

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

УДК 528.8.04:502.62/581.526.426.2

ОЦЕНКА СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ЛЕСНОГО ПОКРОВА
МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ ПО НАЗЕМНЫМ
И ДИСТАНЦИОННЫМ ДАННЫМ

© 2019 г. Т. В. Черненкова^{1, 2 *}, М. Ю. Пузаченко^{1, 2}, Н. Г. Беляева^{1, 2},
О. В. Морозова^{1, 2}

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова, Москва, Россия

*e-mail: chernenkova50@mail.ru

Поступила в редакцию 15.07.2018 г.; после доработки 03.02.2019 г.; принята в печать 04.04.2019 г.

Описана последовательность и содержание этапов оценки структуры и состава лесов с использованием космических снимков Landsat. Показано, что применение методов количественной обработки для интерполяции точечных данных полевых исследований, в частности, пошагового дискриминантного анализа, позволяет получить характеристики растительного покрова и исследовать факторы формирования его биоразнообразия. Представленные методы и результаты оценки параметров состояния лесов, их структуры и типологического состава могут быть интегрированы в международную сеть Национальной инвентаризации лесов – *National Forest Inventories*. Несмотря на различие методов, имеется принципиальная возможность гармонизации полученных данных с данными международной Глобальной системы наблюдений Земли – *Global Earth Observation System of Systems*. Для тестовой территории на Русской равнине (запад Московской области) представлены результаты совместного анализа данных наземных исследований, дистанционной информации и цифровой модели рельефа. Получена серия карт среднего масштаба, характеризующих пространственную структуру и состав лесного покрова исследуемого региона.

Ключевые слова: лесной покров, Московская область, ДДЗ, ЦМР, дискриминантный анализ, наземные исследования, классификация, ценотическое разнообразие, картографирование.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587-556620194112-124>

Применение данных дистанционного зондирования (ДДЗ) при оценке свойств наземного покрова является повсеместной практикой в разных отраслях знаний. Эффективность использования ДДЗ и интерпретации полученных результатов определяется доступностью и полнотой источников информации, а также методами анализа имеющихся данных. В лесном хозяйстве России основными источниками информации являются отраслевые материалы лесоустройства, включающие карты-схемы и планы лесонасаждений, лесоустроительные планшеты и таксационные базы данных с биометрическими параметрами насаждений выделов, топографические карты [7]. В силу отраслевой специфики использование этих источников ограничивает определение по спутниковым данным состава сложных многоярусных насаждений, в том числе растительности подчиненных ярусов.

Привлечение наземной информации является необходимым условием, как при уточнении лесоустроительных данных, так и при выявлении особенностей организации растительного

покрова с оценкой параметров разнообразия лесов, характеристики которых выходят за рамки традиционных таксационных показателей. Необходимость получения более разнообразной и детальной информации при инвентаризации лесов востребована не только в экологических, но и в социальных и экономических сферах [15]. Во многих зарубежных странах система Национальной инвентаризации лесов – *National Forest Inventories* (NFIs) основана на дистанционной информации, совмещенной с наземными данными от постоянной регулярной сети пробных площадей. NFIs является источником информации для Глобальной системы систем наблюдений Земли – *Global Earth Observation System of Systems* (GEOSS), одна из задач которой – обеспечение на международном уровне механизма координации научно-исследовательских работ с целью повышения эффективности использования ДДЗ при изучении глобальных изменений состояния растительного покрова. Разработаны рекомендации по участию России в GEOSS [12], и представлена Концепция уча-

ствия Российской Федерации в Глобальной системе наблюдения Земли [5].

Целью работы является характеристика показателей разнообразия лесов с использованием материалов космических снимков, цифровой модели рельефа и данных полевых измерений, а также демонстрация возможности интеграции использованных методов и результатов в международную сеть NFIs и GEOSS в составе российского сегмента Глобальной системы наблюдения Земли.

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

Одним из самых распространенных алгоритмов при интерполяции характеристик растительного покрова является классификатор с обучением, основанный на решающем правиле *максимального правдоподобия* [1]. Он дает результаты, имеющие минимальную вероятность ошибки для всего набора классифицируемых данных [3]. Недостатками метода являются сложность реализации, возможное многообразие решений, недостаточная изученность свойств оценок (например, величины смещения) при малых объемах выборки.

Существуют другие стандартные способы контролируемой классификации, из которых часто применяется классификатор, использующий метод минимальных расстояний или *k ближайших соседей* (*k-Nearest Neighbors*, kNN). Данный метод успешно применяется в Национальной инвентаризации лесов (NFIs) в скандинавских странах с 1989 г. [18], а результаты используются в общеевропейском проекте COST (*European Cooperation in Science and Technology*) в разделе гармонизации национальной инвентаризации лесов (*Action E43*) (рис. 1а). Исходную информацию по оценке параметров лесов получают на основе GPS позиционированной системы постоянных пробных площадей. В Швеции размер пробных площадей имеет радиус 10 м, что сопоставимо с размером пикселей системы Landsat TM или многоспектральных изображений системы SPOT. В Финляндии применяются участки переменного радиуса. Основными параметрами, оцениваемыми на обследуемых участках, являются запасы стволовой древесины, высоты деревьев и возраст. Применяемый метод минимальных расстояний требует большого числа пробных площадок. В Швеции, например, их использовано около 1250 на сцену Landsat TM, в Финляндии их число варьирует от 3000 до 10000 [16]. Очевидно, что в условиях России основными ограничениями в применении метода kNN является невозможность заложения боль-

шого числа пробных площадей, в том числе на регулярной основе во времени и пространстве. К недостаткам метода можно отнести зависимость результата от выбора метрики и числа “соседей” [8], а также экспоненциальный рост необходимых данных по отношению к числу признаков, так называемое проклятие размерности (*Curse of dimensionality*).

Альтернативными методами классификации с обучением являются методы дискриминантного, факторного, нейросетевого и генетического анализов. Однако применение более сложных алгоритмов (нейронных сетей, декомпозиции спектральных смесей и др.) связано с большой сложностью компьютерной обработки (необходимость специального пакета, трудоемкостью и др.), что ограничивает их применение как стандартных методик.

При наличии данных полевых исследований используется *метод интерполяции* точечных полевых данных на территории ландшафтного и регионального уровня. Основой для этого являются количественные методы анализа с возможностью совмещения данных в ГИС среде [4, 9, 10]. Применение пошагового канонического дискриминантного анализа [13], помимо интерполяции дискретных значений исследуемого показателя как на основе ДДЗ, так и других переменных (рельефа, гидрографии и др.), позволяет оценить пространственную неопределенность дискриминации, а также получить новые переменные (дискриминантные оси), отражающие факторы дифференциации исследуемого параметра. Исходными данными при дискриминантном анализе могут быть как площадные характеристики (контура), так и точечные объекты, т.е. площадки. При этом число площадок для получения достоверного результата существенно меньше, чем при использовании других методов классификации с обучением (рис. 1б).

Сопоставление двух подходов (см. рис. 1а, б) к оценке пространственного разнообразия лесов на основе схемы, используемой нами, и модели, применяемой при инвентаризации лесов Финноскандии [18], выявило существенные различия. Реализуемая в нашей работе схема отличается: а) включением предварительного этапа с автоматической классификацией типов наземного покрова, поскольку мало или недостаточно изучена территория исследований; б) применением выделенных на основе разработанной классификации групп лесных сообществ в качестве обучающей выборки при оценке типологического разнообразия; в) использованием дискриминантного анализа как классификатора пространственно распределенных переменных.

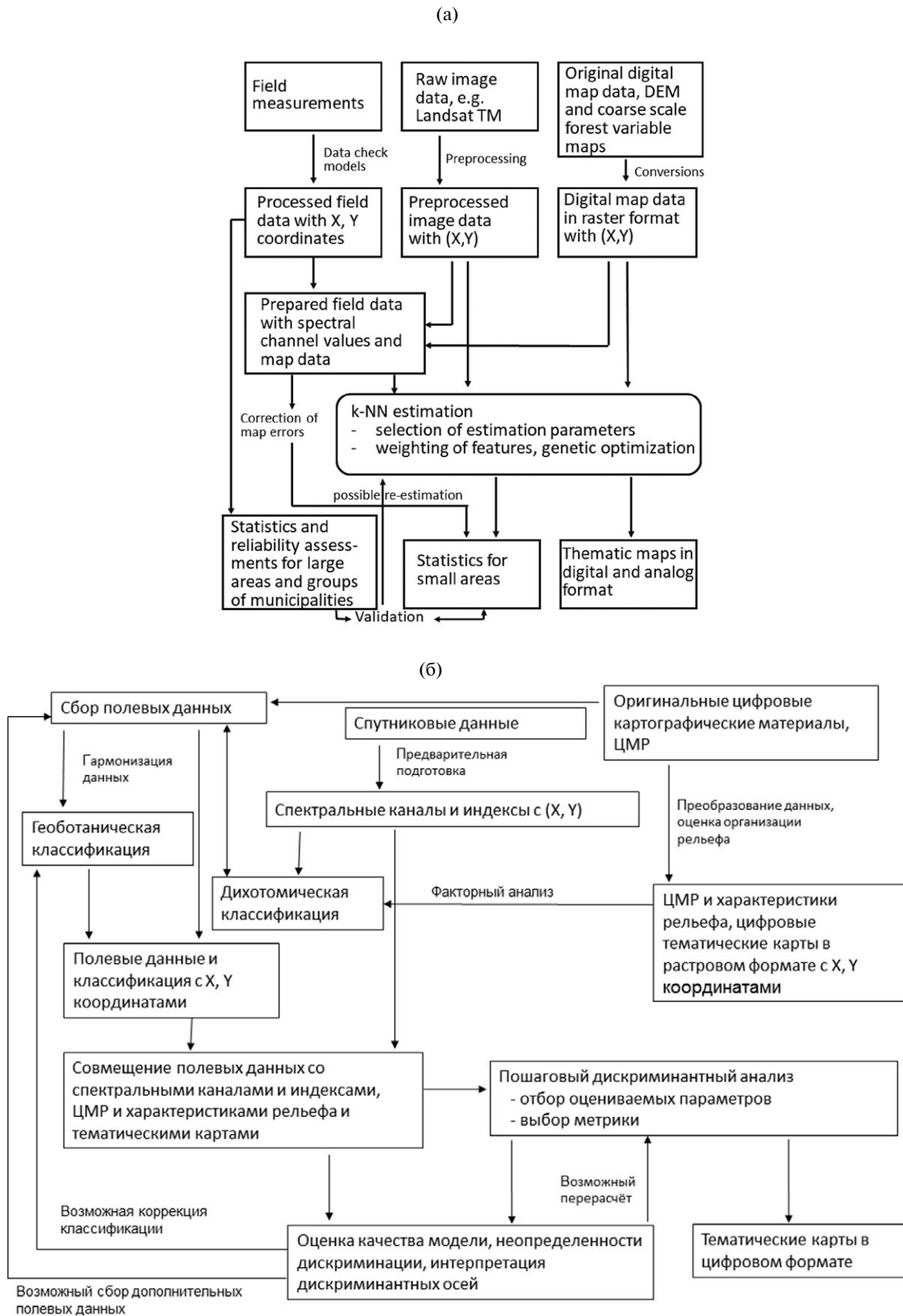


Рис. 1. Сопоставление схем оценки разнообразия лесов:

общая схема национальной инвентаризации лесов (NFI) в Фенноскандии (а); предлагаемая схема оценки разнообразия лесов (б).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Объекты

Для демонстрации оценки пространственной организации лесной растительности выбрана тестовая территория в Центре Русской равнины, занимающая большую часть Московской области за исключением ее восточной части, площадью 40 532 км². Сложная история формирования лесного покрова Московской области и современная ситуация зеленого пояса Москвы оставляют много вопросов к оценке состояния и динамики лесов с возможностью прогнозирования экологического и рекреационного потенциала насаждений естественного и искусственного происхождения. Выбор территории исследования с практической точки зрения обусловлен наличием представительной выборки описаний и отсутствием актуальных картографических материалов для данного региона.

2. Используемые данные

2.1. Предварительный сбор данных

В качестве базовой информации использовался имеющийся набор картографических данных (топографические и тематические карты, в том числе карты лесного учета, ДДЗ). Для уточнения состава лесов использовались спутниковые снимки сверхвысокого разрешения (< 10 м), находящиеся в свободном доступе.

По ДДЗ и цифровой модели рельефа (ЦМР) проводилась предварительная дихотомическая классификация методом К-среднезвешенных по метрике Евклида для 8 уровней классификации (256 классов максимум). На ее основе оценивалось типологическое разнообразие растительности с составлением предварительной классификации на верхнем типологическом уровне в рамках масштаба исследований. Результаты данного этапа определяют предварительно фитоценотическое разнообразие территории и схему полевых исследований (расположение и число пробных площадей).

2.2. Спутниковая информация

В качестве дистанционных данных использовались снимки со спутников серии Landsat (*Landsat 5* и *8*) за последние годы съемки. Так как территория исследований занимает три сцены *Landsat*, выполнено построение мозаик снимков, для чего при отсутствии безоблачных снимков одного залета выбирались снимки соседних залетов или тех же сроков съемки, но за ближайšie годы. Таким образом, мозаики созданы за три срока съемки: конец марта 2014 г. (*Landsat 8*), конец августа 2011 г. (*Landsat 5*) и середина сентября 2014 г. (*Landsat 8*). На ос-

нове каналов ДДЗ для каждого срока съемки рассчитывались индексы, отражающие различные аспекты мультиспектральной информации, представленные в программе ENVI 5.

2.3. Цифровая модель рельефа

Данные о высотах могут быть получены как на основе топокарт соответствующего масштаба, так и на основе спутниковых данных. Для рельефа с помощью спектрального анализа определяются иерархические уровни организации территории. Спектральный анализ, основанный на двухмерном преобразовании Фурье [9], позволяет представить абсолютные высоты рельефа в виде волн, разложить их по отдельным частотам и охарактеризовать степень выраженности каждой частоты через ее амплитуду.

В качестве ЦМР использованы данные SRTM v3 (интернет источник) с исходным разрешением в 1 арк сек (около 30 м). Данные поступали фрагментами, которые были объединены в единый слой. В нашем случае территория перекрывается двенадцатью фрагментами ЦМР. Также для дальнейшего совмещения с ДДЗ выполнено преобразование ЦМР из долготно-широтной проекции в проекцию Меркатора (*UTM37 WGS84*). Расчет и анализ двумерного спектра показал наличие двенадцати статистически выраженных иерархических уровней его организации и тренд.

Совмещение ДДЗ и ЦМР, как и вся предварительная подготовка данных, осуществлялась в программе *Erdas Imagine*. После совмещения проводилось агрегирование исходного пространственного разрешения данных до 60 м, в соответствии с масштабом исследований и результирующих картографических материалов. Далее данные преобразовались в текстовый формат для возможности их использования в статистических программах.

2.4. Полевые данные

Выполнение предварительного этапа сбора данных (пп. 2.1) позволяет оптимизировать наземные исследования, наиболее полно характеризовать ценотическое разнообразие и сократить объем описаний. В комплекс полевых исследований входило:

- инструментальная привязка к местности по GPS/Глонасс;
- описание экотопа, расстояния до ближайшего водотока, характера микрорельефа, гранулометрического состава верхней части профиля почв (песок, супесь, суглинок, глина), мощности подстилки, покрытия почвы опадом, мощности и типа органогенного горизонта;
- выявление природных и антропогенных нарушений (ветровалы, повреждения вредителями,

рубки, пожары, промышленное воздействие и др.);

- полное геоботаническое описание¹ с выявлением видового и структурного разнообразия растительного сообщества на площади 20×20 м с повторностью не менее 8 описаний исследуемого типа сообщества. Расстояние между пробными площадями – не менее 200 м. На них оценивалось обилие и состав древесных пород с учетом вертикальной структуры (сомкнутость крон, средняя высота взрослых деревьев и подроста, диаметр стволов на высоте 1.3 м), площадь поперечного сечения стволов с использованием реласкопа Биттерлиха, возраст деревьев со средними таксационными показателями с использованием бура Пресслера. В подчиненных ярусах фиксировался состав и проективное покрытие (пп) в процентах растений кустарникового, травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов. Оценивалось также общее проективное покрытие (ОПП) древесного (А), кустарникового (В), травяно-кустарничкового (С) и мохово-лишайникового (D) ярусов.

Таким образом, готовился “внешний” набор данных, используемый в дальнейшем анализе. Точки описаний сопоставлялись с ближайшими к ним точками внешних данных, формируя, таким образом, обучающую выборку.

3. Методы анализа

3.1. Классификация описаний

В рамках доминантной классификации лесов применялся эколого-фитоценотический подход. Выделенные единицы согласуются с категориями основных направлений классификации растительности, используемыми в отечественной геоботанической школе, при этом в предлагаемом варианте уточнено содержание ряда категорий по части признаков и семантики классифицируемых объектов [14]. Это вызвано тем обстоятельством, что при использовании доминантной классификации наблюдается известная степень свободы и высокая дробность в обозначении синтаксономических единиц.

Для корректировки выделенных единиц, а также оценки точности их выделения использовался пошаговый дискриминантный анализ. Выполняемая в рамках дискриминантной модели интерпретация межгрупповых различий позволяет не только разделить выделенные группы на основе набора переменных (полный состав),

¹ В случае очевидной принадлежности лесного участка к определенному синтаксону или его верификации на местности по уже выполненной классификации выполняется маршрутное описание без полного выявления видового состава.

но и выявить, насколько хорошо эти переменные помогают провести дискриминацию, и какие из них наиболее информативны.

3.2. Оценка показателей разнообразия лесного покрова

Анализ и пространственное отображение показателей, полученных в ходе наземных исследований, осуществлялся с помощью средств цифрового моделирования. Ключевой индикатор “состав” характеризуется показателями *видового* и *типологического разнообразия*. Видовое разнообразие определяется посредством индексов, таких как *видовая насыщенность* (альфа-разнообразие) – среднее число видов на единицу площади; *видовое богатство* (гамма-разнообразие) – число видов в синтаксоне. Типологическое разнообразие оценивалось по числу синтаксонов (групп ассоциаций), установленных в пределах исследуемой территории. При анализе типологического разнообразия существенным является определение оптимального набора синтаксонов, выявляемого с достаточным уровнем достоверности и соразмерного пространственному масштабу изучаемой территории.

Помимо общего набора параметров разнообразия и синтаксономических единиц, для лесохозяйственных или природоохранных работ важен учет отдельных целевых показателей состава лесов, в частности, доли лесов разного состава по классам и группам возраста древостоя, по основным лесным породам, числа и доли краснокнижных видов или доли ООПТ.

Индикатор “структура” оценивался на основе показателей распределения, выявленных по тем или иным признакам тематических классов (например, лесной территории в целом, определенных типов леса, а также их отдельных компонентов или показателей значимости). Наиболее обычным здесь следует назвать показатель “*лесистость территории*”, определяемый как отношение площади, покрытой лесной растительностью, к общей площади за вычетом потенциально нелесных участков (озер, болот, скал и пр.). Среди других тематических индикаторов фиксируются показатели “*нарушения*” лесного покрова, которые характеризуют как долю лесов, погибших от неблагоприятных природных условий (пожаров, насекомых-вредителей, болезней леса, ветровалов) и хозяйственных видов воздействия (рубки, атмосферное загрязнение и др.). К числу альтернативных индикаторов негативного воздействия на лесной покров могут выступать доля и площадь культур. Индекс *фрагментации* входит в число ландшафтных метрик, характеризующих степень сложности и гетерогенности территорий.

3.3. Дискриминантный анализ

Применение дискриминантного анализа в задачах тематического картографирования имеет более чем тридцатилетнюю историю [2, 19 и др.]. Развитие дискриминантного анализа и демонстрация результатов его применения для картографирования пространственной структуры ландшафтных компонентов получены в работах Ю.Г. Пузаченко [9–11]. Главным преимуществом анализа является возможность установления статистически значимых взаимосвязей между картографируемыми единицами наземного покрова и “внешними” переменными, что позволяет провести интерполяцию их значений для всей территории исследований, а также интерпретировать отображаемое ими пространственное варьирование.

3.4. Картографирование

Построение серии карт растительного покрова и его отдельных характеристик осуществлялось на основе перевода результатов интерполяции исследуемых классов в векторный формат (*ArcMap*, *ERDAS Imagine*). Заключительным этапом в среде ГИС, являются генерализация (слияние объектов площадью в один пиксель) и оформление легенды (*ArcMap*) (рис. 2).

4. Результаты

4.1. Полевые данные

Полевые описания (1087 точек) расположены в основном на севере, западе и юго-западе исследуемой территории. Локализация точек связана с покрытием наземными исследованиями разнородных по составу растительности и генезису подстилающих пород территорий, а также с их

транспортной доступностью. Типы наземного покрова, не представленные в описаниях (поля, водные объекты, населенные пункты), добавлены в обучающую выборку на основе визуального анализа ДДЗ. Таким образом, получено 1712 точек, используемых в обучающей выборке.

В результате классификации полевых описаний исследуемой территории выделено 18 синтаксонов лесной растительности на уровне формаций и 38 – на уровне групп ассоциаций (табл. 1).

4.2. Дискриминантный анализ групп ассоциаций

Качество дискриминации выделенных групп ассоциаций на основе видовых списков по проективным покрытиям видов составило 84.5%, что подтверждает адекватность классификации исходных данных. Ее точность варьирует в зависимости от сукцессионной стадии и происхождения сообществ (см. табл. 1). Сложный полидоминантный состав древесного яруса и определенное сходство организации подчиненных ярусов сообществ обуславливает перекрывание синтаксонов по видам и их обилию. С наименьшей точностью от проективного покрытия видов распознаются сосново-еловая мелкотравная (54.5%) и сосновая с липой, дубом и лещиной мелкотравно-широкоотравная (57.1%) группы ассоциаций. Первая в значительной степени отнесена к сосново-еловой мелкотравно-широкоотравной, а вторая частично – к сосновой с липой, дубом и лещиной широкоотравной группам ассоциаций. Относительно низкое качество дискриминации отмечено у липняков широкоотравных (с елью и березой) и березняков мелкотравных (с елью и осиной).

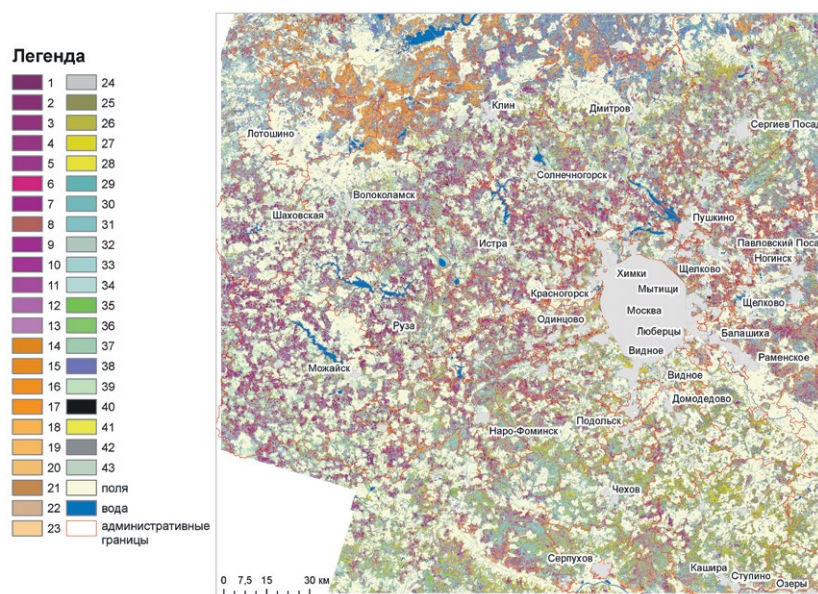


Рис. 2. Карта лесной растительности западного сектора Московской области (содержание легенды соответствует перечню и нумерации синтаксонов в табл. 1).

Таблица 1. Классификация растительного покрова модельной территории в Московской области

№	Группы ассоциаций для лесной растительности и прочие типы наземного покрова	Число точек	% по видовому составу	% от «внешних данных»	Площадь, %
1	еловая кустарничково-мелкотравно-зеленомошная	11	90.9	40.0	1.3
2	еловая мелкотравно-зеленомошная	14	85.7	54.5	0.9
3	еловая мелкотравная	38	84.2	41.2	0.8
4	еловая мелкотравно-широкотравная	114	86.0	22.4	1.5
5	еловая с дубом и липой мелкотравно-широкотравная	8	75.0	50.0	0.9
6	еловая с сосной мелкотравно-широкотравная	8	87.5	62.5	0.2
7	еловая широкоотравная	72	88.9	33.9	1.4
8	еловая с дубом и липой широкоотравная	8	87.5	75.0	0.9
9	елово-мелколиственная мелкотравно-зеленомошная	13	92.3	62.5	0.9
10	елово-мелколиственная кустарничково-мелкотравная	4	75.0	75.0	0.3
11	елово-мелколиственная мелкотравная	15	80.0	46.2	0.9
12	елово-мелколиственная мелкотравно-широкотравная	54	79.6	26.7	1.8
13	елово-мелколиственная широкоотравная	59	84.8	24.0	2.0
14	сосново-еловая кустарничково-мелкотравно-зеленомошная	16	81.3	43.8	1.6
15	сосново-еловая мелкотравная	11	54.6	63.6	0.3
16	сосново-еловая мелкотравно-широкотравная	37	83.8	30.0	0.8
17	сосново-еловая широкоотравная	55	78.2	46.5	0.9
18	сосновая кустарничково-мелкотравно-зеленомошная	16	81.3	68.8	1.2
19	сосновая мелкотравная	17	94.1	52.9	0.6
20	сосновая мелкотравно-широкотравная	12	91.7	57.1	0.5
21	сосновая с липой, дубом и лещиной мелкотравно-широкотравная	14	57.1	54.5	0.6
22	сосновая с липой, дубом и лещиной широкоотравная	34	85.3	55.9	1.1
23	сосновая разнотравная	12	100	75.0	0.2
24	сосновая кустарничково-сфаговая	7	100	100	1.2
25	дубовая с липой, елью и березой широкоотравная	22	95.5	20.0	2.7
26	липовая с дубом широкоотравная	25	88.0	54.5	1.4
27	липовая с елью и березой широкоотравная	16	62.5	40.0	2.2
28	широколиственно-еловая широкоотравная	27	88.9	20.0	1.3
29	березовая с елью и осиной мелкотравная	8	62.5	62.5	2.0
30	березовая с елью и осиной мелкотравно-широкотравная	26	73.1	70.6	1.2
31	березовая с елью и осиной широкоотравная	65	81.5	30.9	2.6
32	березовая с дубом и липой широкоотравная	29	75.9	44.4	2.8
33	березовая с елью и осиной влажнотравная	22	77.3	50.0	2.9
34	березовая с елью и осиной разнотравная	20	95.0	73.7	5.7
35	осиновая с елью и дубом широкоотравная	74	81.1	20.3	1.9
36	осиновая с елью и дубом влажнотравная	12	100	87.5	0.8
37	сероольховая влажнотравная	17	100	76.5	1.1
38	черноольховая влажнотравная, в том числе переувлажненные эвтрофные местообитания	13	100	69.2	3.2

Окончание табл. 1.

№	Группы ассоциаций для лесной растительности и прочие типы наземного покрова	Число точек	% по видовому составу	% от «внешних данных»	Площадь, %
<i>Остальные категории растительности и типы наземного покрова</i>					
1	мелколиственная поросль разнотравная	29	93.1	72	3.7
2	вырубки разнотравные	3	100	50	0.4
3	луга	9	100	77.8	1.0
4	открытые заболоченные местообитания	12	100	44.4	1.5
5	кустарниковая растительность	9	100	44.4	6.3
6	поля	293	–	98	29.0
7	вода	277	–	100	1.1
8	населенные пункты, объекты инфраструктуры	55	–	92.7	2.1
Всего		1712	84.5	64.6	100

Относительное качество дискриминации выделенных синтаксонов от пространственно распределенных данных (ДДЗ и ЦМР) составило 64.6%. Отдельно приведена площадь занимаемых сообществ. Лучшее качество дискриминации (80–100%) отмечено для сообществ с контрастными свойствами местообитания, в частности, для экотопов с избыточным увлажнением (группы ассоциаций сосняков кустарничково-сфагновых, осинников с елью и дубом влажнотравных и сероольшаников влажнотравных). В диапазоне с хорошим качеством дискриминации (70–80%) располагаются сообщества, занимающие 13% от площади территории. Значительная часть сообществ (занимает 15% площади) дискриминируется со средним качеством в диапазоне от 50 до 70%. Большая часть территории (23%) представлена сообществами с невысоким качеством дискриминации (30–50%), и, наконец, сообщества с худшим качеством распознавания (20–30%) представлены на площади 11%.

Дискриминантный анализ позволяет определить в рамках модели отнесение доли сообществ каждого синтаксона к другим типам на основе сходства видового состава сообществ, их местообитаний и отражательных свойств. В частности, наименьшее качество дискриминации отмечается для дубняков с липой и березой широколиственных (20%), часть которых отнесена к березнякам с дубом и липой широколиственным, а также – к липнякам с елью и березой широколиственным (15%) и в равной доле (10%) – к еловым широколиственным лесам и березнякам с елью и осинной.

Таким образом, семь групп ассоциаций имеют качество распознавания исходных классов от ДДЗ и ЦМР ниже 30%. В целом, наихудшее качество дискриминации характерно для лесов

с широколиственным и мелколиственно-широколиственным травяным ярусом, а также для лесов с участием дуба и ели. Этот факт объясняется производным статусом лесов Московского региона в целом, а также высокой долей лесов искусственного происхождения (17.5% на 2009 г.) [6]. Основными плантационными породами являются хвойные, в основном – ель. Прохождение стадии созревания лесов хвойно-широколиственной зоны, как в случае спонтанной сукцессии, так и искусственных насаждений происходит при формировании травяного покрова с большой долей бореальных видов при дальнейшем их замещении неморальными широколиственным. В этой связи дискриминантный анализ отражает объективную ситуацию сукцессионной мозаики лесного покрова с перекрытием видовых спектров как древесного, так и подчиненных ярусов, что соответствует естественной картине общей континуальности растительного покрова и сложности выделения относительно дискретных единиц.

4.3. Анализ распределения лесных сообществ и их отображение

Результаты интерполяции в рамках дискриминантного анализа классов растительности дают возможность провести **картографирование** растительности как результат совместного анализа выделенных из полевых описаний характеристик типологических классов, а также внешних пространственных переменных (рис. 2). Точность картографической модели близка к точности дискриминации обучающей выборки и составила 69.2%, что можно считать приемлемым при учете большого числа дискриминируемых классов. Качество дискриминантной модели может быть повышено за счет слияния близких по составу растительности синтаксонов, увеличением числа

описаний в группах с их малым числом, а также более равномерным распределением пробных площадей в пределах исследованной территории.

По результатам анализа лесопокрытая площадь исследуемой территории составила 55%, четверть ее представлена мелколиственными лесами. Следует отметить, что в отличие от данных Минприроды России (интернет источник) лесистость Московской области – 41%, в настоящем исследовании учтены все лесные территории вне зависимости от ведомственной принадлежности и собственности. Так, в лесопокрытые территории попадают дачные поселки, построенные в лесных массивах и сохранивших часть исходного древостоя. Помимо этого, не вся Московская область включена в исследование из-за отсутствия необходимой выборки точек наземных обследований.

Помимо анализа типологических классов произведен дискриминантный анализ отдельных характеристик лесных сообществ по показателям проективного покрытия и видового разнообразия с использованием морфометрических переменных рельефа и спектральных характеристик спутниковых снимков. В анализе участвовали основные лесообразующие виды древесного яруса, кустарникового, травяно-кустарничкового и мохового покровов. С высокой точностью дискриминировались такие древесные виды как сосна (69.6%), липа (64.9%), дуб (62.5%), ель (60.0%), черника (89.4%).

Выполнены картографические модели распределения покрытия основных эдификаторов

лесных сообществ. В качестве примера приведено пространственное распределение сосны обыкновенной (ярус А1), проективное покрытие которой варьировало от 0 до 88% и разделено на 8 групп с учетом отсутствия породы (рис. 3). Относительное качество дискриминации данного показателя равно 69.6%. Оценка качества дискриминации отдельных групп позволяет определить значения проективных покрытий с наихудшим качеством дискриминации, что дает возможность предположить возможные причины падения ее качества. Так, для сосны наихудшее качество дискриминации (менее 54%) соответствовало малой величине покрытия вида (7–38%) в первом ярусе в смешанных насаждениях с преобладающим участием ели или лиственных пород. Заметно, что наибольшее значения проективного покрытия сосны отмечались в северной части модельной территории по северным отрогам Клинско-Дмитровской гряды и на юге по крутым берегам р. Ока.

Достаточно наглядно распределение характерного представителя кустарничкового яруса – черники с приуроченностью ее к более бореальному типу лесов в северо-западной части региона, где показатели ее обилия максимальны (25–70%), а сравнительно низкие значения показателя – в южном и юго-восточном секторах (менее 7%) (рис. 4). Качество модели достаточно высокое – 81.7%. Наихудшее качество дискриминации отмечается для первой группы (56.9%), которая соответствует ОПП черники от 0.1 до 1%.

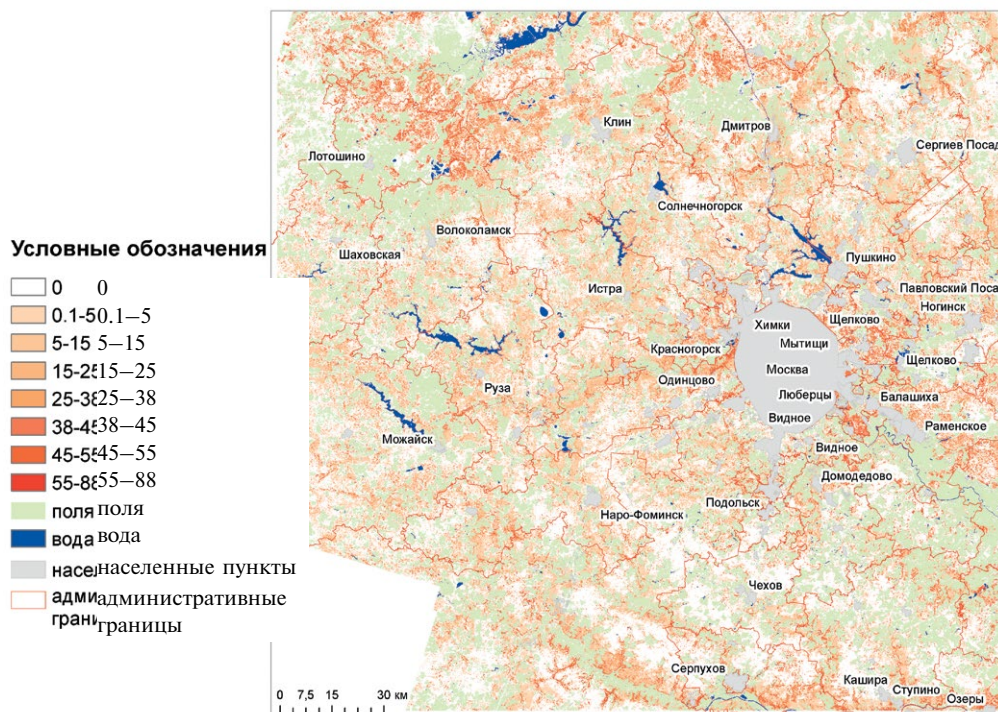


Рис. 3. Карта проективного покрытия сосны обыкновенной.

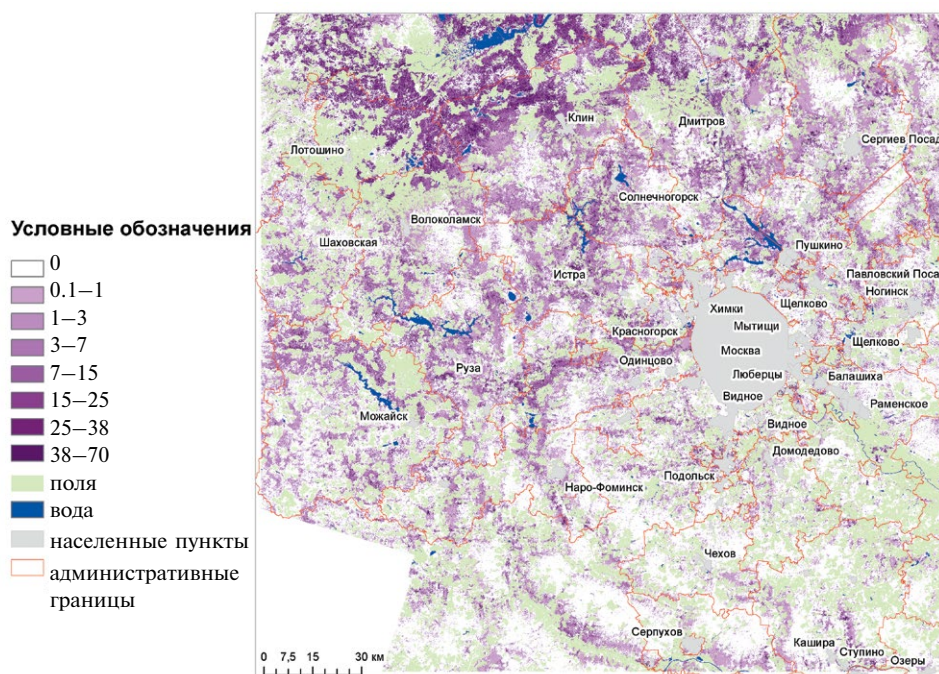


Рис. 4. Карта проективного покрытия черники обыкновенной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено сравнение технологии инвентаризации лесов Фенноскандии, а также используемой нами схемы оценки пространственного разнообразия лесов с использованием наземных и дистанционных данных. Показано, что в условиях России по причине ограничений числа пробных площадей в рамках регулярной сети (от 1000 до 10000 на сцену *Landsat*) альтернативным может являться метод интерполяции точечных данных полевых исследований на основе пошагового канонического дискриминантного анализа. Число площадок в данном случае для получения достоверного результата существенно меньше, чем при использовании других распространенных методов классификации с обучением, в частности, метода kNN. Полученные результаты при оценке состава и структуры лесов на примере большей части Московского региона позволили сделать заключение о возможности интеграции использованных методов и результатов в международную сеть NFIs и GEOSS в составе российского сегмента Глобальной системы наблюдения Земли. Снижение затрат на наземные исследования могут быть реализованы только за счет сокращения их объема, что имеет смысл при инвентаризации лесов при оценке, например, только формационного состава лесов и/или групп доминирующих видов, как это делается в рамках *National Forest Inventories* в Скандинавии.

Применяемая на стадии типизации сообществ эколого-фитоценологическая классифи-

кация обеспечила определенное соответствие типологических и картографируемых единиц на региональном уровне. Для исследуемой территории выделено 38 типов сообществ, отражающих особенности организации лесных экосистем, их эколого-ценотические спектры и свойства местообитания. Качество модели составило 64.6%. Привлечение к анализу морфометрических характеристик рельефа с выявлением различных уровней его иерархической организации, определяющих разномасштабное перераспределение вещественно-энергетических потоков, позволило учесть их вклад в распределение типов и характеристик лесов исследуемой территории, что повысило качество дискриминантных моделей.

Дальнейшее развитие используемых методов в этом направлении состоит в увеличении точности картографических моделей и заключается в следующем: а) более равномерном распределении пробных площадей в пределах исследованной территории; б) пополнении общего набора полевых описаний в составе групп сообществ, дискриминирующихся с невысокой точностью; в) уточнении анализируемых синтаксонов или объединении перекрывающихся по составу; г) расширении числа регистрируемых параметров за счет лесотаксационных показателей для получения данных о продукционных свойствах сообществ; д) разработке картографических моделей на более высоком пространственном уровне с использованием типологических единиц следующего ранга – классов ассоциаций.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена по теме Госзадания ИГ РАН № 0148-2019-0007 в части изучения состава лесных сообществ и гранта РНФ №18-17-00129 в части пространственного анализа разнообразия лесов.

FUNDING

The work was supported within the framework of the state-ordered research theme of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, no. 0148-2019-0007 (study of coenotic diversity of forests), by the Russian Science Foundation, project no. 18-17-00129 (processing of remote sensing data).

БЛАГОДАРНОСТИ

Для хранения и анализа геоботанических описаний использована база данных «FORDIV» (№2014620979). Авторы благодарят коллег, участвующих в ее наполнении.

ACKNOWLEDGEMENTS

For field geobotanical data analysis the database "FORDIV" (registration no. 20142020979) was used. The authors thank colleagues participating in its creation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капралов Е.Г., Кошкарёв А.В., Тикунов В.С., Глазырин В.В., Заварзин А.В., Замай С.С., Лурье И.К., Охонин В.А., Пырьев В.И., Рыльский И.А., Семин В.Н., Серапинас Б.Б., Симонов А.В., Трофимов А.М., Флейс М.Э., Якубайлик О.Э., Яровых В.Б. Геоинформатика. Кн. 2. М.: Изд. центр "Академия", 2010. 432 с.
2. Кендалл М., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. М.: Наука, 1976. 736 с.
3. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований: учеб. пособие. М.: Академия, 2004. 336 с.
4. Козлов Д.Н., Пузаченко М.Ю., Федяева М.В., Пузаченко Ю.Г. Отображение пространственно варьируемых свойств ландшафтного покрова на основе дистанционной информации и цифровой модели рельефа // Изв. РАН. Сер. геогр. 2008. № 4. С. 112–124.
5. Концепция участия Российской Федерации в глобальной системе наблюдения Земли и построения российского сегмента глобальной системы наблюдения Земли. URL: <http://rusgeo.ucoz.ru/publ/2-1-0-3> и http://rusgnz.com/mvk3doc/issledovanie_arkhitektury_postroenija_geoss_2013.pdf
6. Лесной план Московской области. Федеральное агентство лесного хозяйства, Федеральное государственное унитарное предприятие "Рослесин-

форг", ФГУП "РОСЛЕСИНФОРГ", московский филиал государственной инвентаризации лесов, филиал ФГУП "РОСЛЕСИНФОРГ", "МОСЛЕ-СПРОЕКТ". М. 2010. Т. 1. 428 с.

7. Общесоюзные нормативы для таксации лесов. Справочник. М.: Изд-во "Космос", 1992. С. 180–185.
8. Померанцев А. 2011. URL: <http://rcs.chemometrics.ru/Tutorials/classification.htm>
9. Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Академия, 2004. 408 с.
10. Пузаченко Ю.Г. Наука и концепция устойчивого развития // Ландшафтное планирование: общие основания, методология, технология: Труды Межд. школы-конф. "Ландшафтное планирование". М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. С. 4–80.
11. Пузаченко Ю.Г., Федяева М.В., Козлов Д.Н., Пузаченко М.Ю. Методологические основания отображения элементарных геосистемных процессов // Современные естественные и антропогенные процессы в почвах и геосистемах. М.: Изд-во РАСХН, 2006. С. 13–52.
12. Саворский В.П., Тищенко Ю.Г. Глобальная система систем наблюдения Земли – состояние и текущая деятельность // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 193–199.
13. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Статистический анализ данных на компьютере. М.: Изд-во ИНФРА-М, 1998. 528 с.
14. Черненко Т.В., Морозова О.В. Классификация и картографирование ценоотического разнообразия лесов // Лесоведение. 2017. № 4. С. 243–255.
15. Olsson H., Nilsson M., Persson A. GEOSS possibilities and challenges related to nationwide forest monitoring. ISPRS Commission VII Mid Term Symposium. 2006. URL: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/part7/PDF/219.pdf>
16. Tomppo E. The Finnish national forest inventory // Forest inventory – Methodology and applications. Managing forest ecosystems. 2006. V. 10. P. 179–194.
17. Tomppo E., Olsson H., Ståhl G., Nilsson M., Hagner O., Katila M. Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases // Rem. Sens. of Env. 2008. V. 112. P. 1982–1999.
18. Tomppo E., Katila M., Mäkisara K., Peräsaari J. The Multi-source National Forest Inventory of Finland – methods and results 2011 // Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 319. 2014. URL: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2014/mwp319.htm>
19. Webster R., Burrough P.A. Multiple discriminant analysis in soil survey // J. of Soil Sci. 1974. V. 25. P. 120–134.

REFERENCES

1. Kapralov E.G., Koshkarev A.V., Tikunov V.S., Glazyrin V.V., Zavarzin A.V., Zamai S.S., Lur'e I.K., Okhonin V.A., Pyr'ev V.I., Ryl'skii I.A., Semin V.N., Serapinas B.B., Simonov A.V., Trofimov A.M., Fleis

- M.E., Yakubailik O.E., Yarovykh V.B. *Geoinformatika* [Geoinformatics]. Moscow: Akademiya Publ., 2010, part 2. 432 p.
2. Kendall M., Stuart A. *Mnogomernyi statisticheskii analiz i vremennye ryady* [Multivariate Statistical Analysis and Time Series]. Moscow: Nauka Publ., 1976. 736 p.
 3. Knizhnikov Yu.F., Kravtsova V.I., Tutubalina O.V. *Aerokosmicheskie metody geograficheskikh issledovaniy* [Aerospace Methods of Geographical Research]. Moscow: Akademiya Publ., 2004. 336 p.
 4. Kozlov D.N., Puzachenko M.Yu., Fedyaeva M.V., Puzachenko Yu.G. Representation of spatial variation of landscape cover properties on the basis of remote sensing data Landsat and digital elevation model. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2008, no. 4, pp. 112–124. (In Russ.).
 5. Kalmykova O.V. *Kompleksnyi obzor GEOSS. Issledovanie arkhitektury postroeniya GEOSS* [Comprehensive Review of GEOSS. Study of the GEOSS Architecture]. 2013. Available at: http://rusgnz.com/mvk3doc/issledovanie_arhitektury_postroeniya_geo-ss_2013.pdf (accessed: 04.06.2019). (In Russ.).
 6. Forest Plan of the Moscow Region. Moscow: Federal'noe Agentstvo Lesnogo Khozyaistva, 2010, vol. 1. 428 p. (In Russ.).
 7. *Obshcheyuznyye normativy dlya taksatsii lesov. Spravochnik* [All-Union Standards for Forest Valuation. Handbook]. Moscow: Kosmos Publ., 1992. 496 p.
 8. Pomerantsev A. *Klassifikatsiya* [Classification]. 2011. Available at: <http://rcs.chemometrics.ru/Tutorials/classification.htm> (accessed: 04.06.2019) (In Russ.).
 9. Puzachenko Yu.G. *Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyakh* [Mathematical Methods in Ecological and Geographical Studies]. Moscow: Akademiya Publ., 2004. 408 p.
 10. Puzachenko Yu.G. Science and the concept of sustainable development. In *Landshaftnoe planirovanie: obshchie osnovaniya, metodologiya, tekhnologiya: tr. Mezhd. shkoly-konf. "Landshaftnoe planirovanie"* [Landscape Planning: Basics, Methodology, Technology: Works of the Int. School-Conf. "Landscape Planning"]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2006, pp. 4–80. (In Russ.).
 11. Puzachenko Yu.G., Fedyaeva M.V., Kozlov D.N., Puzachenko M.Yu. Methodological grounds for mapping elementary geosystem processes. In *Sovremennye estestvennyye i antropogennyye protsessy v pochvakh i geosistemakh* [Modern Natural and Anthropogenic Processes in Soils and Geosystems]. Moscow: Ross. Akad. S–kh Nauk, 2006, pp. 13–52. (In Russ.).
 12. Savorskii V.P., Tishchenko Yu.G. Global Earth observation system of systems - state and current activities. *Sovremennye Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2010, vol. 7, no. 2, pp. 193–199. (In Russ.).
 13. Tyurin Yu.N., Makarov A.A. *Statisticheskii analiz dannykh na komp'yutere* [Statistical Analysis of Data on a Computer]. Moscow: INFRA-M Publ., 1998. 528 p.
 14. Chernen'kova T.V., Morozova O.V. Classification and mapping of coenotic diversity of forests. *Lesovedenie*, 2017, no. 4, pp. 243–255. (In Russ.).
 15. Olsson H., Nilsson M., Persson A. GEOSS possibilities and challenges related to nationwide forest monitoring. In *Proc. of the ISPRS Commission VII Term Symposium, Enschede, The Netherlands*. 2006, vol. 811. Available at: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/part7/PDF/219.pdf> (accessed: 04.06.2019).
 16. Tomppo E. The Finnish national forest inventory. In *Forest inventory*. Kangas A., Maltamo M., Eds. Dordrecht: Springer, 2006, pp. 179–194. doi 10.1007/1-4020-4381-3_11
 17. Tomppo E., Olsson H., Ståhl G., Nilsson M., Hagner O., Katila M. Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases. *Remote Sens. Environ.*, 2008, vol. 112, no. 5, pp. 1982–1999.
 18. Tomppo E., Katila M., Mäkisara K., Peräsaari J. *The Multi-Source National Forest Inventory Of Finland — Methods And Results 2011*, vol. 319 of Working Papers of the Finnish Forest Research Institute. 2014. 224 p. Available at: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2014/mwp319.htm> (accessed: 15.05.2019).
 19. Webster R., Burrough P.A. Multiple discriminant analysis in soil survey. *J. Soil Sci.*, 1974, vol. 25, no. 1, pp. 120–134.

Evaluation of the Structure and Composition of Forests in Moscow Region Based on Field and Remote Sensing Data

T.V. Chernen'kova^{1,2,*}, M.Yu. Puzachenko^{1,2}, N.G. Belyaeva^{1,2}, and O.V. Morozova^{1,2}

¹*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Severtsov institute of ecology and evolution RAS, Moscow, Russia*

**e-mail: chernenkova50@mail.ru*

Received July 15, 2018; revised February 3, 2019; accepted April 4, 2019

The sequence and content of the main stages of determining the indicators of the structure and composition of forest communities based on satellite imagery of the Landsat system are described. It is shown that the application of quantitative processing methods for the interpolation of point data from field research, in particular canonical discriminant analysis, allows obtaining characteristics of the vegetation cover and investigating the factors of its biodiversity formation. The presented methods and results of the assessment of various parameters of the state of forests, their structure and typological composition can be integrated into the international network of the National Forest Inventory. Despite the difference in methodological approaches, there is a principal possibility of harmonizing the data obtained with the data of the Global Earth Observation System of Systems. For the test territory in the central part of the Russian plain (western sector of the Moscow oblast), the results of a joint analysis of field research data, remote sensing data and a digital elevation model are presented. A series of maps of the medium scale characterizing the spatial structure and composition of the forest cover of the study area was obtained.

Keywords: forest cover, Moscow region, digital elevation model, remote sensing data, discriminant analysis, field research, classification, typology of forests, mapping.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587-556620194112-124>