КЛАССИФИКАЦИЯ И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕСНОГО ПОКРОВА НА ОСНОВЕ ГИС (ПРИНЦИПЫ И МЕТОДИКА)

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

**Федеральное государственное учреждение науки Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН
Красноярск, Россия, vera@ksc.krasn.ru, tiv80@ksc.krasn.ru, mik@ksc.krasn.ru*

FOREST COVER CLASSIFICATION AND SPATIAL MODELLING BASED ON GIS (PRINCIPLES AND TECHNIQUE)

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

*V.N. Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch, Russian Academy of Science
Krasnoyarsk, Russia, vera@ksc.krasn.ru, tiv80@ksc.krasn.ru, mik@ksc.krasn.ru*

Abstract. A technique of conjugate analysis of dissimilar data in a stepwise manner for spatial modeling of potential forest growing conditions and forest regeneration dynamics was developed using standard software (ArcGIS, ERDAS). This algorithm involves spatial analysis of multi-band satellite data, a digital elevation model, and ground measurements. Based on this algorithm, maps reflecting the diversity of forest growing conditions and forest regeneration series and stages were developed to south central Siberia.

Keywords: Central Siberia, forest cover, potential forest growing conditions, digital elevation model (DEM), Geographical Information System (GIS), remote sensing data, forest regeneration dynamics map

Введение. 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. Но 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 традиционному подходу, когда карта рассматривалась как конечный продукт, «сообщая» информацию о пространственном распределении объектов (парадигма сообщения), а исходная, не классифицированная информация, была недоступна, все более широкое распространение получает альтернативный подход, основанный на том, что карта должна не только сообщать информацию, но и позволять ее анализировать (аналитическая парадигма) [4]. 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.

Постановка проблемы. В настоящее время в связи с возрастающим антропогенным влиянием растительный покров стремительно изменяется. Карты, составленные традиционными методами 50–60 лет назад, существенно устарели. В настоящее время для территории Сибири нет карт актуальной растительности, разработанных на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с пространственным разрешением выше среднего (250 м/пикс, MODIS). Картографирование является важным аспектом изучения растительного покрова, эффективным методом его пространственной инвентаризации, оценки динамики и биоразнообразия.

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. Карты растительного покрова разной степени детальности фактически являются пространственными моделями, отражающими разнообразие лесорастительных условий и растительности, и могут быть использованы как основа для пространственного представления и моделирования различных параметров экосистем.

Целью работы является разработка автоматизированных подходов к систематизации и картографированию растительного покрова на основе ГИС, данных ДЗЗ и материалов наземных исследований.

Для достижения поставленной цели в ходе исследований поэтапно решались следующие задачи:

- инвентаризация и классификация разнообразия лесного покрова с учетом закономерностей его естественной и антропогенной динамики;
- автоматизированная систематизация и картографирование лесорастительных условий;

- автоматизированное дешифрирование космических мультиспектральных изображений;
- формирование карт актуального состояния лесного покрова с учетом его сукцессионной динамики.

Район работ. Исследования проводились в южной части приенисейской Сибири (56°–58° с. ш., 92°–96° в. д.). Тестовая 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. Западно-Сибирская равнина представлена на левом берегу Енисея, южная часть Енисейский кряж в правобережной части представляет собой западную окраину Средне-Сибирского плоскогорья [14]. 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 [12]. Под основными 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 [1, 2].

В правобережной части в пределах южной части Енисейского кряжа выделяются два высотно-климатических комплекса типов леса – подтаежный и горно-таежный, восточнее расположена лесостепная зона, окруженная подтаежными лесами. Господствующие на Енисейском кряже леса относятся к формации елово-кедрово-пихтовых лесов [9]. 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 насчитывается 6–7 пород, и существует множество вариантов их соотношений в разных лесорастительных условиях.

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 [9]. В данной 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 [5]. 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 объединяются общностью происхождения, то есть 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 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 [5].

Неоспоримым преимуществом данного подхода к классификации растительного покрова является его комплексность, классификация производится не только по признакам растительности, а 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 [17]. 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 управляемой классификации (ISODATA) [16]. Данный метод требует задания начальных условий разбиения, поэтому для определения количества классов для управляемой классификации проводится анализ орографического строения территории с использованием метода построения топографических профилей на основе растрового слоя абсолютных высот SRTM-3-DEM, 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 ландшаф-

тов [8]. 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 [17]. В процессе предварительной обработки проводится геопроецирование 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 соавторами [6]. Верификация тематических карт и качество классификации оценивается с использованием коэффициентов Каппа.

Для автоматизации процесса формирования карт лесорастительных условий и динамики лесной растительности использовался метод экспертной классификации, реализованный в модуле Knowledge Engineer/ERDAS IMAGINE [15].

Результаты исследований и их обсуждение. На примере тестовой территории разработана и апробирована методика сопряженного анализа разнородных данных в ГИС, в результате реализации которой поэтапно решаются задачи классификации лесной растительности и лесорастительных условий, автоматизированного дешифрирования данных дистанционного зондирования и картографирования восстановительной динамики лесного покрова.

Основные этапы работы:

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

Для разработки предварительной классификации был проведен анализ исследуемой территории с использованием информации, содержащейся в Банке данных ГИС (тематических карт, литературных данных, материалов наземных исследований). С использованием ЦМР построены обобщенные топографические профили, отражающие орографические особенности территории. Выявлены закономерности распределения растительности по основным элементам рельефа, приуроченность природных комплексов 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 [13], основанная на принципах географо-генетического подхода Б.П. Колесникова.

- 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. На основе профилей и ландшафтных карт [7,8] для тестовой территории проанализировано разнообразие геоморфологических условий и выделены участки, относительно однородные по характеру рельефа (по соотношению форм мезорельефа, интервалам абсолютных высот и степени расчлененности поверхности), соответствующие видам ландшафтов или их сочетаний. Определено предварительное количество классов для неуправляемой классификации ЦМР.

Для выделения пространственных границ этих классов проведена неуправляемая классификация ЦМР-композиции (абсолютная высота и уклон поверхности), стандартным методом ISODATA, в результате выделено 7 классов расчленения земной поверхности, относительно однородных по морфометрическим параметрам рельефа.

Учет климатических факторов включал анализ карт пространственного распределения среднемесячных значений июльских температур воздуха и годовой величины атмосферных осадков, структура и принципы, построения которых описаны в ранее опубликованных работах [10; 11].

С использованием метода ISODATA выполнена неуправляемая классификация двухслойного изображения (среднемесячных 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 [3].

Для автоматизации процесса классификации лесорастительных условий разработана предикатная система правил в модуле Knowledge Engineer/ERDAS IMAGINE [15]. Входными переменными дерева решений являлись классы расчленения земной поверхности по морфометрическим и климатическим показателям. В результате выделено 9 новых классов, которые были интерпретированы с учетом геоморфологии, климата и зональных типов и подтипов почв как геоморфологические комплексы лесорастительных условий (ГМК ЛУ) (рис. 1).

Таблица 1

*Лесорастительные условия и сопряженные с ними типы леса
(восстановительные ряды лесной растительности)*

Лесорастительные условия		Растительность
Описание геоморфологических комплексов лесорастительных условий	Преобладающие типы лесорастительных условий (по интервалам уклонов поверхности)	Преобладающий генетический тип леса (Колесников, 1956)
II. Интервал абсолютных высот 224–288 м, интервал уклонов, град. 1,3±0,8	Высокие полого-увалистые или волнистые, денудационные и денудационно-эрозионные 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 2-м гумусовым горизонтом, в сочетании с серыми глеевыми, дерново-луговыми и дерново-подзолистыми.	Плоские плакорные поверхности (уклон 0–1°), почвы дерновые лесные темноцветные, темно-серые лесные и дерново-подзолистые со вторым гумусовым горизонтом.
	Слабопологие склоны (уклон 1–3°), почвы дерново-подзолистые и серые лесные.	7. Елово-пихтовый крупнотравно-травяной
III. Интервал абсолютных высот 118–262 м, интервал уклонов, град. 2,3±2,2	Высокие полого-увалистые или волнистые, увалистые и грядовые (приречные), денудационные, денудационно-эрозионные 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.	Плоские или слегка выпуклые водораздельные поверхности (уклон 0–1°), почвы дерновые лесные темноцветные и темно-серые лесные.
	Слабопологие склоны (уклон 1–3°), почвы дерново-подзолистые, дерновые лесные кислые и серые лесные.	1. Сосняки разнотравно-крупнотравные
	Пологие склоны (уклон 3–5°), почвы дерново-подзолистые и светло-серые лесные.	2. Сосняки разнотравные
	Склоны средней крутизны (уклон 5–8°), почвы дерново-подзолистые и светло-серые лесные.	3. Сосняки бруснично-разнотравные
IV. Интервал абсолютных высот 275–363 м Интервал уклонов, град. 1,8±1,3	Низкие плато холмисто-грядовые, волнистые, полого-склоновые, слаборасчлененные, сложенные элювио-делювиальными и аллювиально-делювиальными бурыми и коричнево-бурыми очень плотными глинами. Почвы дерново-подзолистые и серые лесные.	Плоские и слабовыпуклые водоразделы (уклон 0–1°), почвы дерново-средне- и сильно-подзолистые.
	Слабопологие склоны (уклон 1–3°), почвы дерново-подзолистые.	10. Елово-пихтовый мелкотравно-зеленомошный
	Пологие склоны (уклон 3–5°), почвы дерново-подзолистые.	11. Елово-пихтовый травяно-зеленомошный
		12. Елово-кедрово-пихтовый травяно-зеленомошный

На основе разработанной на первом этапе предварительной классификации была проведена интерпретация полученных классов лесной растительности по приуроченности к определенному генетическому типу леса.

- 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 были 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, были 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 результате реализации методики сопряженного анализа разнородной информации была создана карта восстановительной динамики лесной растительности, состоящая из растровых слоев восстановительных рядов (рис. 2) и возрастных стадий. Таким образом, для территории южной части приенисейской Сибири были получены цифровые карты, отражающие пространственное разнообразие растительного покрова с учетом его сукцессионной динамики в разных лесорастительных условиях.

Рис. 2. Растровый слой карты восстановительной динамики лесной растительности территории южной части приенисейской Сибири (уровень восстановительных рядов лесной растительности).
Описание рядов см. в табл. 1.

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

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, типы леса, восстановительно-возрастные стадии). Преимущество предложенного подхода заключается в возможности гибкого оперативного перестроения и актуализации сформированных карт в случае изменений исходных данных или алгоритма их обработки.

Описанный подход позволяет выделять территориальные единицы расчленения земной поверхности, и 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 характеризуется, 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.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК REFERENCES

1. Горбачев В.Н. Почвы Нижнего Приангарья и Енисейского края. Москва: Наука, – 1967. – 140 С.
Gorbachev V.N. Pochvy Nizhnego Priangariya i Yeniseyskogokryazha. [Soils of Lower Angara Region and Yenisei Mountain Chain], Nauka, Moscow. – 1967. – 140 p. (in Russian).
2. Горбачев В.Н., Попова Э.П. Почвенный покров южной тайги Средней Сибири. Новосибирск: Наука. – 1992. – 223 С.
Gorbachev V.N., Popova E.P. Pochvenniy pokrov juzhnoy taygi Sredney Sibiri. [Soil Cover in Southern Taiga of Central Siberia], Nauka, Novosibirsk. – 1992. – 223 p. (in Russian).
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.
Danilova I. V., Ryzhkova V.A., Onuchin A.A. Ispol'zovanie sputnikovyyh dannyh, cyfrovoy modeli rel'efa i nazemnoy informacii dlya kartografirovaniya vosstanovitel'noy dinamiki lesov. [Using of satellite imagery, digital elevation model (DEM) and field data for mapping of forest regeneration dynamics], Geodesy and Cartography, – 2013, – № 9, – pp. 25–32 (in Russian).
4. ДеМерс, Майкл Н. Географические Информационные Системы. Основы. Пер. с англ. М.: Дата+, – 1999. – 490 С.
DeMers Michael N. Geograficheskie Informacionnye sistemy. Osnovy. [Fundamentals of Geographic Information Systems], Translation from English. Data+. – Moscow, – 1999. – 490 p. (in Russian).
5. Колесников Б.П. Кедровые леса Дальнего Востока. М.-Л: Изд-во АН СССР. – 1956, – 262 С.
Kolesnikov, B.P. Kedrovye lesa Dal'nego Vostoka. [Siberian pine forests of the Russian Far East], Nauka, Moscow-Leningrad. – 1956. – 261 p. (in Russian).
6. Корец М. А., Данилова И. В., Черкашин В. П. Дистанционная индикация структуры лесных территорий // Региональные проблемы экосистемного лесоводства. Красноярск: Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2007. С. 52–68.
Korets M.A., Danilova I.V., Cherkashin V.P. Distancionnaya indikaciya struktury lesnyh territoriy. [Remote indication of forest landscape structure], In: Regional Sustainable Forestry Problems. Sukachev Institute of Forest, Krasnoyarsk, 2007, pp 52–68 (in Russian).
7. Ландшафты юга Восточной Сибири. Масштаб 1:1 500 000. Отв. ред. В.Б. Сочава. – Москва. – 1977.
Landshafty juga Vostochnoy Sibiri. [Landscapes of Southeastern Siberia (1:1 500 000 map)], Sochava V.B. ed. – Moscow. – 1977 (in Russian).
8. Ландшафтная карта СССР. Масштаб: 1:2 500 000. Отв. ред. И.С. Гудилин. – Москва. – 1987.
Landshaftnaya karta SSSR. [The USSR Landscape Map (1:2,500,000)]. Gudilin I.S. ed., – Moscow. – 1987 (in Russian).
9. Лапшина Е.И., Горбачев В.Н., Храмов А.А. Растительность и почвы Енисейского края. // Растительность правобережья Енисея. Новосибирск: Наука, – 1971. – С. 21–66.
Lapshina, E.I.; Gorbachev, V.N.; Khramov, A.A. Rastitel'noy i pochvy Yeniseyskogokryajza. [Vegetation and soils of Yenisei Mountain Chain], In: Vegetation on the right bank of Yenisei River. Nauka. – Novosibirsk, – 1971. – pp. 21–66 (in Russian).
10. Онучин А. А. Пространственно-временная модель распределения температур воздуха // Лесные экосистемы Енисейского меридиана. Новосибирск: Изд-во СО РАН, – 2002. – С. 45–47.
Onuchin A.A. Prostranstvenno-vremennaya model' raspredeleniya temperature vozduha. [Spatial-temporal model of distribution of air temperature characteristics], In: Forest ecosystems of the Yenisei meridian. The Siberian Academy Branch Publisher, Novosibirsk. – 2002. – pp. 45–47 (in Russian).
11. Онучин А.А., Данилова И.В. Орографические эффекты распределения атмосферных осадков на юге Приенисейской Сибири // География и природные ресурсы. – №3. – 2012. – С. 85–92.
Onuchin A.A., Danilova I.V. Orograficheskie efekty raspredeleniya atmosferyh osadkov na jube priyeni-seyskoy Sibiri. [Orographic effects of precipitation distribution in the south of near-Yenisei Siberia], Geography and natural resources. – 2012, – №3, pp. 85–92 (in Russian).
12. Рыжкова В.А., Восстановительная динамика южнотаежных лесов. // Лесные экосистемы Енисейского меридиана. Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2002. – С. 146–157.
Ryzhkova V.A. Vosstanovitel'naya dinamika juzhnotajezhnyh lesov. [Southern taiga forest regeneration dynamics], In: Forest Ecosystems of the Yenisei Meridian, Novosibirsk. – 2002, – pp. 146–157 (in Russian).

13. Рыжкова В. А. Закономерности восстановительной динамики подтаежных и горнотаетежных лесов // Региональные проблемы экосистемного лесоводства. Красноярск: Изд-во Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, – 2007. – С. 78–90.
- Ryzhkova V. A. Zakonomernosti vosstanovitel'noy dinamiki pod tajezhnyh i gornotaejzhnyh lesov. [Regeneration of subtaiga and mountain taiga forests]. In: Regional Sustainable Forestry Problems. Sukachev Institute of Forest Publications, Krasnoyarsk. – 2007, – pp. 78–90 (in Russian).
14. Средняя Сибирь. М: Наука, – 1964. – 480 С.
- Srednyaya Sibir'. [Central Siberia], Nauka, Moscow. – 1964. – 480 p. (in Russian).
15. *ERDAS Field Guide*. Fifth edition. Atlanta, Georgia: USA: ERDAS Inc., – 1999, – 672 pp.
16. Richards J., Xiuping J. Remote sensing digital image analysis: an introduction. Birkhäuser, Basel, – 2005. – Switzerland.
17. Ryzhkova V., Danilova I. GIS-based classification and mapping of forest site condition and vegetation // BOSQUE, – 2012, – 33(3), – pp. 293–297.
18. Danilova I., Ryzhkova V., Korets M. Recognizing vegetation regeneration stages in Landsat imagery. BOSQUE, – 2012, – 33(3), – pp. 359–362,
19. *SRTM-3-DEM* (Shuttle Radar Topography Mission, Digital Elevation Model). – 2010. – Available from <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/russia.htm>