

Классификация лесного покрова и геоинформационное моделирование его восстановительной динамики (на примере южной части приенисейской Сибири)

В. А. РЫЖКОВА, И. В. ДАНИЛОВА, М. А. КОРЕЦ

*Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28
E-mail: vera@ksc.krasn.ru*

Статья поступила 16.03.16

Принята к печати 09.06.16

АННОТАЦИЯ

На примере территории южной части приенисейской Сибири разработана автоматизированная сопряженная классификация лесорастительных условий и лесной растительности и составлены карты потенциальных лесорастительных условий и восстановительной динамики лесного покрова на основе автоматизированного дешифрирования данных дистанционного зондирования и разработанной системы сопряженного анализа разнородных данных в ГИС. Предложенный подход позволяет оперативно создавать и обновлять карты лесного покрова, что особенно актуально для обширных таежных регионов Сибири.

Ключевые слова: лесной покров, потенциальные лесорастительные условия, цифровая модель рельефа (ЦМР), географическая информационная система (ГИС), данные дистанционного зондирования (ДДЗ), карта восстановительной динамики лесного покрова.

Растительный покров является наиболее динамичным компонентом природных систем. Сложность организации и большое разнообразие сообществ, структурных элементов растительного покрова, а также представления о растительном покрове как объекте, имеющем свойства континуума, затрудняют выделение в нем дискретных частей как единиц классификации. Однако систематизация объектов является необходимым этапом любого исследования, а выбор принципов классификации определяется конкретными целями и задачами.

С проблемами классификации тесно связано решение задач пространственного моделирования разнообразия растительного покрова – его картографирование. Отражение этого разнообразия на карте требует анализа разнообразной информации о структуре и динамике растительности, факторах среды. Картографирование растительного покрова – сложный процесс, в основе которого лежит анализ экологических и более общих географических связей растительных сообществ.

За последние десятилетия произошла смена парадигмы в картографии. На смену тра-

диционному подходу, когда карта рассматривалась как конечный продукт, сообщая информацию о пространственном распределении объектов (парадигма сообщения), а исходная, неклассифицированная информация являлась недоступной, широкое распространение получил альтернативный подход, основанный на том, что карта должна не только сообщать информацию, но и позволять ее анализировать (аналитическая парадигма) [ДеМерс, 1999]. Карта уже не статичный объект, а компьютерная база данных. Такой подход в корне меняет принципы отражения на карте связей растительности с факторами среды, позволяет показать статистический характер связей между различными компонентами экосистем, что значительно ближе к тому, что мы наблюдаем в природе.

В связи с возрастающим антропогенным влиянием растительный покров стремительно изменяется. Карты, составленные традиционными методами 50–60 лет назад, существенно устарели. Известны примеры создания цифровых глобальных карт растительности на основе данных дистанционного зондирования (ДДЗ) Земли, которые отражают общие закономерности распространения древесных пород [Барталев и др., 2011; Жарко, Барталев, 2014]. В настоящее время для территории Сибири нет карт актуальной растительности, отражающих тенденции восстановительной динамики лесов.

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., 2015]. Карты растительного покрова разной степени детальности фактически являются пространственными моделями, отражающими разнообразие лесорастительных условий и растительности, и могут использоваться в качестве основы для пространственного представления и моделирования различных параметров экосистем.

Цель работы – разработка автоматизированных подходов к систематизации и картографированию растительного покрова на основе ГИС, ДДЗ и материалов наземных исследований.

Для достижения поставленной цели в ходе исследований поэтапно решались следующие задачи: 1) инвентаризация и предварительная классификация лесного покрова с учетом закономерностей его естественной и антропогенной динамики; 2) автоматизированные систематизация и картографирование лесорастительных условий; 3) автоматизированное дешифрирование космических мультиспектральных изображений; 4) формирование карт актуального состояния лесного покрова с учетом его сукцессионной динамики.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Район работ. Исследования проводились в южной части приенисейской Сибири (56–58° с. ш., 92–96° в. д.). Выбранная территория характеризуется относительно высоким 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. Западно-Сибирская равнина расположена к западу от Енисея, южная часть Енисейского кряжа в правобережной части представляет собой западную окраину Средне-Сибирского плоскогорья [Средняя Сибирь..., 1964]. Этими особенностями, прежде всего, обуславливается природное разнообразие произрастающей здесь растительности, на которое накладывается влияние антропогенных факторов.

Левобережная часть района исследований представлена южно-таежными и подтаежными лесами с участками лесостепной растительности и сельскохозяйственными угодьями [Рыжкова, 2002]. Под сосновыми травяными лесами в пределах эрозионно-денудационной приенисейской равнины преобладают серые лесные оподзоленные и дерново-подзолистые, часто со вторым гумусовым горизонтом, почвы, под темнохвойными лесами распространены почвы подзолистого ряда [Горбачев, 1967; Горбачев, Попова, 1992].

На правобережной территории в пределах южной части Енисейского кряжа выделяются два высотно-климатических комплекса типов леса – подтаежный и горно-таежный, восточнее – лесостепные ландшафты, окруженные подтаежными лесами. Господствующие на Енисейском кряже леса относятся к формации елово-кедрово-пихтовых лесов [Лапшина и др., 1971]. Характерной особенностью этой формации темнохвойной тайги является полидоминантность древесного полога с явным преобладанием пихты и постоянным присутствием кедра и ели, на отдельных участках – сосны и лиственницы. Участие лиственных пород сильно варьирует (от 1–2 до 10 единиц в составе насаждений), что, как правило, связано с восстановительными процессами после рубок и пожаров и возрастными изменениями насаждений. Таким образом, в составе древесного яруса часто насчитывается 6–7 пород, и существует множество вариантов их соотношений в разных лесорастительных условиях.

Леса данной территории характеризуются сильной 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]. В этой связи на первый план выступает вопрос о классификации растительных сообществ разного динамического состояния для выявления закономерностей хода сукцессионного процесса в пространстве и во времени.

Методы исследований. Для автоматизации процесса классификации и картографирования растительного покрова требуется использование объективных количественных критериев. Эта проблема успешно решается при создании классификации растительного покрова в рамках географо-генетического подхода [Колесников, 1956]. 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 терри-

тории объединяются общностью происхождения, т. е. рассматриваются как возрастные стадии характерного для этих условий коренного насаждения. Коренные и производные типы насаждений группируются в восстановительный ряд растительности – тип леса, т. е. ряд генетически связанных и последовательно сменяющихся насаждений, которые развиваются в пределах определенного типа лесорастительных условий.

Тип лесорастительных условий является важнейшей составной частью понятия “тип леса”, 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].

Неоспоримым преимуществом данного подхода к классификации растительного покрова является его комплексность, классификация производится не только по признакам растительности, но и по комплексу факторов, в числе которых условия среды, в значительной степени определяющие направление сукцессионного развития растительных сообществ.

Классификация лесорастительных условий, которые во многом определяют состав и структуру, а также направление развития растительного покрова, проводится с использованием ГИС-технологий на основе сопряженного анализа разнородных данных [Ryzhkova, Danilova, 2012]. Формирование комплекса лесорастительных условий во многом определяется климатом и рельефом земной поверхности. Для выделения территорий, однородных по климатическим (среднемесячные годовые осадки и средние температуры июля) и морфометрическим (интервалы абсолютной высоты и уклонов поверхности) показателям, используется метод неуправляемой классификации (ISODATA) [Richards, Xiuping, 2005]. Данный метод требует задания начальных условий разбиения, поэтому для определения количества классов для неуправляемой классификации проводится анализ орографического строения территории с использованием метода построения топографических профилей на основе растрового слоя абсолютных высот SRTM-3

[SRTM-3-DEM..., 2010], обзор литературных, картографических и фондовых материалов. По результатам анализа всей имеющейся информации определяется количество классов, которые могут быть реально интерпретированы на выбранном уровне, соответствующие, например, видам ландшафтов [Ландшафтная карта..., 1987]. Таким образом, автоматизированной классификации изначально придается определенный “физический смысл”, что помогает интерпретировать полученные классы.

Процесс дешифрирования космических изображений базируется на традиционной схеме, включающей их предварительную обработку, классификацию и интерпретацию, анализ точности классифицированных изображений [Danilova et al., 2012]. В процессе предварительной обработки проводится географическая привязка и топографическая нормализация изображений. Классификация снимков выполняется по методу максимального правдоподобия (MAXLIKE). Обучающие выборки для обучения классификатора создаются на основе данных лесоинвентаризации по методу автоматизированного формирования эталонных выборок, предложенному М. А. Корецом с соавт. [2007]. Верификация тематических карт и качество классификации оценивается с использованием коэффициентов Каппа [Richards, Xiuping, 2005].

Для автоматизации процесса формирования карт лесорастительных условий и динамики лесной растительности используется метод экспертной классификации, реализованный в модуле Knowledge Engineer/ERDAS IMAGINE [ERDAS, 1999].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На примере территории южной части приенисейской Сибири разработана автоматизированная сопряженная классификация лесорастительных условий и лесной растительности и составлены карты восстановительной динамики лесного покрова на основе автоматизированного дешифрирования данных дистанционного зондирования и разработанной системы сопряженного анализа разнородных данных в ГИС [Данилова и др., 2013].

Работа включала в себя следующие основные этапы.

1. Систематизация растительного покрова, разработка предварительной сопряженной классификации растительности и лесорастительных условий как основы легенды карты.

Для разработки предварительной классификации проведен анализ исследуемой территории с использованием информации, содержащейся в Банке данных ГИС (тематических карт, литературных данных, материалов наземных исследований). С использованием цифровой модели рельефа (ЦМР) построены обобщенные топографические профили, отражающие орографические особенности территории. Выявлены закономерности распределения растительности по основным элементам рельефа, приуроченность типов растительных сообществ к определенным интервалам абсолютных высот, формам и элементам мезорельефа. В результате разработана предварительная сопряженная классификация растительности и лесорастительных условий на уровне генетических рядов типов леса и типов лесорастительных условий, основанная на принципах географо-генетического подхода Б. П. Колесникова [Рыжкова, 2007; Ryzhkova et al., 2015].

2. Автоматизированная классификация и картографирование потенциальных лесорастительных условий.

Растительный покров формируется под влиянием большого числа факторов. Согласно Б. П. Колесникову, лесорастительные условия характеризуются комплексом климатических, орографических, почвенно-гидрологических факторов. Влияние климата настолько велико, что до известных пределов подчиняет себе влияние других факторов.

Для выделения пространственных границ классов, однородных по комплексу заданных факторов, определяющих специфику лесорастительных условий, разработан специальный алгоритм анализа разнородных данных в ГИС [Ryzhkova, Danilova, 2012]. На основе профилей и ландшафтных карт [Ландшафты..., 1977; Ландшафтная карта..., 1987] для исследуемой территории проанализировано разнообразие геоморфологических условий и выделены участки, относительно однородные

Геоморфологические комплексы лесорастительных условий и их статистические характеристики

Номер	Интервалы абсолютной высоты над ур. м. и уклона поверхности	Геоморфологические комплексы лесорастительных условий (ГМК ЛУ)
	1	
I	183–227 м 0–3,0°	Возвышенные плоские и полого-волнистые озерно-аллювиальные аккумулятивно-денудационные южнотаежные равнины, сложенные светло-бурыми и желто-бурыми облессованными делювиально-аллювиальными остаточно-карбонатными глинами. Почвы лугово-черноземные, дерново-луговые, дерново-глеевые, серые лесные глеевые, серые и темно-серые со вторым гумусовым горизонтом
II	240–272 м 0–2,1°	Высокие полого-увалистые или волнистые, денудационные и денудационно-эрозионные южнотаежные равнины, сложенные элювио-делювиальными и аллювиально-делювиальными глинами и лессовидными суглинками, легкими суглинками, супесями, на речных террасах песками и галечниками. Почвы серые лесные, темно-серые, часто со вторым гумусовым горизонтом, в сочетании с серыми глеевыми, дерново-луговыми и дерново-подзолистыми
III	194–288 м 0–5,6°	Высокие 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. Почвы темно-серые и серые лесные, дерново-подзолистые и подзолистые
IV	297–363 м 0–3,1°	Низкие южнотаежные плато холмисто-грядовые, волнистые, пологосклоновые, слаборасчлененные, сложенные элювио-делювиальными и аллювиально-делювиальными бурыми и коричнево-бурыми очень плотными глинами. Почвы дерново-подзолистые и серые лесные
V	357–407 м 0–5,6°	Высокие южнотаежные плато, холмисто-грядовые, грядово-сопочные, расчлененные (склоны различной крутизны), сложенные бурыми и красно-бурыми щебнистыми тяжелыми глинами, суглинками и супесями пролювиальными и делювиально-элювиальными (на склонах с прослоями гравия и гальки). Почвы дерново-подзолистые, серые лесные глееватые
VI	155–2269 м 0–4,9°	Низкие и возвышенные полого-волнистые аккумулятивно-денудационные и приречные аллювиально-аккумулятивные лесостепные равнины в сочетании с увалистыми и грядовыми расчлененными участками денудационно-эрозионных равнин. Почвообразующие породы: светло-бурые и желто-бурые облессованные делювиально-аллювиальные средние и легкие пылевато-иловатые, остаточно-карбонатные и песчаные глины, лессовидные суглинки и облессованные глины на средних и высоких террасах рек, пески и галечники на низких, буровато-красные тяжелые суглинки и глины на высоких водоразделах. Почвы: выщелоченные и обыкновенные черноземы, серые лесные почвы, темно-серые со вторым гумусовым горизонтом, лугово-черноземные, торфяно-болотные
VII	250–362 м 0–7,5°	Высокие холмистые, пологоувалистые и увалистые денудационные, денудационно-эрозионные южнотаежные предгорные равнины и низкие волнистые плато. Почвообразующие породы: красные и коричнево-бурые элювиально-делювиаль-

1	2	3
		ные тяжелые глины и суглинки, красно бурые щебнистые суглинки и супеси; делювиально-аллювиальные отложения по окраинам кряжа: маломощные галечники, желто-бурые легкие суглинки, песчаные, супесчаные, суглинистые образования на красноцветных песчаниках, глинистый элювий и каменистый и суглинисто-щебнистый красно-бурый делювий на траппах. Почвы дерново-подзолистые, подзолистые на тяжелых почвообразующих породах, серые лесные
VIII	113–165 м 0–3,5°	Низкие плоские приречные аллювиально-аккумулятивные южнотаежные равнины на лессовидных суглинки и облессованных глинах на высоких и средних террасах, пески и галечники на низких. Почвы аллювиально-лугово-болотные, дерново-глеевые-перегнойно-торфянистые, серые глеевые, темно-серые со вторым гумусовым горизонтом и серые лесные почвы
IX	397–543 м 0–7,2°	Низкогорья и горы южнотаежные грядово-сопочные, крутосклонные, расчлененные (Южно-Енисейский кряж). Почвообразующие породы: элювиально-делювиальные красноцветные щебнисто-глинистые образования на метаморфических сланцах в сочетании со щебнистыми и глыбовыми осыпями и россыпями на гранитах, красные и коричнево-бурые тяжелые глины и суглинки. Почвы дерново-подзолистые, подзолистые и серые лесные
X	180–216 м 0–3,1°	Возвышенные плоские южнотаежные равнины на делювиальных и элювиально-делювиальных щебнистых и песчанистых супесях и суглинках, делювиально-аллювиальных маломощных галечниках и красновато-охристо-желтых щебнистых суглинках. Почвы дерновые лесные темноцветные, темно-серые и серые лесные, дерново-подзолистые со вторым гумусовым горизонтом

по характеру рельефа (по соотношению форм мезорельефа, интервалам абсолютных высот и степени расчлененности поверхности), соответствующие видам ландшафтов или их сочетаниям. Определено предварительное количество классов для неуправляемой классификации ЦМР.

Для выделения пространственных границ этих классов проведена неуправляемая классификация ЦМР-композиата (абсолютная высота и уклон поверхности) стандартным методом ISODATA, в результате выделено семь классов расчленения земной поверхности, относительно однородных по морфометрическим параметрам рельефа.

Учет климатических факторов включал анализ карт пространственного распределения среднемноголетних значений июльских температур воздуха и годовой величины атмосферных осадков, структура и принципы построения которых описаны в ранее опубликованных работах [Онучин, 2002; Онучин, Данилова, 2012].

С использованием метода ISODATA выполнена неуправляемая классификация двухслойного изображения (среднемноголетних годовых атмосферных осадков и средних температур воздуха июля) и выделено пять классов расчленения земной поверхности, относительно однородных по климатическим показателям, которые соответствуют фрагментам природно-климатических зон и подзон [Данилова и др., 2013].

Для автоматизации процесса классификации лесорастительных условий разработана предикатная система правил в модуле Knowledge Engineer/ERDAS IMAGINE [ERDAS, 1999]. Входными переменными дерева решений являлись классы расчленения земной поверхности по морфометрическим и климатическим показателям. В результате выделено 10 новых классов, которые интерпретированы с учетом геоморфологии [Брицына, 1962; Ландшафты..., 1977; Ландшафтная карта..., 1987], климата [Брицына и др., 1962а; Онучин, Данилова, 2012] и зональных типов

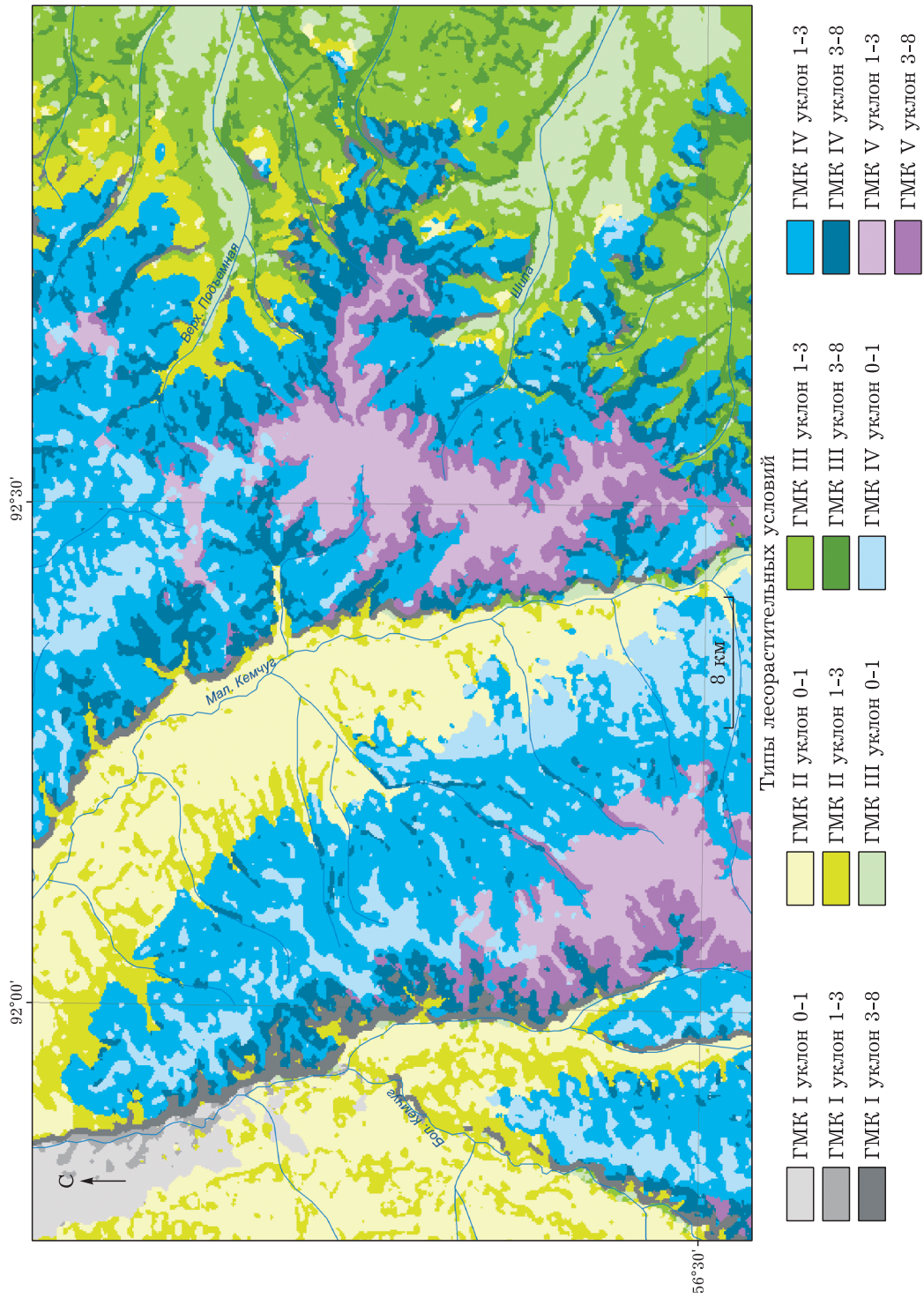


Рис. 2. Фрагмент слоя карты потенциальных лесорастительных условий (уровень типов лесорастительных условий)

Фрагмент сопряженной классификации лесорастительных условий и лесной растительности исследуемой территории

Потенциальные лесорастительные условия		Растительность	
ГМК ЛУ (см. табл. 1)	типы ЛУ (по интервалам уклонов)	коренная (преобладающие генетические типы леса)	производная (типы насаждений – возрастные стадии)
1	2	3	4
I	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	1. Начальные стадии восстановления
	Плоские и вогнутые (0–1°) менее дренированные водоразделы (<200 м)	7. Елово-пихтовые крупнотравно-травяные	2. Лиственные насаждения (до 40 лет)
	Слабополгие склоны (1–3°), почвы дерново-подзолистые, дерновые лесные и серые лесные	2. Сосняки злаково-разнотравные 8. Елово-пихтовые травяные	3. Лиственные насаждения (40–80 лет)
	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	4. Смешанные хвойно-лиственные насаждения (40–80 лет)
	Плоские и плоско-вогнутые депрессии, западины, лога ($H < 180$ м) почвы глееподзолистые, дерново-глеевые перегнойные и перегнойно-торфяные	9. Елово-пихтовые с кедром крупнотравные 14. Елово-пихтово-кедровые зеленомошные	5. Приспевающие и спелые хвойные насаждения (80–120 лет)
II	Плоские плакорные поверхности (0–1°), почвы дерновые лесные темноцветные, темно-серые лесные	1. Сосняки разнотравно-крупнотравные 7. Елово-пихтовые крупнотравно-травяные	6. Спелые и перестойные хвойные насаждения (более 120 лет)
	Слабополгие склоны (1–3°), почвы дерново-подзолистые и серые лесные	2. Сосняки разнотравные 8. Елово-пихтовый травяной	
III	Плоские или слегка выпуклые водораздельные поверхности (0–1°), почвы дерновые лесные темноцветные и темно-серые лесные	1. Сосняки разнотравно-крупнотравные	
	Слабополгие склоны (уклон 1–3°), почвы дерново-подзолистые, дерновые лесные кислые и серые лесные	2. Сосняки разнотравные	
	Пологие склоны (уклон 3–5°), почвы дерново-подзолистые и светлосерые лесные	3. Сосняки бруснично-разнотравные	
	Склоны средней крутизны (уклон 5–8°), почвы дерново-подзолистые и светло-серые лесные	4. Сосняки разнотравно-зеленомошные	
IV	Плоские и слабовыпуклые водоразделы (0–1°), почвы дерново-подзолистые	10. Елово-пихтовые мелкотравно-зеленомошные	
	Слабополгие склоны (1–3°), почвы дерново-подзолистые	11. Елово-пихтовые травяно-зеленомошные	
	Пологие склоны (3–5°), почвы дерново-подзолистые	12. Елово-кедрово-пихтовые травяно-зеленомошные	

1	2	3	4
V	<p>Плоские и выпуклые водоразделы, плоские участки склонов (0–1°), почвы дерново-подзолистые, серые лесные глееватые суглинистые</p> <p>Слабополгие (1–3°) склоны долин рек, гряд и увалов плато, почвы дерново-подзолистые глеевые</p> <p>Полгие склоны (3–5°) долин рек, горных террас плато, почвы дерново-подзолистые</p> <p>Склоны средней крутизны и крутые склоны (>5°), почвы горные дерново-подзолистые</p>	<p>6. Темнохвойно-сосновые травяно-зеленомошные</p> <p>10. Елово-пихтовые мелкотравно-зеленомошные</p> <p>3. Сосняки бруснично-разнотравные</p> <p>11. Елово-пихтовые травяно-зеленомошные</p> <p>3. Сосняки бруснично-разнотравные</p> <p>11. Елово-пихтовые травяно-зеленомошные</p> <p>12. Елово-кедрово-пихтовые травяно-зеленомошные</p> <p>4. Сосняки разнотравно-зеленомошные</p> <p>12. Елово-кедрово-пихтовые травяно-зеленомошные</p>	

и подтипов почв [Горбачев, 1967; Горбачев, Попова, 1992] как геоморфологические комплексы лесорастительных условий (ГМК ЛУ) (рис. 1). Их краткая характеристика приводится в табл. 1.

Более детальные единицы лесорастительных условий были выделены в пределах каждого ГМК ЛУ по заданным интервалам углов наклона поверхности и идентифицированы как типы лесорастительных условий (ТЛУ): плоские поверхности (0–1°), слабополгие (1–3°), полгие (3–5°), средней крутизны (5–8°) и крутые (>8°) склоны [Геоморфологическое картографирование..., 1977] (рис. 2). Пример описания параметров полученных классов для двух уровней классификации (ГМК ЛУ и ТЛУ) представлен в табл. 2.

Таким образом, сформированы карты потенциальных лесорастительных условий в виде слоев разных уровней детализации, которые отражают пространственное распределение участков, сходных по топографическому положению и почвенно-гидрологическим условиям, определяющим особенности растительного покрова данной территории. Полученная карта потенциальных лесорастительных условий является основой для систематизации разнообразия

лесных сообществ на принципах генетической классификации.

3. Автоматизированное дешифрирование космических снимков.

Для классификации растительного покрова подобрано восемь разносезонных (летние: июнь – июль; осенние: сентябрь – октябрь) безоблачных спутниковых сцен серии Landsat-5 TM за 1989–1990 гг. Годы съемки совпадали с годами проведения лесоустроительных и полевых работ. В работе использовались шестиканальные изображения с пространственным разрешением 30 м, тепловой канал с пространственным разрешением 60 м не использовался для идентификации характеристик растительности. Проведено автоматизированное дешифрирование 12-канального космического снимка (совмещено по шесть каналов летнего и осеннего снимков) для выделения элементарных классов расчленения растительного покрова по спектральным характеристикам.

По результатам анализа наземных данных определено возможное количество классов, созданы обучающие выборки, проведена управляемая классификация снимков с использованием метода максимального правдоподобия.

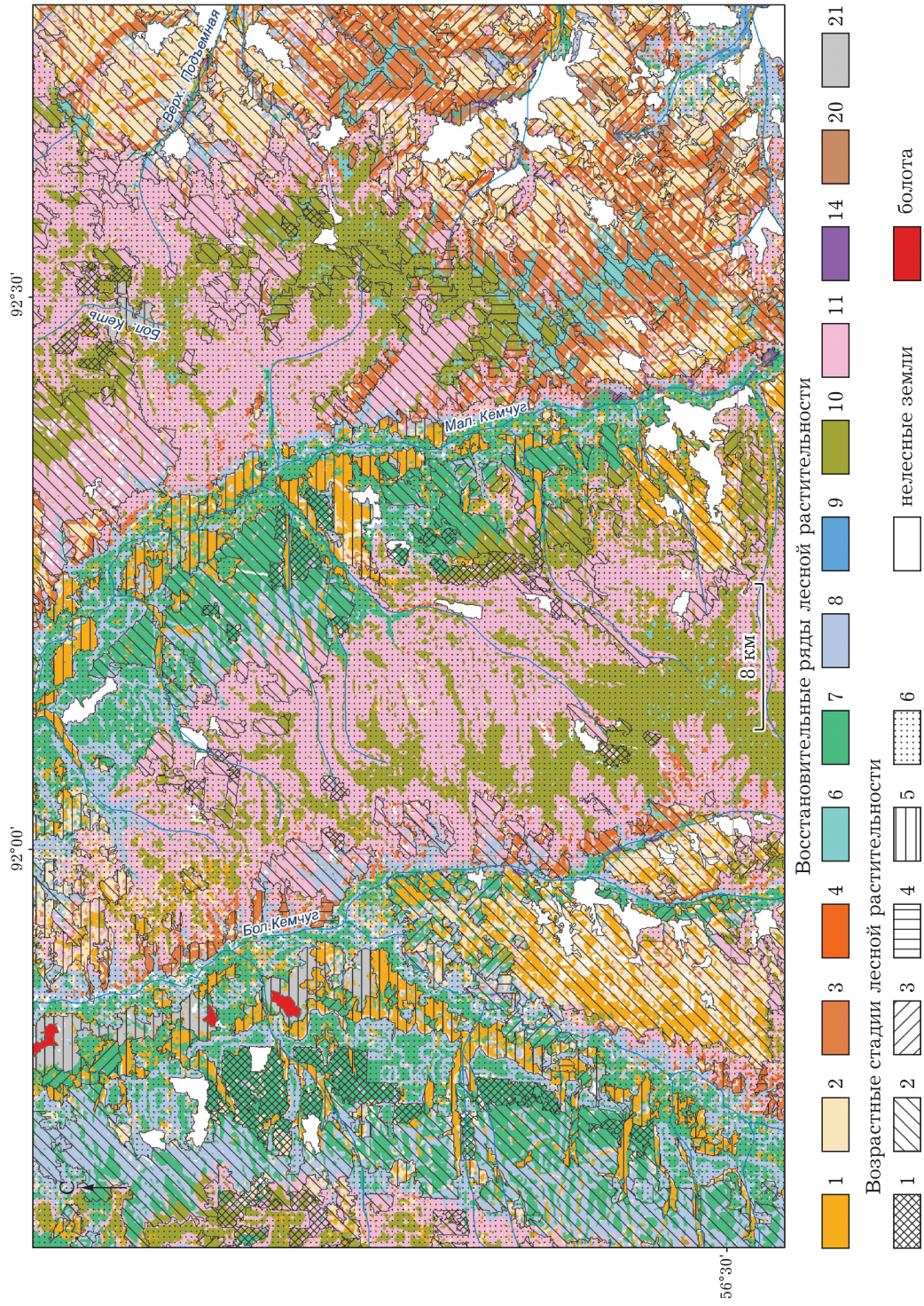


Рис. 4. Фрагмент двухслойной карты восстановительной динамики лесов тестовой территории. Описание рядов см. в табл. 2. и на рис. 3. Возрастные стадии см. в табл. 2 (производная растительность)

В результате по спектральным характеристикам получено 50 элементарных классов расчленения земной поверхности: из них лесные территории – 19, три класса болот, остальные 28 – нелесные (различные сельскохозяйугодья, луга, пашни и т. д.). Качество классификации оценивалось по значениям коэффициентов Каппа, общий коэффициент Каппа по всем лесным классам составил 0,74 [Данилова и др., 2013].

На основе разработанной на первом этапе предварительной сопряженной классификации лесорастительных условий и лесной растительности проведена интерпретация полученных классов по принадлежности к определенному генетическому типу леса.

4. Формирование карты актуального растительного покрова.

Для автоматизированного формирования карты выполнен сопряженный анализ растровых слоев, характеризующих лесорастительные условия разных уровней детализации и классов лесной растительности, полученных при классификации спутниковых изображений. Для этого в созданную ранее предикатную систему правил добавлены правила для формирования карты актуальной растительности. Решающие правила для формирования пунктов легенды карты задавались на основе предварительно разработанной экспертом-геоботаником сопряженной классификации растительности и лесорастительных условий.

Классы лесной растительности, полученные по спектральным характеристикам, идентифицированы как восстановительно-возрастные стадии: начальные стадии восстановления; лиственные насаждения (до 40 лет); лиственные насаждения (40–80 лет); смешанные хвойно-лиственные насаждения (40–80 лет); приспевающие и спелые хвойные насаждения (80–120 лет); спелые и перестойные хвойные насаждения (более 120 лет). В переделах каждого типа лесорастительных условий сформированы восстановительные ряды растительности, состоящие из стадий восстановления, в соответствии с разработанной классификацией и создана карта восстановительной динамики лесной растительности, включающая растровые слои восстановительных рядов (рис. 3) и возрастных ста-

дий. Пример совмещенного показа двух слоев представлен на рис. 4.

Таким образом, для территории южной части приенисейской Сибири получены цифровые карты, отражающие пространственное разнообразие растительного покрова с учетом его сукцессионной динамики в разных лесорастительных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе комплексного подхода к анализу разнородных данных и распространенного программного обеспечения (ArcGIS, ERDAS) разработана методика классификации и геоинформационного моделирования лесорастительных условий и восстановительной динамики лесов. На примере территории южной части приенисейской Сибири на основе сопряженного анализа данных космической мультиспектральной съемки, ЦМР и наземных исследований получены карты, отражающие потенциальные лесорастительные условия исследуемой территории, типологическое разнообразие лесной растительности и возрастные стадии ее восстановления в разных лесорастительных условиях.

Описанный подход позволяет выделять территориальные единицы расчленения земной поверхности, в частности лесного покрова, однородные по ряду заданных показателей (климатических, орографических, эдафических, биотических), сводя к минимуму субъективный фактор. Такое послойное (поэлементное) представление большого количества информации имеет принципиальное значение, так как границы разных компонентов природных систем, как правило, не совпадают и очень условно характеризуются, например, ландшафтными границами. Использование ГИС-технологий позволяет проводить объективное сопоставление слоев разных факторов и таким образом более адекватно выявлять эколого-географические закономерности формирования растительного покрова.

Сочетание автоматизированных методов выделения границ с экспертными оценками при идентификации выделенных классов позволяет выявлять характеристики расти-

тельного покрова, которые непосредственно не отображаются на космических снимках, но являются объектами тематического картографирования (типы лесорастительных условий, типы леса, восстановительно-возрастные стадии). Предложенный подход позволяет оперативно актуализировать сформированные карты в случае изменений исходных данных или алгоритма их обработки.

Работа выполняется при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований, грант №15-04-04013.

ЛИТЕРАТУРА

- Барталев С. А., Егоров В. А., Ершов Д. В. и др. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4. С. 285–302.
- Брицына М. П. Рельеф и почвообразующие породы центральной части Красноярского края // Природное районирование центральной части Красноярского края и некоторые вопросы пригородного хозяйства. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 27–46.
- Брицына М. П., Галахов Н. Н., Любимова Е. Л., Лиханов Б. Н. Схема природного районирования Красноярского края // Природное районирование центральной части Красноярского края и некоторые вопросы природного хозяйства. М.: Изд-во АН СССР, 1962а. С. 5–26.
- Геоморфологическое картографирование. М.: Высш. шк., 1977. 375 с.
- Горбачев В. Н. Почвы Нижнего Приангарья и Енисейского края. М.: Наука, 1967. 140 с.
- Горбачев В. Н., Попова Э. П. Почвенный покров южной тайги Средней Сибири. Новосибирск: Наука, 1992. 223 с.
- 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.
- ДеМерс М. Н. Географические Информационные Системы. Основы. М.: Дата+, 1999. 490 с.
- Жарко В. О., Барталев С. А. Оценка распознаваемости древесных пород леса на основе спутниковых данных о сезонных изменениях их спектрально-отражательных характеристик // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 3. С. 159–170.
- Ермаков Н. Б., Полякова М. А., Попов Д. Ю., Голомовин В. В. Моделирование пространственной организации растительности горных территорий на основе данных дистанционного зондирования и цифровой модели рельефа // Вычислит. технологии. 2007. Т. 12, № 2. С. 42–59.
- Колесников Б. П. Кедровые леса Дальнего Востока. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1956. 262 с.
- Коновалова Т. И., Бессолицына Е. П., Владимиров И. Н. и др. Ландшафтно-интерпретационное картографирование. Новосибирск: Наука, 2005. 424 с.
- Корец М. А., Данилова И. В., Черкашин В. П. Дистанционная индикация структуры лесных территорий // Региональные проблемы экосистемного лесоводства. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2007. С. 52–68.
- Ландшафты юга Восточной Сибири. М-б 1 : 1 500 000 / отв. ред. В. Б. Сочава. М., 1977.
- Ландшафтная карта СССР. М-б: 1 : 2 500 000 / отв. ред. И. С. Гудилин. М., 1987.
- Лапшина Е. И., Горбачев В. Н., Храмов А. А. Растительность и почвы Енисейского края // Растительность правобережья Енисея. Новосибирск: Наука, 1971. С. 21–66.
- Онучин А. А. Пространственно-временная модель распределения температур воздуха // Лесные экосистемы Енисейского меридиана. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. С. 45–47.
- Онучин А. А., Данилова И. В. Орографические эффекты распределения атмосферных осадков на юге Приенисейской Сибири // Геогр. и прир. ресурсы. 2012. № 3. С. 85–92.
- Рыжкова В. А. Восстановительная динамика южнотаежных лесов. // Лесные экосистемы Енисейского меридиана. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. С. 146–157.
- Рыжкова В. А. Закономерности восстановительной динамики подтаежных и горнотаежных лесов // Региональные проблемы экосистемного лесоводства. Красноярск: Изд-во Ин-та леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2007. С. 78–90.
- Средняя Сибирь. М.: Наука, 1964. 480 с.
- Черненко Т. В., Пузаченко М. Ю., Басова Е. В., Королева Н. Е. Ценоотическое разнообразие и картографирование растительного покрова центральной части Мурманской области // Геоботаническое картографирование. СПб., 2015. С. 78–94.
- ERDAS Field Guide. Fifth edition. Atlanta, Georgia: USA: ERDAS Inc., 1999. 672 p.
- Danilova I., Ryzhkova V., Korets M. Recognizing vegetation regeneration stages in Landsat imagery // BOSQUE. 2012. Vol. 33, N 3. P. 359–362.
- Richards J., Xiuping J. Remote sensing digital image analysis: an introduction. Birkhäuser. Basel, Switzerland, 2005.
- Ryzhkova V., Danilova I. GIS-based classification and mapping of forest site condition and vegetation // BOSQUE. 2012. Vol. 33, N 3. P. 293–297.
- Ryzhkova V., Danilova I., Korets M. GIS-based Forest Cover Classification and Mapping (Principles and Technique) // Int. Sci. Publ. Ecol. & Safety. 2015. Vol. 9.

Forest Cover Classification and Geoinformation Modelling of Forest Regeneration Dynamics (Based on the Example of Southern Circum Part of Near-Yenisei Siberia)

V. A. RYZHKOVA, I. V. DANILOVA, M. A. KORETS

*V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok 50/28
E-mail: vera@ksc.krasn.ru*

The GIS-based approach for classification and mapping of forest vegetation and forest growing conditions was developed. The combined analysis of Landsat satellite imagery and digital elevation model were applied to produce the digital maps of potential forest growing conditions and forest regeneration dynamics of southern Circum-Yenisei Siberia. This automated approach allows creating and quickly updating the forest cover maps that is very urgent for the large Siberian forest areas.

Key words: forest cover, potential forest growing conditions, digital elevation model (DEM), Geographical Information System (GIS), remote sensing data, forest regeneration dynamics map.