phytocenochores into selections: forest, sparse forest, light forest and tundra with isolated trees. The developed vegetation mapping method, which uses point-distributed data and thresholds values for stand density and selections area, solves the problem of subjectivity of traditional geobotanical mapping by formalizing all its stages. Using the example of the research area located on the southeastern macroslope of the Rai-Iz mountain range, a phytocenochore map has been created using the developed data method obtained by decoding the crowns of Siberian larch trees on aerial photographs acquired by an unmanned aerial vehicle.

Keywords: forest stands, density, homogeneous area delineation algorithm, Voronoi polygons, phytocenochore mapping, upper treeline ecotone, Polar Urals

Finding: the research results were obtained as part of the implementation of the state budget theme of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project code FEUG-2023-0002).

For citation: Automated forest stand mapping / V. V. Fomin, A. P. Mikhailovich, E. M. Agapitov [et al.] // Forests of Russia and economy in them. 2026. № 1 (96). P. 4–15.

Введение

Одной из ключевых проблем геоботанического картирования является дуальная природа растительного покрова, обладающая свойствами дискретности и континуальности. Достаточно длительное время в научной среде шла дискуссия между исследователями, придерживающимися одной из двух полярных концепций. Одни рассматривали единицы растительного покрова в качестве дискретных единиц (парадигма Ф. Клементса), другие рассматривали растительный покров как континуум (идеи Л. Г. Раменского и Г. Глизна). В первом случае границы между фитоценозами понимаются как объективная реальность, во втором – как условность, которая вводится

исследователем для решения конкретных научных или практических задач (Заугольнова, 1999; Field methods..., 1994; Puzachenko, 2008). Границы между двумя и более сообществами представляют собой экотоны – переходные зоны, ширина и выраженность которых зависят от градиентов экологических факторов и уровня детализации представления объекта исследований (Gosz, 1993; Issues related..., 2002).

В процессе геоботанического картирования могут выделяться фитоценозы и территориальные единицы растительности (фитоценохоры), которые являются модельными представлениями исследуемых сложных систем. Их границы зависят не только от объективных характеристик растительности

(состава, структуры, взаимодействий между растениями), но и от выбранного методологического подхода (популяционного, ценотического, экотопического) и даже от субъективного восприятия исследователя (Миркин и др., 1989; Осипов, 2002).

При картировании в зонах переходов между сообществами достаточно часто встречается терминологическая и методическая неоднозначность. Например, при выделении границ в экотоне тундра – лес можно встретить термин «граница леса», который может трактоваться как линия, экотон или физиологический предел. При этом показатели, используемые для их выделения, например высота дерева или древостоя, сомкнутость крон деревьев, густота древостоя, а также пороговые значения этих показателей варьируют у разных авторов (Körner, 1998; Holtmeier, 2009; A concise scheme..., 2014). Это препятствует сравнительному анализу данных о динамике границ, являющихся важным индикатором изменения климата.

При проведении ручного дешифрирования аэро- и космоснимков и создании картографических материалов возникает проблема объективности и воспроизводимости полученных результатов, которая частично может решаться тренировкой операторов. При этом остаются проблема высокой трудоемкости и, соответственно, времени выполнения и стоимости таких работ, а также сложности масштабирования проектов, требующих увеличения количества квалифицированных операторов.

Любая геоботаническая карта является графической моделью, отражающей авторскую концепцию растительного покрова (Полежаев, 2009) или субъективный взгляд на интерпретацию параметров и/или порогов, используемых при картировании. Поэтому ключевыми вызовами остаются разработка унифицированных объективных методик, позволяющих получать воспроизводимые результаты.

Цель, объекты

и методика исследований

Цель исследования – разработка методики автоматизированного картирования древостоев на основе данных о местоположении пробных площадей и его реализация для картирования древес-

ной растительности вблизи верхнего предела ее произрастания на Полярном Урале.

Исследуемая территория – участок юго-восточного макросклона горного массива Рай-Из (Ямало-Ненецкий автономный округ, Полярный Урал). Район исследований находится границах $66^{\circ}30'28''$ – $66^{\circ}47'42''$ с. ш. и $65^{\circ}33'59''$ – $65^{\circ}49'28''$ в. д. Его рельеф сформировался под воздействием ледника, который покрывал земную поверхность территории в ходе последнего глобального оледенения примерно десять тысяч лет назад.

Снижение высоты местности на исследуемом участке макросклона происходит в направлении с северо-запада на юго-восток. Значения абсолютных высот лежат в интервале от 172 до 318 м н. у. м. Гидрографическая сеть развития включает реку Енгаю с притоками, множество временных водотоков, множество небольших водоемов, часть которых пересыхает летом. В экотоне верхней границы древесной растительности доминируют лиственничники (*Larix sibirica* Ledeb.). Ближе к реке изредка встречаются ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.) и береза извилистая (*Betula tortuosa* Ledeb.). В подлеске распространены карликовая береза (*Betula nana* L.) и можжевельник сибирский (*Juniperus sibirica* Bugsd.). В травяно-кустарничковом ярусе встречается голубика (*Vaccinium uliginosum* L.), а в напочвенном покрове – зеленые мхи и лишайники.

В районе исследований проведена аэрофото съемка. Общая площадь отснятой при помощи беспилотного летательного аппарата Phantom 4 Advanced (DJI, Китай) с высоты 50 м области составила 7,32 км². На основе полученных снимков в программе Metashape Professional (Agisoft LLC, Россия) был создан ортофотоплан. Дешифрирование крон экземпляров лиственницы от подростка до взрослых деревьев проведено ручным способом. Отказ от автоматизированных методов дешифрирования обусловлен необходимостью обеспечения высокой точности определения местоположения экземпляров и границ их крон.

Для оценки качества результатов дешифрирования использовали данные наземных измерений горизонтальной проекции кроны, определяемые путем установления максимального значения диаметра в двух взаимно перпендикулярных

направлениях на девяти пробных площадях, расположенных в районе исследований, в градиенте высоты и густоты древостоев соответственно (рис. 1).

Ранее была разработана методика оценки вероятности отнесения экземпляра лиственницы к трем возрастным интервалам (1–40; 41–100

и старше 100) лиственницы сибирской по размеру крон (Carbon Storage..., 2025). При величине радиуса кроны до 0,56 м включительно вероятность того, что возраст экземпляра лиственницы не будет превышать 40 лет, выше вероятности того, что его возраст будет старше 40 лет.

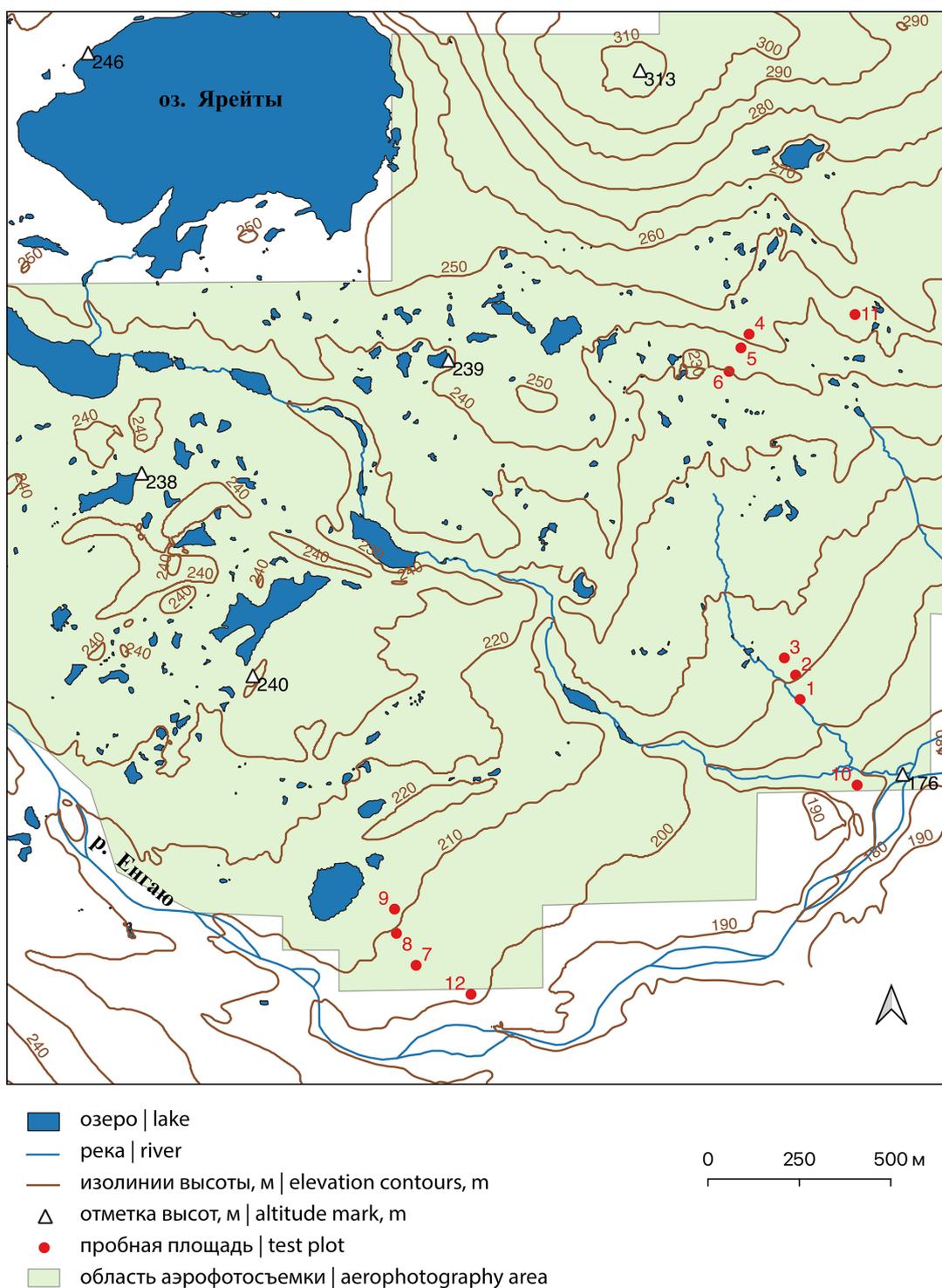


Рис. 1. Картограмма района исследований
 Fig. 1. Schematic map of the research area

Если радиус кроны лежит в интервале от 0,56 до 1,416 м включительно, то наиболее вероятно, что возраст дерева будет находиться в интервале 41–100 лет, а если радиус будет больше 1,416 м, то – старше 100 лет.

На основе полигонального слоя крон деревьев создан точечный слой с использованием функции расчета координат центра для каждого полигона, представляющего крону дерева. Апробацию разработанного в ходе исследований алгоритма, положенного в основу метода автоматизированного картирования, осуществляли с использованием векторного точечного слоя, каждая точка которого обозначает местоположение дерева старше 40 лет.

На рис. 2 приведена картосхема распределения экземпляров лиственницы сибирской в районе исследований. Цветом обозначены два возрастных интервала: до 40 лет включительно и старше.

Создание карты распределения типов фитоценоз лес, редколесье, редины, тундры с отдельно стоящими деревьями в районе исследований проводили на основе количественных критериев, разработанных для редкостойных древостоев (Шиятов и др., 2005).

Под фитоценозой понимается участок земной поверхности, который характеризуется относительной однородностью по одному или нескольким параметрам растительного покрова и условиям

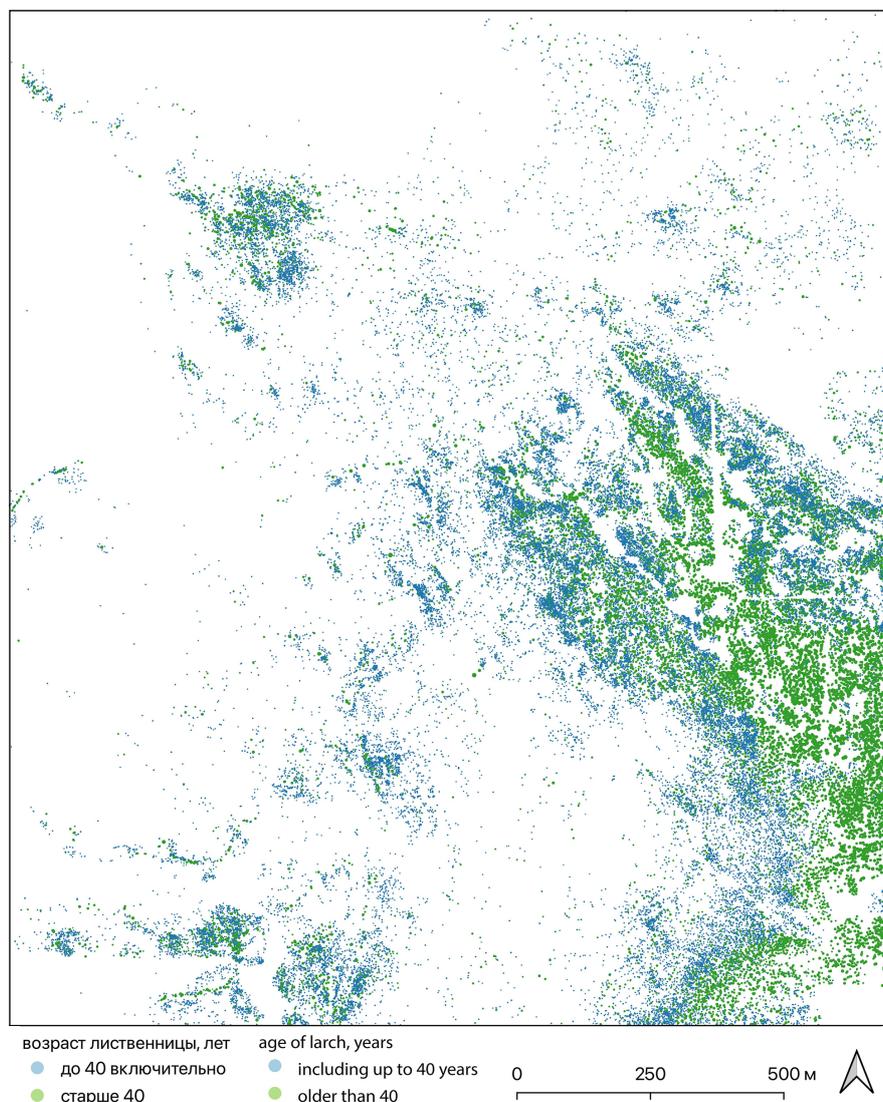


Рис. 2. Картосхема экземпляров лиственницы сибирской в районе исследований.

Цветом обозначены два возрастных интервала: до 40 лет включительно и старше

Fig. 2. Schematic map of the spatial distribution of Siberian larch individuals in the research area.

Colors denote two age intervals: up to and including 40 years and older

местопроизрастания. В рамках данной работы в качестве ключевого критерия для выделения типов фитоценохор использовали густоту древостоя.

В качестве исходных количественных критериев для отнесения участков исследуемой территории к одному из типов фитоценохор использовали ранее предложенные пороговые значения расстояния между деревьями при наземном картировании лесных и лесотундровых сообществ (Шиятов и др., 2005): лес – до 10 м включительно; редколесье – от 10 до 30 м включительно; редины – от 30 до 60 м включительно; тундра с отдельно стоящими деревьями – больше 60 м.

Реализацию алгоритма автоматизированного картирования выполняли в географической информационной системе QGIS (qgis.org).

Результаты и их обсуждение

На основе пороговых значений расстояний между деревьями были рассчитаны соответствующие диапазоны густоты древостоя (шт./га) и определены минимальные значения площади выделов (m^2) для каждого типа фитоценохоры:

лес – свыше 400 шт./га, минимальная площадь 400 m^2 ;

редколесье – 44–400 шт./га, минимальная площадь 900 m^2 ;

редина – 11–44, минимальная площадь 14 400 m^2 ;

тундра с отдельно стоящими деревьями – 0–11, минимальная площадь > 14 400 m^2 .

Минимальные пороговые значения площади выдела установлены из условия, чтобы количество деревьев в выделе с типами фитоценохор редколесье, редины и тундра с отдельно стоящими деревьями было не меньше, чем в самом маленьком по площади выделе фитоценохоры лес.

Для автоматизированного картирования был разработан алгоритм, созданный на базе ранее предложенного (Fomin et al., 2020). Ниже приведено описание его этапов.

Качественное описание алгоритма

1. Построение полигонов Вороного для точечного слоя, каждая точка которого обозначает местоположение дерева старше 40 лет.

2. Расчет густоты для каждой ячейки Вороного.

3. Классификация ячеек по пороговым значениям густоты и создание векторных слоев для каждого типа фитоценохоры.

4. Объединение группы ячеек одного типа, имеющих общие границы, в полигоны – выделы путем удаления внутренних границ смежных ячеек.

5. Фильтрация полученных полигонов по пороговым значениям площади участка для каждого типа фитоценохоры: разделение на валидные, площадь которых равна или превышает пороговое значение, и невалидные, площадь которых меньше этого значения.

6. Пространственный анализ невалидных полигонов: поиск смежных (касающихся) валидных полигонов ближайшего и меньшего по густоте типа фитоценохоры, их присоединение к последним.

7. Объединение перераспределенных участков в полигоны путем удаления общих границ.

8. Объединение полигонов всех типов фитоценохор в один слой.

9. Сглаживания границ полигонов.

Математическое описание алгоритма

1. Обозначения и исходные параметры

Множества и переменные:

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ – множество точек, обозначающих местоположение деревьев старше 40 лет, где $t_i = (x_i, y_i)$ – координаты i -го дерева.

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – множество ячеек Вороного, соответствующих точкам T .

$S(v_i)$ – площадь ячейки v_i , m^2 .

$\rho(v_i)$ – густота древостоя в полигоне v_i , шт./га.

Пороговые значения густоты, шт./га:

$\rho_{лес} > 400$

$\rho_{редколесье} \in [44; 400]$

$\rho_{редина} \in [11; 44]$

$\rho_{тундра} \in [0; 11]$

Минимальные площади выделов, m^2 :

$S_{мин_лес} = 400$

$S_{мин_редколесье} = 900$

$S_{мин_редина} = 14\,400$

$S_{мин_тундра} > 14\,400$

Условие согласования площадей выделов:

минимальное число деревьев в выделе любого типа ≥ 160 (так как $400 \text{ шт./га} \times 400 \text{ м}^2 = 160$ деревьев).

2. Формализация этапов алгоритма

2.1. Построение ячеек Вороного

Вход: $T = \{(x_i, y_i)\} (i = 1, \dots, n)$.

Выход: $V = \{v_i\} (i = 1, \dots, n)$, где v_i – ячейка, содержащая все точки плоскости, ближайšie к t_i .

Формально: $v_i = \{(x, y) \in R^2 \mid \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \leq \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} \text{ для всех } j \neq i\}$.

2.2. Расчет густоты древостоя для каждой ячейки Вороного

Для каждого $v_i \in V$ вычисляется:

$$\rho(v_i) = 10\,000 / S(v_i) \text{ [шт./га]},$$

где $S(v_i)$ – площадь v_i , м²;

коэффициент 10 000 переводит м² в га.

2.3. Классификация ячеек по густоте. Определяется функция типа фитоценохоры $\tau: V \rightarrow \{\text{лес, редколесье, реди́на, тундра с отдельно стоящими деревьями}\}$:

$$\tau(v_i) = \text{лес, если } \rho(v_i) > 400;$$

$$\tau(v_i) = \text{редколесье, если } 44 \leq \rho(v_i) \leq 400;$$

$$\tau(v_i) = \text{редина, если } 11 \leq \rho(v_i) < 44;$$

$\tau(v_i) = \text{тундра с отдельно стоящими деревьями, если } \rho(v_i) < 11$.

Формируются подмножества:

$$V_{\text{лес}} = \{v_i \mid \tau(v_i) = \text{лес}\},$$

$$V_{\text{редколесье}} = \{v_i \mid \tau(v_i) = \text{редколесье}\} \text{ и т. д.}$$

2.4. Объединение смежных ячеек в выделы

Для каждого подмножества V_k (где k – тип фитоценохоры) выполняется операция объединения полигонов с общими границами:

$W_k = \bigcup \{v_i \in V_k\} v_i$ (с удалением внутренних границ). Результат: множество выделов $W = \bigcup_k W_k$.

2.5. Фильтрация выделов по площади

Для каждого выдела $w \in W_k$ вычисляется $S(w)$.

Выделы разделяются:

$$\text{на валидные: } S(w) \geq S_{\min_k}$$

$$\text{невалидные: } S(w) < S_{\min_k}$$

Обозначим эти выделы:

$$W_k^{\text{вал}} = \{w \in W_k \mid S(w) \geq S_{\min_k}\}$$

$$W_k^{\text{невал}} = \{w \in W_k \mid S(w) < S_{\min_k}\}$$

2.6. Пространственный анализ невалидных выделов. Для каждого невалидного выдела $w \in W_k^{\text{невал}}$ ищется смежный (касающийся) валидный выдел $w' \in W_k^{\text{вал}}$, где k' – тип фитоценохоры с меньшей густотой, чем k ;

w и w' имеют общую границу ($w \cap w' \neq \emptyset$).

Если такой w' найден, w присоединяется к w' : $w'_{\text{новый}} = w' \cup w$. Иначе w остается без изменений.

2.7. Объединение перераспределенных полигонов

Для всех присоединенных невалидных полигонов выполняется объединение с целевыми валидными полигонами:

$$W_k^{\text{вал_новый}} =$$

$$= W_k^{\text{вал}} \cup \left(\bigcup \{w \in W_k^{\text{невал}} \mid w \sim w'\} w \right),$$

где $w \sim w'$ означает смежность и соответствие правилам присоединения.

2.8. Объединение всех выделов в один слой

Формируется итоговое множество выделов:

$$U = \bigcup_k W_k^{\text{вал_новый}}.$$

2.9. Сглаживание границ полигонов. К каждому полигону $u \in U$ применяется оператор сглаживания S на основе сплайна:

$$u_{\text{сгл}} = S(u).$$

Результат:

слой сглаженных выделов

$$U_{\text{сгл}} = \{u_{\text{сгл}} \mid u \in U\}.$$

3. Выходные данные

Векторный слой $U_{\text{сгл}}$ с атрибутами:

$\tau(u)$ – тип фитоценохоры;

$S(u)$ – площадь, м²;

$\rho(u)$ – средняя густота, шт./га.

Свойства алгоритма

1. Согласованность критериев для выделения типов фитоценохоры и площади выделов.

2. Алгоритм при заданных фиксированных входных данных и пороговых значений обеспечивает воспроизводимость получаемых результатов.

3. Решение задачи устранения вырожденных случаев – малых по площади полигонов при формировании выделов. Разделение выделов по пороговым значениям площади и их перераспределение позволяет эффективно удалить из окончательной карты нерепрезентативные по площади участки фитоценохор: менее 400 м² для леса, менее 900 м² для редколесья, менее 14 400 м² для реди́н.

4. Перераспределение полигонов, площадь которых меньше порогового значения, изменяет только их принадлежность к типу фитоценохоры,

сохраняя общую площадь карты и положение валидных выделов каждого типа. Исследуемая область Ω сохраняется с точностью до обработки граничных ячеек Вороного. Присоединение невалидных полигонов происходит только к касающимся валидными полигонами. Этим обеспечиваются

топологическая целостность и пространственная связность всех выделов.

На рис. 3 в качестве иллюстрации приведены картосхемы, полученные в ходе реализации этапов алгоритма, а на рис. 4 – картосхема фитоценохор.

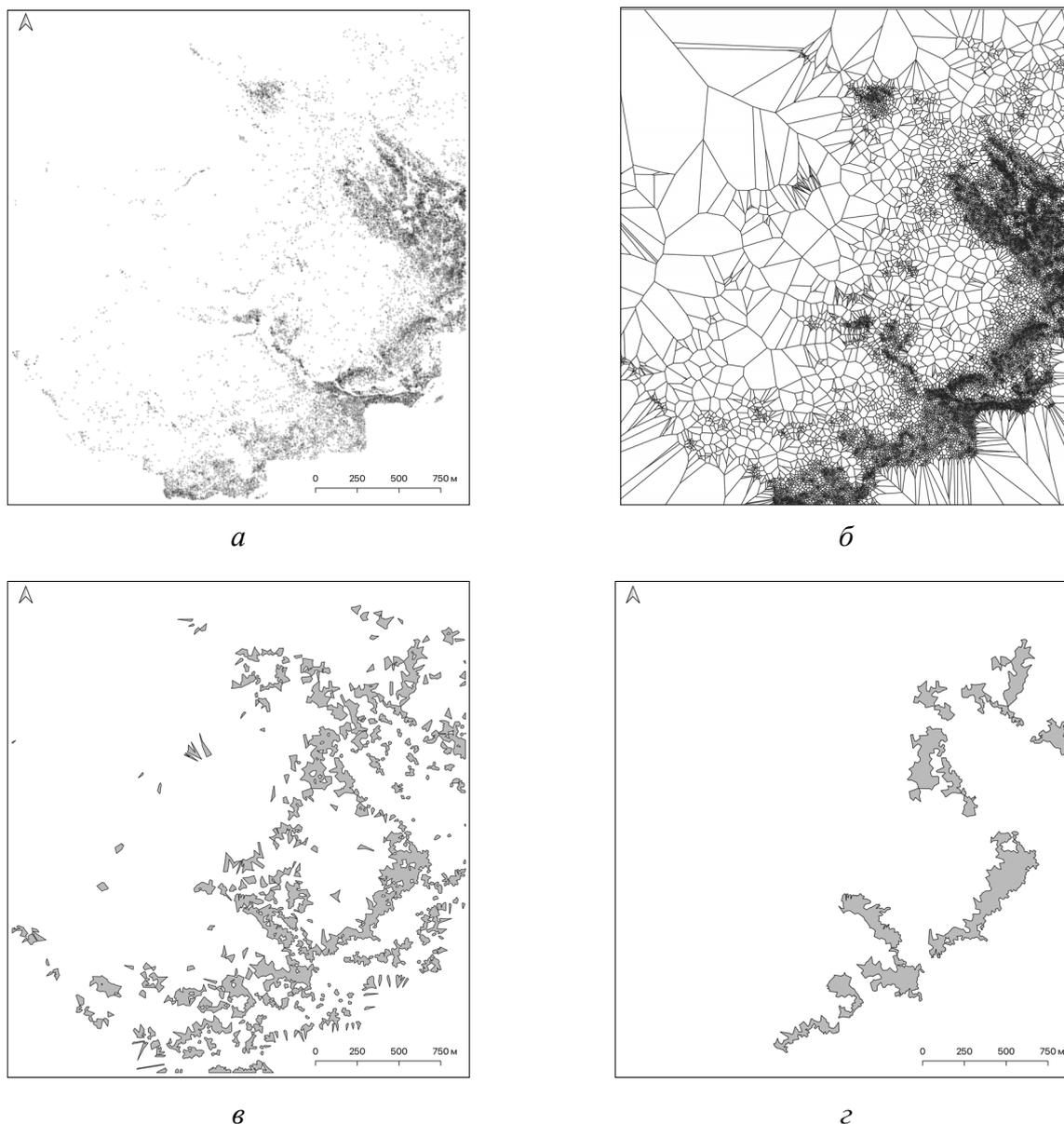


Рис. 3. Картосхемы, иллюстрирующие этапы разработанного алгоритма обработки пространственных данных: *а* – исходный векторный точечный слой, каждая точка которого обозначает местоположение дерева старше 40 лет; *б* – векторный слой с ячейками Вороного; *в* – векторный слой с полигонами редина, полученными в результате устранения внутренних границ; *г* – выделы редина, которые получены после выполнения всех этапов алгоритма

Fig. 3. Schematic maps illustrating the stages of the algorithm: *a* – original vector point layer, where each point represents the location of a tree older than 40 years; *б* – vector layer with Voronoi polygons; *в* – vector layer with light forest polygons obtained by dissolving internal boundaries; *г* – light forest stands identified after completing all algorithm stages

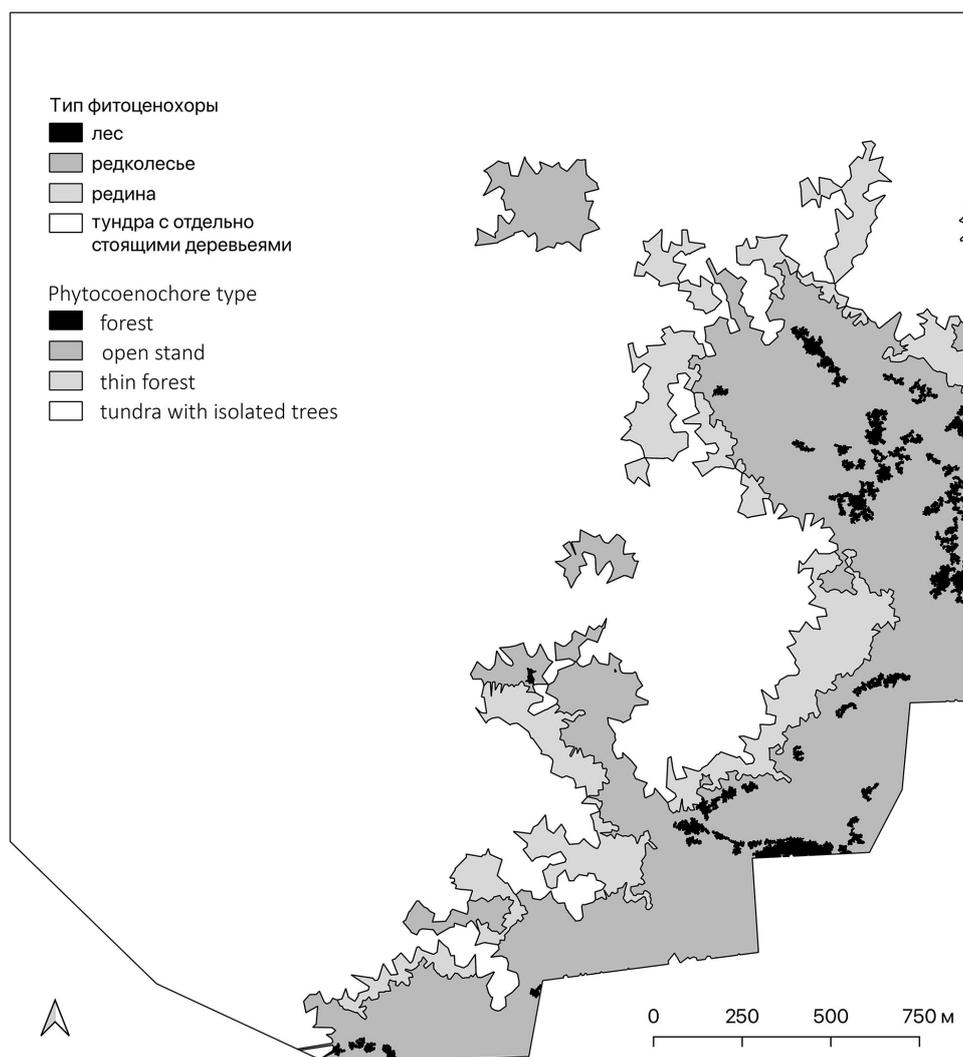


Рис. 4. Картограмма фитоценозов, созданная с использованием разработанного алгоритма автоматизированного картирования

Fig. 4. A phytocenochore schematic map created using the developed automated mapping algorithm

Выводы

Разработана методика автоматизированного картирования редкостойных древостоев вблизи верхнего предела произрастания древесной растительности. В ее основу положен итеративный алгоритм, использующий в качестве входных данных точечный векторный слой, каждая точка которого характеризует местоположение древесного растения. Этапы алгоритма включают: разбиение исследуемого пространства на ячейки Вороного; первичную классификацию ячеек на принадлежность к одному из типов фитоценозов лес, редколесье, редина, тундра с отдельно стоящими деревьями; объединение групп ячеек одного типа в полигон; разделение полигонов по пороговым значениям

минимальной площади участка на валидные и невалидные (малые полигоны); пространственное перераспределение невалидных полигонов путем их присоединения к соседним по густоте древостоя полигонам.

Разработанный алгоритм детерминирован при фиксированных входных данных и пороговых значениях площади участков, что обеспечивает воспроизводимость получаемых результатов. Он также позволяет решить задачу вырожденных случаев, связанных с малым размером выделов, путем их перераспределения по другим типам фитоценозов. При этом перераспределение малых полигонов не изменяет общую площадь картируемого района.

На примере района исследований, расположенного на юго-восточном макросклоне горного массива Рай-Из (Полярный Урал), проведено картирование редкостойных лиственничных древостоев при помощи разработанной методики на основе данных дешифрирования лиственницы сибирской по данным аэросъемки с использованием беспилотного летательного аппарата.

Список источников

- Заугольнова Л. Б.* Современные представления о структуре растительного покрова : концепция иерархического покрова // *Успехи современной биологии.* 1999. № 2 (119). С. 115–127.
- Миркин Б. М., Розенберг Г. С., Наумова Л. Г.* Словарь понятий и терминов современной фитоценологии. М. : Наука, 1989. 223 с.
- Осипов С. В.* Структура растительного покрова таежно-гольцового ландшафта (на примере Буреинского нагорья) : автореф. дис. ... д-ра биол. наук : 03.00.05 / Осипов Сергей Владимирович. Владивосток : Биолого-почвенный институт ДВО РАН, 2002. 26 с.
- Полежаев А. Н.* Растительность севера Дальнего Востока России в информационных системах // *Экология.* 2009. № 3. С. 180–186.
- Шиятов С. Г., Терентьев М. М., Фомин В. В.* Пространственно-временная динамика лесотундровых сообществ на Полярном Урале // *Экология.* 2005. № 2. С. 1–8.
- A concise scheme of vegetation boundary terms in subtropical high mountains / *C.-A. Chiu, M.-F. Lee, H.-Y. Tzeng* [et al.] // *African Journal of Agricultural Research.* 2014. Vol. 9. P. 1560–1570.
- Carbon Storage by Siberian Larch in the Upper Treeline Ecotone in the Polar Urals / *A. P. Mikhailovich, V. V. Fomin, D. Yu. Golikov* [et al.] // *Russian Journal of Ecology.* 2025. Vol. 56, № 3. P. 200–207. DOI: 10.1134/S106741362503010X
- Fomin V. V., Mikhailovich A. P., Shiyatov S. G.* Trees in the Upper Treeline Ecotone in the Polar Urals : Centuries-Old Change and Spatial Patterns // *Mountain Research and Development.* 2020. Vol. 40, № 2. P. R32–R40. DOI: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-20-00002.1
- Gosz J. R.* Ecotone Hierarchies // *Ecological Applications.* 1993. № 3 (3). P. 369–376.
- Field methods for vegetation mapping : report to: United States Department of Interior, NBS / NPS Vegetation Mapping Program. The Nature Conservancy, Arlington, VA. on the Aravalli hills / *D. Grossman, K. Goodin, X. Li* [et al.] // *Tropical Ecology.* 1994. № 2 (43). P. 325–335.
- Holtmeier F.-K.* Mountain Timberlines. Ecology, Patchiness, and Dynamics. Dordrecht ; Boston ; London : Kluwer Academic Publishers, 2009. 369 p.
- Issues related to the detection of boundaries / *M.-J. Fortin, R. J. Olson, S. Ferson* [et al.] // *Landscape Ecology.* 2002. Vol. 15. P. 453–466.
- Körner C.* A Re-Assessment of High Elevation Treeline Positions and Their Explanation // *Oecologia.* 1998. № 115. P. 445–459.
- Puzachenko Y.* Biogeocoenosis as an Elementary Unit of Biogeochemical Work in the Biosphere // *Encyclopedia of Ecology* / ed. by S. E. Jorgensen, B. D. Fath. Elsevier, 2008. P. 396–402.

References

- A concise scheme of vegetation boundary terms in subtropical high mountains / *C.-A. Chiu, M.-F. Lee, H.-Y. Tzeng* [et al.] // *African Journal of Agricultural Research.* 2014. Vol. 9. P. 1560–1570.
- Carbon Storage by Siberian Larch in the Upper Treeline Ecotone in the Polar Urals / *A. P. Mikhailovich, V. V. Fomin, D. Yu. Golikov* [et al.] // *Russian Journal of Ecology.* 2025. Vol. 56, № 3. P. 200–207. DOI: 10.1134/S106741362503010X

- Dictionary of concepts and terms of modern phytocenology / *B. M. Mirkin, G. S. Rosenberg, L. G. Naumova*. Moscow : Nauka, 1989. 223 p.
- Field methods for vegetation mapping : report to: United States Department of Interior, NBS / NPS Vegetation Mapping Program. The Nature Conservancy, Arlington, VA. on the Aravalli hills / *D. Grossman, K. Goodin, X. Li* [et al.] // *Tropical Ecology*. 1994. № 2 (43). P. 325–335.
- Fomin V. V., Mikhailovich A. P., Shiyatov S. G.* Trees in the Upper Treeline Ecotone in the Polar Urals : Centuries-Old Change and Spatial Patterns // *Mountain Research and Development*. 2020. Vol. 40, № 2. P. R32–R40. DOI: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-20-00002.1
- Gosz J. R.* Ecotone Hierarchies // *Ecological Applications*. 1993. № 3 (3). P. 369–376.
- Field methods for vegetation mapping : report to: United States Department of Interior, NBS / NPS Vegetation Mapping Program. The Nature Conservancy, Arlington, VA. on the Aravalli hills / *D. Grossman, K. Goodin, X. Li* [et al.] // *Tropical Ecology*. 1994. № 2 (43). P. 325–335.
- Holtmeier F.-K.* Mountain Timberlines. Ecology, Patchiness, and Dynamics. Dordrecht ; Boston ; London : Kluwer Academic Publishers, 2009. 369 p.
- Issues related to the detection of boundaries / *M.-J. Fortin, R. J. Olson, S. Ferson* [et al.] // *Landscape Ecology*. 2002. Vol. 15. P. 453–466.
- Körner C.* A Re-Assessment of High Elevation Treeline Positions and Their Explanation // *Oecologia*. 1998. № 115. P. 445–459.
- Mirkin B. M., Rosenberg G. S., Naumova L. G.* Dictionary of concepts and terms of modern phytocenology. Moscow : Nauka, 1989. 223 p.
- Osipov S. V.* The structure of the vegetation cover of the Taiga-char landscape (on the example of the Bureinsky highlands) : abstract of the dissertation. ... Doctor of Biology : 03.00.05 / *Osipov Sergey Vladimirovich*. Vladivostok : Biological and Soil Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002. 26 p.
- Polezhaev A. N.* Vegetation of the north of the Russian Far East in information systems // *Ecology Rus*. 2009. № 3. P. 180–186. (In Russ.)
- Puzachenko Y.* Biogeocoenosis as an Elementary Unit of Biogeochemical Work in the Biosphere // *Encyclopedia of Ecology* / ed. by S. E. Jorgensen, B. D. Fath. Elsevier, 2008. P. 396–402.
- Zaugolnova L. B.* Modern ideas about the structure of vegetation cover: the concept of hierarchical cover // *Successes of modern biology*. 1999. № 2 (119). P. 115–127. (In Russ.)

Информация об авторах

Валерий Владимирович Фомин – доктор биологических наук, доцент,

fominvv@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9211-5627>

Анна Павловна Михайлович – старший преподаватель,

a.p.mikhailovich@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8282-9431>

Егор Михайлович Агапитов – старший преподаватель,

agapitovem@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9709-1559>

Владимир Евгеньевич Рогачев – старший преподаватель,

rogachevve@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4964-6975>

Екатерина Антоновна Костоусова – студент,

koustousova-katya@mail.ru

Егор Богданович Коритняк – студент,

koritnyak@bk.ru

*Сергей Павлович Паршин – начальник отдела администрирования
и эксплуатации компьютерных сетей,
psp@m.usfeu.ru*

*Дмитрий Дмитриевич Стратонов – преподаватель Уральского лесотехнического колледжа,
stratonovdd@m.usfeu.ru*

*Юлия Олеговна Сайко – преподаватель Свердловского областного медицинского колледжа,
julia.saiko.elk@ya.ru*

Information about the authors

*Valery V. Fomin – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor,
fominvv@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9211-5627>*

Anna P. Mikhailovich – senior lecturer,

a.p.mikhailovich@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8282-9431>

Egor M. Agapitov – senior lecturer,

agapitovem@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9709-1559>

Vladimir E. Rogachev – senior lecturer,

rogachevve@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4964-6975>

Ekaterina A. Kostousova – student,

kostousova-katya@mail.ru

Egor B. Koritnyak – student,

koritnyak@bk.ru

*Sergey P. Parshin – head of the department of administration and operation of computer networks,
psp@m.usfeu.ru*

Dmitiy D. Stratonov – teacher at the Ural Forestry College,

stratonovdd@m.usfeu.ru

Yulia O. Saiko – teacher at the Sverdlovsk Regional Medical College,

julia.saiko.elk@ya.ru

Статья поступила в редакцию 08.12.2025; принята к публикации 26.01.2026.

The article was submitted 08.12.2025; accepted for publication 26.01.2026.
