

<https://doi.org/10.25686/foreco.2025.40.33.005>

УДК 630*582:630*182.21

ФОРМИРОВАНИЕ И АКТУАЛИЗАЦИЯ КАРТ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ЛЕСНОГО ПОКРОВА

В.А. Рыжкова, И.В. Данилова, М.А. Корец

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН - Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО
РАН (ИЛ СО РАН)

В статье представлены результаты исследования по актуализации карт восстановительной динамики лесов для южной части приенисейской Сибири. Работа основана на сопряженном анализе разнородных спутниковых данных (Landsat, Sentinel) в ГИС, цифровой модели рельефа (ЦМР), тематических карт и материалов наземных исследований. Для систематизации сукцессионного разнообразия лесного покрова применен географо-генетический подход к классификации лесных сообществ. На основе разработанного алгоритма автоматизированной классификации лесорастительных условий и растительного покрова с использованием снимков Sentinel-2 проведена актуализация составленной ранее по снимкам Landsat-5 карты восстановительной динамики лесной растительности в южной части приенисейской Сибири. На основе предложенного подхода к анализу разнородных данных и распространенного программного обеспечения (ArcGIS, ERDAS) представлена методика классификации и пространственного моделирования лесорастительных условий и восстановительной динамики лесов. Этот подход позволяет оперативно создавать и обновлять карты лесного покрова, что особенно актуально для таежных регионов Сибири.

Ключевые слова лесной покров, географо-генетический подход к классификации, сопряженная классификация, лесовосстановительная динамика, цифровая модель рельефа (ЦМР), ГИС, данные дистанционного зондирования (ДДЗ).

CREATION AND UPDATING OF MAPS DEPICTING FOREST COVER RESTORATION DYNAMICS

V.A. Ryzhkova, I.V. Danilova, M.A. Korets

V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS - Separate subdivision of FRC KSC SB RAS (IL SB
RAS)

The article presents the research results of the development and updating of forest regeneration dynamics maps based on the combined analysis of heterogeneous GIS data (remote sensing data (Landsat, Sentinel), digital elevation model (DEM), thematic maps, and ground-based survey materials). A geographic-genetic approach to forest community classification was used to systematize the successional diversity of forest cover. A previously developed algorithm for the automated classification and mapping of forest growth conditions and forest vegetation, as well as Sentinel-2 imagery, was used to update a previously compiled map of forest regeneration dynamics in the southern part of Yenisei Siberia using Landsat-5 imagery. The proposed approach to analyzing heterogeneous data and commonly used software (ArcGIS, ERDAS) is used to present a methodology for the classification and spatial modeling of forest growth conditions and forest regeneration dynamics. This approach enables the rapid creation and updating of forest cover maps, which is particularly relevant for the taiga regions of Siberia.

Key words: forest cover, geographic-genetic approach to classification, coupled classification, forest restoration dynamics, digital elevation model (DEM), GIS, remote sensing data (RSD)

Введение

Современный этап развития тематического картографирования связан с развитием ГИС-технологий, позволяющих объективизировать процесс картографирования, повысить

точность и достоверность карт путем разработки алгоритмов автоматизированной обработки дистанционной и наземной информации в сочетании с традиционными картографическими методами (Коновалова и др., 2005; Ермаков и др., 2007; Черненко и др., 2019; Zhu, 2017). Особенно актуальна в настоящее время проблема оценки восстановительной динамики лесной растительности в связи с высокими темпами увеличения площадей антропогенно трансформированных лесных территорий, необходимостью прогнозирования направления развития сукцессионных процессов в разных лесорастительных условиях (Лежнин и др., 2024; Kurbanov et al., 2024; Порова, 2025).

Для выявления и анализа изменений лесного покрова широко применяются спутниковые снимки разных сроков съемки, что дает возможность оценить развитие и направленность динамических процессов (Беляева и др., 2016; Королева и др., 2018; Khatancharoen et al., 2021). Большинство исследований в этой области посвящено оценке изменений площадей лесных массивов и других пространственных параметров (фрагментарности, разобщенности) (Potapov et al., 2015; Ершов и др., 2017), реже встречаются работы по изучению динамики породного состава лесов в ходе восстановительно-возрастных сукцессий (Беляева и др., 2018; Васильев и др., 2019; Гнеденко, 2023).

Особый интерес представляют исследования по оценке сукцессионной динамики лесного покрова на основе географо-генетического подхода к классификации лесных сообществ (Колесников, 1956), согласно которому разнообразие сообществ систематизируется не по изменчивым внешним признакам, а по сходству условий местопроизрастания, происхождению и направленности развития сообществ (Смолоногов и др., 2004; Манько, 2004).

На примере территории южной части приенисейской Сибири была разработана сопряженная классификация лесорастительных условий и лесной растительности (Рыжкова, 2007), и составлены карты потенциальных лесорастительных условий как основа для формирования карты восстановительной динамики лесного покрова (Ryzhkova, Danilova, 2012). Такая классификация отражает особенности природной и антропогенной динамики во времени и пространстве основных структурных единиц лесного покрова – типов леса, учитывает особенности происхождения и включает все этапы развития лесных сообществ, что позволяет прогнозировать направление и скорость сукцессий.

Проведено автоматизированное дешифрирование данных дистанционного зондирования (Danilova et al., 2012) и на основе сопряженного анализа данных космической мультиспектральной съемки (Landsat-5), цифровой модели рельефа местности (ЦМР) и наземных исследований (Данилова и др., 2013) разработана карта восстановительной динамики лесного покрова южной части приенисейской Сибири (Рыжкова и др., 2016).

Целью данной работы является обновление составленной ранее карты на основе разработанной методики сопряженного анализа разнородных данных в ГИС, новых данных ДЗЗ (Sentinel-2) и материалов наземных исследований.

Область исследования

Исследования проводились в южной части приенисейской Сибири (56° - 58° с. ш., 92° - 96° в. д.) (Рис. 1). Данная территория характеризуется разнообразием природных условий, она расположена на стыке двух физико-географических стран - Западной и Средней Сибири и по

характеру рельефа отчетливо разделяется на две части – равнинную и низкогорную (Средняя Сибирь, 1964).

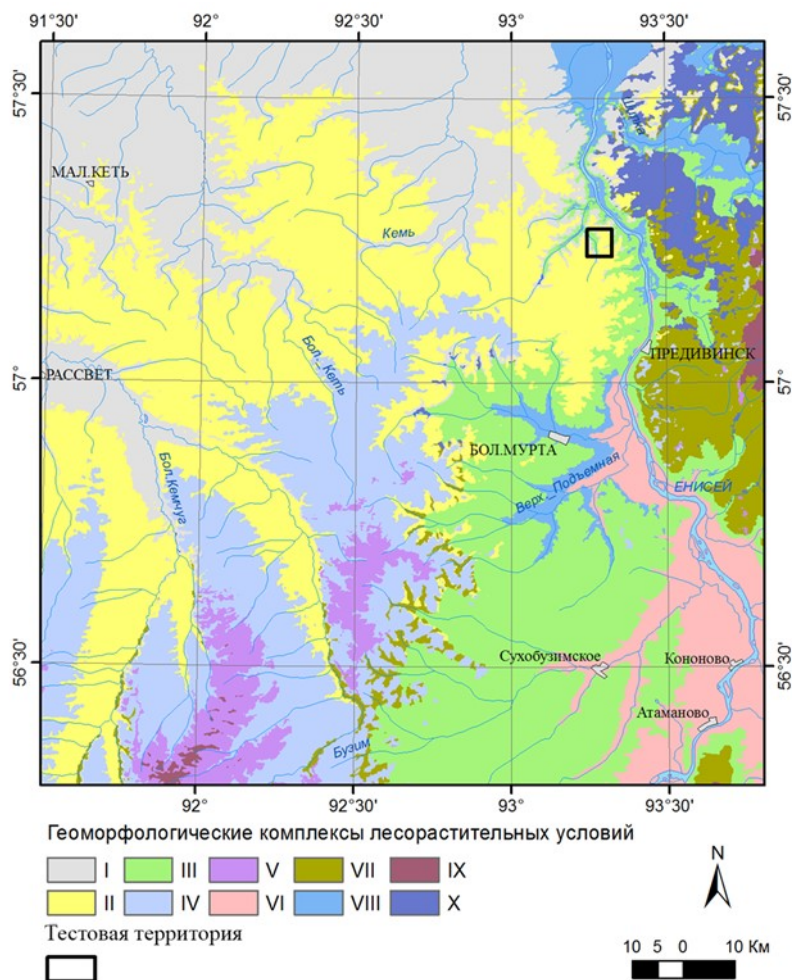


Рис. 1. Район исследований и расположение тестовой территории. I - возвышенные плоские и полого-волнистые озерно-аллювиальные аккумулятивно-денудационные южнотаежные равнины; II - высокие полого-увалистые или волнистые, денудационные и денудационно-эрозионные южнотаежные равнины; III - высокие полого-увалистые или волнистые, увалистые и грядовые, денудационные, денудационно-эрозионные подтаежные равнины; IV - низкие южнотаежные плато холмисто-грядовые, волнистые, пологосклоновые, слаборасчлененные, V - высокие южнотаежные плато, холмисто-грядовые, грядово-сопочные, расчлененные (склоны различной крутизны); VI - низкие и возвышенные полого-волнистые аккумулятивно-денудационные и приречные аллювиально-аккумулятивные лесостепные равнины в сочетании с увалистыми и грядовыми расчлененными участками денудационно-эрозионных равнин; VII - высокие холмистые, пологоувалистые и увалистые денудационные, денудационно-эрозионные южнотаежные предгорные равнины и низкие волнистые плато; VIII - низкие плоские приречные аллювиально-аккумулятивные южнотаежные равнины; IX - низкогорья и горы южнотаежные грядово-сопочные, крутосклонные, расчлененные (Южно-Енисейский кряж); X - возвышенные плоские южнотаежные равнины.

Этими особенностями, прежде всего, обуславливается природное разнообразие произрастающей здесь растительности, на которое накладывается влияние антропогенных факторов. Леса данной территории характеризуются сильной нарушенностью и антропогенной трансформацией и разнообразны по породному составу и структуре сообществ. На больших площадях в разных лесорастительных условиях представлены возрастные стадии восстановления коренной растительности (Лапшина и др., 1971). Поэтому на первый план выступает вопрос о классификации растительных сообществ разного

динамического состояния для выявления закономерностей хода сукцессионных процессов в пространстве и во времени.

Материалы и методика исследований

Сопряженная классификация лесорастительных условий и растительного покрова исследуемой территории разрабатывалась на основе географо-генетического подхода. Суть его заключается в том, что изучаемая территория дифференцируется на участки, однородные по топографическому положению и сочетанию элементов или форм мезорельефа, и, следовательно, по экологическим режимам, создающим определенный лесорастительный эффект. Генетический принцип классификации проявляется в том, что все насаждения в пределах относительно однородной по топографическому положению территории рассматриваются как возрастные стадии характерного для этих условий коренного насаждения. Коренные и производные типы насаждений группируются в восстановительный ряд растительности – тип леса, то есть ряд генетически связанных и последовательно сменяющихся насаждений, которые развиваются в пределах определенного типа лесорастительных условий.

Тип лесорастительных условий определяется как объединение участков территории, имеющих однородный комплекс действующих на растительность природных (климатических, почвенно-гидрологических) факторов и выделяется с учетом геологического и геоморфологического строения территории (Колесников, 1956; Смолоногов, 1998). Классификация лесорастительных условий включает три уровня: геоморфологический комплекс лесорастительных условий (ГМК ЛУ), группа типов лесорастительных условий, тип лесорастительных условий (ТЛУ). В пределах каждого ТЛУ сформированы восстановительные ряды растительности, состоящие из возрастных стадий. Фрагмент классификации представлен в таблице 1 на примере трех ГМК ЛУ. Для равнинной части района исследований показаны наиболее типичные восстановительные ряды сосновых лесов в разных лесорастительных условиях (табл. 1).

Таблица 1

**Фрагмент сопряженной классификации лесорастительных условий и растительности
для тестовой территории в южной части приенисейской Сибири**

Лесорастительные условия		Растительность
ГМК ЛУ	ТЛУ (по интервалам уклонов)	Преобладающие генетические типы леса (восстановительные ряды)
I. Возвышенные (абс. выс 183 - 227 м) плоские и полого-волнистые озерно-аллювиальные аккумулятивно-денудационные южнотаежные равнины, сложенные светло-бурыми и желто-бурыми облессованными делювиально-аллювиальными остаточнокarbonатными глинами.	Плоские (0-1°) дренированные водоразделы (H>200 м) и прилегающие части очень пологих склонов, почвы дерновые лесные темноцветные и темно-серые лесные	1. Сосняки разнотравно-крупнотравные
	Плоские и вогнутые (0-1°) менее дренированные водоразделы (<200 м)	7. Елово-пихтовые крупнотравно- травяные
	Слабополосые склоны (1-3°), почвы дерново-подзолистые, дерновые лесные и серые лесные	2. Сосняки злаково-разнотравные
		8. Елово-пихтовые травяные

	Боровые террасы рек, пологие (3-5°) и средней крутизны (5-8°), склоновые поверхности, почвы дерново-подзолистые и светло-серые лесные	3. Сосняки бруснично-разнотравные
		8. Елово-пихтовые травяные
	Плоские и плоско-вогнутые депрессии, западины, лога (Н < 180 м) почвы глее-подзолистые, дерново-глеевые перегнойные и перегнойно-торфяные	9. Елово-пихтовые с кедром крупнотравные
		14. Елово-пихтово-кедровые зеленомошные
II. Высокие (абс. выс. 240 - 272 м) полого-увалистые или волнистые, денудационные и денудационно-эрозионные южнотасжные равнины, сложенные элювио-делювиальными и аллювиально-делювиальными глинами и лессовидными суглинками, легкими суглинками, супесями, на речных террасах песками и галечниками.	Плоские плакорные поверхности (0-1°), почвы дерновые лесные темноцветные, темно-серые лесные	1. Сосняки разнотравно-крупнотравные
		7. Елово-пихтовые крупнотравно- травяные
	Слабопологие склоны (1-3°), почвы дерново-подзолистые и серые лесные	2. Сосняки разнотравные
		8. Елово-пихтовые травяные
III. Высокие (абс. выс. 194-288 м) полого-увалистые или волнистые, увалистые и грядовые, денудационные, денудационно-эрозионные подтаежные равнины, сложенные светло-бурыми и желто-бурыми облессованными делювиально-элювиальными средними и легкими пылевато-иловатыми глинами, на высоких и средних речных террасах легкими суглинками и супесями.	Плоские или слегка выпуклые водораздельные поверхности (0-1°), почвы дерновые лесные темноцветные и темно-серые лесные	1. Сосняки разнотравно-крупнотравные
	Слабопологие склоны (уклон 1-3°), почвы дерново-подзолистые, дерновые лесные кислые и серые лесные	2. Сосняки разнотравные
		8. Елово-пихтовые травяные
	Пологие склоны (уклон 3-5°), почвы дерново-подзолистые и светло-серые лесные	3. Сосняки бруснично-разнотравные
	Склоны средней крутизны (уклон 5-8°), почвы дерново-подзолистые и светло-серые лесные	4. Сосняки разнотравно-зеленомошные

Классификация лесорастительных условий, которые во многом определяют состав, структуру и направление развития растительного покрова, проводилась с использованием ГИС-технологий на основе сопряженного анализа разнородных данных в ГИС (Ryzhkova, Danilova, 2012). Для выделения территорий, однородных по климатическим (среднегодовым годовым осадкам и средним температурам июля), орографическим (интервалы абсолютной высоты и уклонов поверхности), эдафическим и биотическим показателям, использовался метод неуправляемой классификации (ISODATA) (Richards, Jia, 2005). Количество классов для неуправляемой классификации определялось с помощью анализа топографических профилей, построенных на основе растрового слоя абсолютных высот SRTM-3-DEM, обзора литературных, картографических и фондовых материалов (Ландшафты юга Восточной Сибири, 1977; Ландшафтная карта СССР, 1987).

Процесс дешифрирования космических изображений базировался на традиционной схеме, включающей их предварительную обработку, классификацию и интерпретацию, анализ точности классифицированных изображений (Danilova et al., 2012). Классификация снимков

выполнялась по методу максимального правдоподобия (англ. MAXLIKE). Обучающие выборки для классификатора создавались на основе данных лесоинвентаризации с применением метода автоматизированного формирования эталонных выборок (Корец и др., 2007). Верификация тематических карт и качество классификации проводились с использованием коэффициента Каппа.

Для автоматизации формирования карт лесорастительных условий и динамики лесной растительности в исследовании применялся метод экспертной классификации, реализованный в модуле Knowledge Engineer/ERDAS IMAGINE (ERDAS field guide, 1999), с использованием современного программного обеспечения (ESRI ArcGIS, ERDAS Imagine, Trimble eCognition Developer) и данных ДЗЗ (Landsat, Sentinel) в сочетании с ГИС-технологиями.

Результаты

Проведена актуализация составленной ранее по снимкам Landsat-5 карты восстановительной динамики лесной растительности в южной части приенисейской Сибири на основе разработанного ранее алгоритма автоматизированной классификации и картографирования лесорастительных условий и лесной растительности (Рыжкова и др., 2016). Получена карта динамики лесной растительности, отражающая восстановительные ряды и актуальные возрастные стадии лесного покрова (на 2024 год) в разных лесорастительных условиях.

Классы актуального состояния растительного покрова выделены по результатам автоматизированного дешифрирования космического снимка Sentinel-2. С использованием электронных слоев карт потенциальных лесорастительных условий и восстановительных рядов лесной растительности проведена интерпретация полученных классов как восстановительно-возрастных стадий: 1) нелесные земли, 2) начальные стадии восстановления (на горях, вырубках, заброшенных пашнях), сосновые молодняки (10-25 лет), 3) смешанные лиственно-хвойные насаждения (25-45 лет), 4) хвойно-лиственные молодняки и средневозрастные насаждения (25-55 лет), 5) смешанные лиственно-хвойные насаждения (45-65 лет), 6) смешанные хвойно-лиственные насаждения (55-85 лет), 7) припевающие хвойные насаждения (75-110 лет).

На основе сопряженной классификации лесорастительных условий и растительности разработана легенда карты восстановительной динамики лесной растительности (табл. 2).

Таблица 2.

**Фрагмент легенды карты восстановительной динамики лесной растительности
для тестовой территории**

Лесорастительные условия		Растительность		
№ ГМК ЛУ	Классы интервалов уклонов	Коренная, преобладающие восстановительные ряды	Производная (типы насаждений), стадия, породы, возраст	
			1990 год	2024 год
III.	0-1	1. Сосняки разнотравно-крупнотравные	3 Осина, береза (до 40 лет), 4 сосна с березой, осиной (40-80), 6 сосна (80-120) 7 сосна (более 120) 1 нелесные земли	6 Осина, береза с сосной (55-85) 5 сосна с березой, осиной (45-65) 4 осина, береза (25-55) 2 сосновые молодняки (10-25) 1 нелесные земли

1-3	2. С. разнотравные	3 Осина, береза (до 40), 4 сосна с березой, осиной (40-80), 1 нелесные земли 6 сосна (80-120)	5 сосна с березой, осиной (45-65) 3 сосна с березой осиной (25-45) 2 сосновые молодняки (10-25) 6 осина, береза с сосной (55-85)
3-5	3. С. бруснично-разнотравные	3 Осина, береза (до 40 лет), 4 сосна с березой, осиной (40-80), 5 сосна (40-80), 6 сосна (80-120)	3 сосна с березой осиной (25-45) 5 сосна с березой, осиной (45-65) 7 сосна (75-110) 2 сосновые молодняки (10-25)
>5	4. С. разнотравно-зеленомошные	3 Осина, береза (до 40 лет), 4 сосна с березой, осиной (40-80), 6 сосна (80-120) 7 сосна (более 120)	1 нелесные территории 3 сосна с березой осиной (25-45) 5 сосна с березой, осиной (45-65) 2 сосновые молодняки (10-25)

На рис. 2 представлены фрагменты карт, сформированных на основе автоматизированного дешифрирования изображений Landsat-5 (пространственное разрешение 30 м) и Sentinel-2 (пространственное разрешение 10 м).

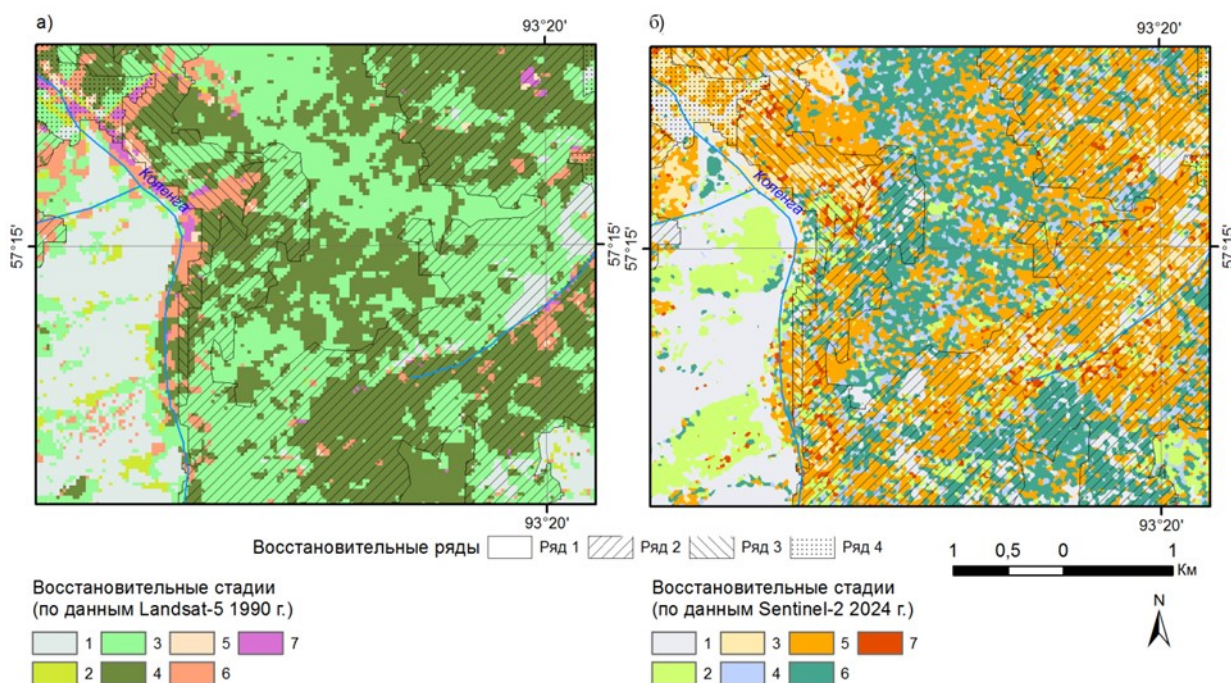


Рис. 2. Фрагменты карт восстановительной динамики тестовой территории по спутниковым данным 1990 и 2024 годов: а) 1 - нелесные земли, 2 - начальные стадии восстановления (на гарях, вырубках, заброшенных пашнях), 3 - лиственные насаждения (молодняки) (до 40 лет), 4 - смешанные хвойно-лиственные насаждения (40-80 лет), 5 - хвойные средневозрастные и приспевающие (40-80 лет), 6 - хвойные приспевающие и спелые насаждения (80-120 лет), 7 - спелые и перестойные хвойные насаждения (более 120 лет); б) 1 - нелесные земли, 2 - начальные стадии восстановления (на гарях, вырубках, заброшенных пашнях), сосновые молодняки (10-25 лет), 3 - смешанные лиственно-хвойные насаждения (25-45 лет), 4 - хвойно-лиственные молодняки и средневозрастные (25-55 лет), 5 - смешанные лиственно-хвойные насаждения (45-65 лет), 6 - смешанные хвойно-лиственные насаждения (55-85 лет), 7 - приспевающие хвойные насаждения (75-110 лет).

На данном этапе работы проведён предварительный качественный анализ изменений в лесном покрове за прошедший период. Важно было выяснить, возможно ли будет сравнить классы, полученные при дешифрировании снимков разного разрешения.

На фрагментах карт представлены четыре восстановительных ряда коренной растительности. Преобладают 1 и 2 ряды, а также на небольшой площади 3 и 4 ряды (табл. 2). Сравнение данных фрагментов (Рис. 2) показывает, что возрастные стадии на разных картах

не совсем равнозначны. Классы, полученные по данным Landsat-5, являются более обобщенными, а карта, составленная по данным Sentinel-2, отличается большей детальностью, что связано с разной разрешающей способностью использованных снимков. Поэтому выявление изменений в возрастной структуре насаждений проводилось в пределах каждого восстановительного ряда, то есть типа лесорастительных условий.

В таблице 2 показаны преобладающие возрастные стадии лесных насаждений в пределах каждого восстановительного ряда за рассматриваемый период времени (34 года). В 1990 году преобладали 3 и 4 возрастные стадии, в 2024 году - это 5 и 6 стадии. Наиболее заметные изменения наблюдаются на начальных стадиях восстановления, например, на данном фрагменте это зарастание заброшенных пашен (переход 1 стадии во 2). Во всех рядах прослеживается переход небольших по площади припевающих и спелых насаждений (6 и 7 стадии) в 1 стадию, что является результатом выборочных рубок. Лиственные и хвойно-лиственные насаждения (3 и 4 стадии) переходят в 5 и 6 стадии (хвойно-лиственные и лиственно-хвойные).

На следующем этапе исследований планируется провести геоинформационный анализ динамики площадей и породного состава возрастных стадий в разных восстановительных рядах лесной растительности, что позволит проследить темпы и направленность сукцессионной динамики в разных типах лесорастительных условий.

Выводы

Разработанная методика сопряженного анализа разнородных данных в ГИС использована для обновления карты восстановительной динамики лесного покрова, составленной ранее по материалам снимков Landsat-5. На примере тестовой территории на основе сопряженного анализа данных космической мультиспектральной съемки, цифровой модели рельефа местности (ЦМР) и наземных данных получена карта, отражающая актуальные возрастные стадии восстановительных рядов лесной растительности в разных лесорастительных условиях.

Использование эколого-генетического подхода является очень перспективным при изучении лесовосстановительных сукцессий. Карта динамики лесного покрова и разработанная на основе сопряженной классификации лесорастительных условий и лесной растительности легенда использованы для анализа и систематизации выявленных изменений лесного покрова в разных лесорастительных условиях. Несмотря на разную детальность исходной и актуальной карт, удалось проследить основные тенденции изменения возрастной структуры насаждений в разных восстановительных рядах за прошедший период времени (34 года). Наиболее заметные изменения выявлены при зарастании заброшенных пашен (переход 1 стадии во 2), а также в местах выборочных рубок (6 и 7 стадии в 1 стадию). В целом можно констатировать, что в 1990 году преобладали 3 и 4 возрастные стадии, в 2024 году - это 5 и 6 стадии.

Сочетание автоматизированных методов выделения границ с экспертными оценками при идентификации выделенных классов позволяет выявлять характеристики растительного покрова, которые непосредственно не отображаются на космических снимках, но являются объектами тематического картографирования (типы лесорастительных условий, восстановительные ряды насаждений, возрастные стадии).

Предложенный подход позволяет оперативно создавать и обновлять карты лесного покрова, что особенно актуально для таежных регионов Сибири.

Работа выполнена за счет средств государственного задания Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН - Обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН FWES-2024-0023 «Динамика компонентов углеродного цикла экосистем Сибири в меняющемся климате».

Библиографический список

1. Беляева Н.Г., Попов С.Ю. Изменение лесистости западной части Наро-Фоминского района Московской области за последние 200 лет // Лесоведение. 2016. № 1. С. 44–54.
2. Гнеденко А.Е. Картографирование динамики лесов севера Московской области по спутниковым снимкам серии Landsat // Геоботаническое картографирование. 2023. С. 8–47. <https://doi.org/10.31111/geobotmap/2023.28>
3. Данилова И.В., Рыжкова В.А., Онучин А.А. Использование спутниковых данных, цифровой модели рельефа и наземной информации для картографирования восстановительной динамики лесов // Геодезия и картография. 2013. № 9. С. 25–32.
4. Ермаков Н. Б., Полякова М.А., Попов Д. Ю., Голомовзин В. В. Моделирование пространственной организации растительности горных территорий на основе данных дистанционного зондирования и цифровой модели рельефа // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, спец. вып. № 2. С. 42–59.
5. Колесников Б.П. Кедровые леса Дальнего Востока: науч. изд. М.-Л, Изд-во АН СССР, 1956. 262 с.
6. Коновалова Т.И., Бессолицына Е.П., Владимиров И.Н. и др. Ландшафтно-интерпретационное картографирование. Новосибирск: Наука, 2005. 424 с.
7. Корец М. А., Данилова И. В., Черкашин В. П. Дистанционная индикация структуры лесных территорий // Региональные проблемы экосистемного лесоводства: сборник научных статей. Красноярск: Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2007. С. 52–68.
8. Королева Н.В., Тихонова Е.В., Ершов Д.В., Салтыков А.Н., Гаврилюк Е.А., Пугачевский А.В. Оценка масштабов зарастания нелесных земель в национальном парке «Смоленское Поозерье» за 25 лет по спутниковым данным Landsat // Лесоведение. 2018. № 2. С. 83–96. <https://doi.org/0.7868/S0024114818020018>.
9. Ландшафты юга Восточной Сибири. Масштаб 1:1 500 000. Отв. ред. В.Б.Сочава. Москва, 1977.
10. Ландшафтная карта СССР. Масштаб: 1:2 500 000. Отв. ред. И.С. Гудилин. Москва, 1987.
11. Лапшина Е.И., Горбачев В.Н., Храмов А.А. Растительность и почвы Енисейского края // Растительность правобережья Енисея: сборник научных статей. Новосибирск: Наука, 1971. С. 21–66.
12. Лежнин С.А., Губаев А.В., Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Дергунов Д.М. Дистанционный мониторинг зарастания залежей Республики Марий Эл методом анализа главных компонент // Исследование Земли из космоса. 2024. № 2. С. 21–31 DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205961424020034>
13. Манько Ю.И. Лесообразовательный процесс и классификация лесной растительности // Лесоведение. 2004. № 5. С.3–9.
14. Смолоногов Е.П. Основные положения генетического подхода при построении лесотипологических классификаций // Экология. 1998. № 4. С. 256–261.
15. Смолоногов Е.П., Алесенков Ю.М., Поздеев Е.Г. Географо-генетический подход к построению лесотипологических классификаций // Лесоведение. 2004. № 5. С. 76–80.
16. Средняя Сибирь: науч. издание. М: Наука, 1964. 480 с.
17. Рыжкова В. А. Закономерности восстановительной динамики подтаежных и горнотаежных лесов // Региональные проблемы экосистемного лесоводства: сборник научных статей. Красноярск: Изд-во Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2007. С. 78–90.
18. Рыжкова В.А., Данилова И.В., Корец М.А. Классификация лесного покрова и геоинформационное моделирование его восстановительной динамики (на примере южной части приенисейской Сибири) // Сибирский экологический журнал. 2016. № 6. С.817–831. DOI: 10.15372/SEJ20160602.
19. Черненко Т.В., Пузаченко М.Ю., Беляева Н.Г., Морозова О.В. Оценка состава и структуры лесного покрова Московской области по наземным и дистанционным данным // Изв. РАН. Сер. географ. 2019. № 4. С. 112–124. <https://doi.org/10.31857/S2587-556620194112-124>.
20. Danilova I., Ryzhkova V., Korets M. Recognizing vegetation regeneration stages in Landsat imagery // BOSQUE. 2012. 33(3). P. 359–362.
21. ERDAS field guide. Fifth edition. Atlanta, Georgia: USA: ERDAS Inc., 1999. 672 p.
22. Khatancharoen C., Tsuyuki S., Bryanin S., Sugiura K., Seino T., Lisovsky V., Borisova I., Wada N. Long-Time Interval Satellite Image Analysis on Forest-Cover Changes and Disturbances around Protected Area, Zeya State Nature Reserve, in the Russian Far East // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. N 7, 1285. P. 1–23. <https://doi.org/10.3390/rs13071285>.
23. Kurbanov, E.; Tarasova, L.; Yakhyayev, A.; Vorobev, O.; Gozalov, S.; Lezhnin, S.; Wang, J.; Sha, J.; Dergunov, D.; Yastrebova, A. Detecting trends in post-fire forest recovery in Middle Volga from 2000 to 2023 // Forests. 2024. 15. 1919. <https://doi.org/10.3390/f15111919>.

24. Popova A. Improving the Accuracy of Tree Species Mapping by Sentinel-2 Images Using Auxiliary Data—A Case Study of Slyudyanskoye Forestry Area near Lake Baikal // *Forests*. 2025. 16. 487 <https://doi.org/10.3390/f16030487>
25. Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A., Krylov A.M., McCarty J.L., Radeloff V.C., Hansen M.C. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive // *Remote Sensing of Environment*. 2015. Vol. 159. P. 28–43. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.027>.
26. Richards J., Jia X. Remote sensing digital image analysis: an introduction / Birkhäuser, Basel, 2005. Switzerland. DOI: 10.1007/3-540-29711-1.
27. Ryzhkova V., Danilova I. GIS-based classification and mapping of forest site condition and vegetation // *BOSQUE*. 2012. 33(3). P. 293-297.
28. SRTM-3-DEM (Shuttle Radar Topography Mission, Digital Elevation Model) [Electronic resource]. URL: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/russia.htm>. – 12.01.24
29. Zhu Z. Change detection using Landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2017. 130. 370–384. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.06.013>.

References

1. Belyaeva N.G., Popov S.Yu. Izmenenie lesistosti zapadnoi chasti Naro-Fominskogo raiona Moskovskoi oblasti za poslednie 200 let (Changes in forest cover in the former Vereisky district of the Moscow region over the past 200 years), *Lesovedenie*, 2016, No. 1, P. 44–54.
2. Gnedenko A.E. Kartografirovaniye dinamiki lesov severa Moskovskoi oblasti po sputnikovym snimkam serii Landsat (Mapping the dynamics of forests in the north of the Moscow Region based on satellite images of the Landsat series), *Geobotanicheskoe kartografirovaniye*, 2023, P. 8–47. <https://doi.org/10.31111/geobotmap/2023.28>
3. Danilova I. V., Ryzhkova V.A., Onuchin A.A. Ispol'zovaniye sputnikovyykh dannykh, cyfrovoy modeli rel'efa i nazemnoy informatsii dlya kartografirovaniya vosstanovitel'noy dinamiki lisov. (Using of satellite imagery, digital elevation model (DEM) and field data for mapping of forest regeneration dynamics), *Geodesy and Cartography*, 20136, No. 9, P. 25-32.
4. Ermakov N. B., Poljakova M.A., Popov D. Ju., Golomovzin V. V. Modelirovaniye prostranstvennoy organizatsii rastitel'nosti gornyykh territoriy na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya i cifrovoy modeli rel'efa (Modeling the spatial organization of vegetation in mountainous areas based on remote sensing data and a digital elevation model) *Vychislitel'nye tekhnologii.*, 2007, Vol. 12, spec. vyp. No. 2. P. 42–59.
5. Kolesnikov, B.P. Kedrovyye lesa Dal'nego Vostoka. (Siberian pine forests of the Russian Far East). Moscow-Leningrad, Nauka, 1956. 261 p.
6. Konovalova T. I et al. Landshaftno-interpretatsionnoye kartografirovaniye. Novosibirsk: Nauka, 2005. 424 p.
7. Korets M.A., Danilova I.V., Cherkashin V.P. Distantsionnaya indikatsiya struktury lesnykh territoriy. (Remote indication of forest landscape structure. In: Regional Sustainable Forestry Problems). Krasnoyarsk, Sukachev Institute of Forest, 2007, P 52-68.
8. Koroleva N.V., Tikhonova E.V., Ershov D.V., Saltykov A.N., Gavriluk E.A., Pugachevskii A.V. Otsenka masshtabov zarastaniya nelesnykh zemel' v natsional'nom parke «Smolenskoe Poozer'e» za 25 let po sputnikovym dannym, (Landsat Assessment of the scale of overgrowth of non-forest lands in the Smolensk Poozerie National Park over 25 years using Landsat satellite data), *Lesovedenie*, 2018, № 2, P. 83–96. <https://doi.org/10.7868/S0024114818020018>.
9. Landshafty juga Vostochnoy Sibiri. (Landscapes of Southeastern Siberia (1:1 500 000 map)), Sochava V.B. ed., Moscow, 1977.
10. Landshaftnaya karta SSSR. (The USSR Landscape Map (1:2,500,000)). Gudilin I.S. ed., Moscow, 1987.
11. Lapshina, E.I.; Gorbachev, V.N.; Khramov, A.A. Rastitel'noy i pochvy Yeniseyskogo kryajza. (Vegetation and soils of Yenisei Mountain Chain. In: Vegetation on the right bank of Yenisei River). Novosibirsk: Nauka, 1971. P. 21-66.
12. Lezhnin S.A., Gubaev A.V., Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A., Dergunov D.M. Distantsionnyi monitoring zarastaniya zalezhei Respubliki Marii El metodom analiza glavnykh component (Remote monitoring of deposit overgrowth in the Mari El Republic using principal component analysis), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2024, No. 2, P. 21-31 DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205961424020034>
13. Man'ko Yu.I. Lesoobrazovatel'nyi protsess i klassifikatsiya lesnoi rastitel'nosti (Forest formation process and classification of forest vegetation), *Lesovedenie*, 2004, No. 5, P.3-9.
14. Smolonogov E.P. Osnovnye polozheniya geneticheskogo podkhoda pri postroenii lesotipologicheskikh klassifikatsii (Basic principles of the genetic approach in constructing forest typological classifications), *Ekologiya*, 1998, No. 4, P. 256-261.
15. Smolonogov E.P., Alesnikov Yu.M., Pozdeev E.G. Geografo-geneticheskii podkhod k postroeniyu lesotipologicheskikh klassifikatsii (Geographical-genetic approach to the construction of forest typological classifications), *Lesovedenie*, 2004, No. 5. P. 76-80.
16. Srednyaya Sibir'. (Central Siberia). Moscow, Nauka, 1964. 480 p.

17. Ryzhkova V.A. Zakonomernosti vosstanovitel'noy dinamiki podtajezhnyh i gornotaejzhnyh lesov. (Regeneration of subtaiga and mountain taiga forests. In: Regional Sustainable Forestry Problems), Sukachev Institute of Forest Publications, Krasnoyarsk, 2007, P. 78-90.
18. Ryzhkova V.A., Danilova I.V., Korets M.A. Klassifikacija lesnogo pokrova i geoinformacionnoe modelirovanie ego vosstanovitel'noj dinamiki (na primere juzhnoj chasti prienisejskoj Sibiri) (Classification of forest cover and geoinformation modeling of its restoration dynamics (using the southern part of Yenisei Siberia as an example)), *Sibirskij jeologicheskij zhurnal*, 2016, No. 6, P. 817-831.
19. Chernen'kova T.V., Puzachenko M.Yu., Belyaeva N.G., Morozova O.V. Otsenka sostava i struktury lesnogo pokrova Moskovskoi oblasti po nazemnym i distantsionnym dannym (Assessment of the composition and structure of forest cover in the Moscow region based on ground-based and remote sensing data), *Izv. RAN. Ser. geograf.*, 2019, No. 4, P. 112–124. <https://doi.org/10.31857/S2587-556620194112-124>.
20. Danilova I., Ryzhkova V., Korets M. Recognizing vegetation regeneration stages in Landsat imagery, *BOSQUE*, 2012, 33(3), pp. 359-362.
21. ERDAS Field Guide. Fifth edition. Atlanta, Georgia: USA: ERDAS Inc., 1999, 672 p.
22. Khatanchaev C., Tsuyuki S., Bryanin S., Sugiura K., Seino T., Lisovsky V., Borisova I., Wada N. Long-Time Interval Satellite Image Analysis on Forest-Cover Changes and Disturbances around Protected Area, Zeya State Nature Reserve, in the Russian Far East, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, N 7, 1285, P. 1–23. <https://doi.org/10.3390/rs13071285>.
23. Kurbanov, E.; Tarasova, L.; Yakhyayev, A.; Vorobev, O.; Gozalov, S.; Lezhnin, S.; Wang, J.; Sha, J.; Dergunov, D.; Yastrebova, A. Detecting trends in post-fire forest recovery in Middle Volga from 2000 to 2023, *Forests*, 2024, 15, 1919. <https://doi.org/10.3390/f15111919>.
24. Popova A. Improving the Accuracy of Tree Species Mapping by Sentinel-2 Images Using Auxiliary Data—A Case Study of Slyudyanskoye Forestry Area near Lake Baikal, *Forests*, 2025, 16, 487. <https://doi.org/10.3390/f16030487>.
25. Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A., Krylov A.M., McCarty J.L., Radeloff V.C., Hansen M.C. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 159, P. 28–43. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.027>.
26. Richards J., Xiuping J. Remote sensing digital image analysis: an introduction. Birkhäuser, Basel, 2005. Switzerland.
27. Ryzhkova V., Danilova I. GIS-based classification and mapping of forest site condition and vegetation, *BOSQUE*, 2012, 33(3). P. 293-297.
28. SRTM-3-DEM (Shuttle Radar Topography Mission, Digital Elevation Model). 2010. Available at <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/russia.htm>.
29. Zhu Z. Change detection using Landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 130, 370–384. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.06.013>.