

УДК 528.8.04:502.62/581.526.426.2

СРАВНЕНИЕ ЭКОЛОГО-ФИТОЦЕНОТИЧЕСКОГО И ЭКОЛОГО-ФЛОРИСТИЧЕСКОГО МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЦЕНОТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ И КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ*

© 2018 г. Н. Г. Беляева¹, Т. В. Черненькова¹, О. В. Морозова^{1,2},
Р. Б. Сандлерский³, М. В. Архипова⁴

¹Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
Москва, 117997 Профсоюзная ул., д 84/32
E-mail: n.vin@mail.ru

²Институт географии РАН
Москва, 119017 Старомонетный пер., д 29

³Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова
Москва, 119071 Ленинский просп., д 33

⁴Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН
Москва, 101000 Уланский пер., д 13, стр. 2

Поступила в редакцию 28.06.2017 г.

Оценивалось современное ценотическое разнообразие лесов модельного региона площадью 51,5 тыс. га в юго-западной части Московской области на основе совместного анализа данных наземных полевых исследований, дистанционной информации (Landsat-5 сенсор TM, Landsat-8 сенсоры OLI и TIRS) и цифровых моделей рельефа. Классификация лесных сообществ проведена двумя способами: с использованием эколого-фитоценотического и эколого-флористического методов классификации. В результате классификации лесной растительности исследуемой территории выделено 15 эколого-фитоценотических синтаксонов на уровне групп ассоциаций и 9 эколого-флористических синтаксонов. Высокая точность группировки описаний с использованием обоих классификационных подходов подтверждена статистическими методами. Качество классификации эколого-флористических синтаксонов по присутствию и обилию видов, оцененное средствами пошагового дискриминантного анализа, было выше (87.1%), чем для эколого-фитоценотической классификации (78.9%). Унификация состава и наименований синтаксонов в рамках эколого-фитоценотической классификации обеспечила хорошее соответствие типологических и картографируемых единиц, – качество прогноза выделенных синтаксонов по яркостям пикселей и переменным рельефа составляло 78.6%. Относительное качество дискриминантного анализа выделенных синтаксонов в рамках эколого-флористической классификации продемонстрировало меньшую точность картографической модели (69.7%). Разработаны крупномасштабные карты лесной растительности для модельного региона на основе обоих классификационных подходов. Показано, что с большей точностью воспроизводятся единицы эколого-фитоценотической классификации, поскольку они отражают актуальное состояние растительных сообществ на определенной сукцессионной стадии развития, в то время как единицы эколого-флористической классификации скорее дают представление о потенциально возможном составе растительности, свойственном данному местообитанию. Сделан вывод, что большой объем основных синтаксонов эколого-флористической классификации (ассоциаций и субассоциаций) при крупномасштабном картографировании позволяет отслеживать общие закономерности распределения растительности, более содержательные в средне- и мелкомасштабном исполнении.

Ключевые слова: хвойно-широколиственные леса, дистанционное зондирование, эколого-фитоцено-
тическая и эколого-флористическая классификации, дискриминантный анализ, картографирование.

DOI: 10.7868/S0024114818030026

* Работа выполнена в рамках государственного задания ЦЭПЛ РАН, по теме “Концепция спутникового мониторинга состояния и динамики лесных экосистем” (0110-2014-0001), поддержана грантами РФФИ № 16-05-0014216 по части изучения цено-
тического разнообразия лесов Восточно-Европейской равнины; № 16-35-00562 “мол_а” по анализу экологии лесных со-
обществ, а также поддержана грантом РНФ № 17-77-10135 по части обработки дистанционной информации.

Развитие средств автоматизированного дешифрирования в тематической картографии вызвано потребностью повышения полноты и оперативности построения картографических моделей и уменьшением степени их субъективности, существенным сокращением необходимости получения новых полевых материалов и развитием технических средств сбора и анализа информации о состоянии и динамике растительного покрова. Изучение пространственной организации лесного покрова связано с выделением тематических классов и их картографическим отображением. Одним из самых распространенных алгоритмов при дешифрировании растительного покрова является классификация с обучением, основанная на решающем правиле максимального правдоподобия. В случае оценки типологического разнообразия в качестве эталона для обучения выступают синтаксономические единицы. При этом на основе совокупности полевых описаний предварительно выполняется классификация сообществ в соответствии с выбранным классификационным подходом.

Классификация растительности является эффективным средством не только для описания биоразнообразия, но используется как важнейший инструмент для понимания связи состава лесных сообществ с факторами среды. Необходимость определенного соответствия масштаба и характеристик выделяемых картографируемых единиц, обусловленных их физическими свойствами, значениям спектральных яркостей в ячейках земной поверхности (пикселях) определяет ограничения в использовании некоторых классификационных подходов. Одним из ограничений в использовании флористической классификации при распознавании дистанционной информации является большой объем основной синтаксономической единицы – ассоциации, что приводит к объединению участков, различающихся по физиономическим признакам и по набору доминантных видов, в том числе эдификаторов древесного яруса. Кроме того, отмечается недостаточная разработка классификационной схемы для лесной полосы Европейской России, особенно для вторичных лесов. Еще один недостаток – идентификация породного состава лесов требует введения дополнительных синтаксонов в ранге не только вариантов, но и фаций. В эколого-фитоценотической (доминантной) классификации типична высокая степень субъективизма при выделении низших рабочих единиц, что также вызывает затруднения в отнесении описываемых сообществ к синтаксонам определенного ранга (Черненкова, Морозова, 2017).

Внедрение в практику цифрового картографирования и количественных методов совместного анализа полевой, дистанционной и картографической информации позволяет с большей детальностью и точностью отразить современное состояние лесного покрова и его отдельных характеристик, но требует особых стандартов типизации растительного покрова. Помимо этого необходимо использование адекватного алгоритма анализа пространственных данных. В этом случае одним из успешно применяемых методов является пошаговый дискриминантный анализ (ПДА) (Пузаченко, 2004), который последние 10 лет часто используется при тематическом картографировании почвенного и растительного покровов (Козлов, 2006; Пузаченко и др., 2006; Козлов и др., 2008; Кренке, 2011; Пузаченко и др., 2014; Пузаченко, Черненкова, 2016; Попов, 2016).

Применение эколого-фитоценотической классификации для выявления ценотического разнообразия и определяющих его факторов хорошо себя зарекомендовало при изучении особенностей пространственной вариабельности наземного покрова модельных территорий северотаежных и гемибореальных лесов (Черненкова и др., 2015; Chernenkova et al., 2015). Сравнение преимуществ и ограничений основных классификационных подходов (эколого-фитоценотического и эколого-флористического) является важным для дальнейшего развития методов анализа пространственного разнообразия лесов.

Цель работы состоит в сравнительном анализе и пространственном отображении ценотического разнообразия лесного покрова юго-западной части Подмосковья на основе использования эколого-фитоценотического и эколого-флористического классификационных подходов с применением методов многомерной статистики.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Район исследований

Модельный регион расположен в южной части зоны хвойно-широколиственных лесов Восточно-Европейской равнины на юго-западном склоне Смоленско-Московской возвышенности. По физико-географическому районированию территория относится к южной части Смоленской физико-географической провинции, ее западному району, где преобладают моренные и водноледниковые отложения, перекрытые покровными суглинками (Анненская и др., 1997) (рис. 1). Площадь исследуемого участка – 51.5 тыс. га. При этом лесные земли занимают 56%. При исклю-



Рис. 1. Расположение исследуемой территории в юго-западной части Московской области. 1 – границы физико-географических провинций, 2 – границы физико-географических районов, 3 – территория исследований.

чении вырубок, произведенных после 2003 г., площадь лесных массивов составила 53% от общей площади территории (27 тыс. га).

Классификация описаний

Классификация сообществ выполнена на основе совокупности полных геоботанических описаний ($n = 178$). Технология предварительной инвентаризации разнообразия лесных экосистем предполагает выявление основных типов лесных сообществ с привлечением дистанционной информации, что изложено в ранее опубликованной работе (Черненко и др., 2012). Видовое и структурное разнообразие сообщества оценивалось на площади 20×20 м, с выявлением полного видового состава. Классификация лесных сообществ проведена двумя способами: согласно эколого-фитоценотической классификации и по методу Браун-Бланке. Эколого-фитоценотическую классификацию относят к доминантному подходу, поскольку классификационные единицы выделяются на разных уровнях или по доминирующим видам, или по доминирующим группам видов (относящимся к одной жизненной форме, одной экобиоморфе). На уровне ассоциаций это порождает большое число выделяемых единиц, что затрудняет сравнение и соотнесение со своими данными. Группа ассоциаций, выделяемая внутри формации по коллективным доминантам нижних ярусов (Заугольнова, Морозова, 2006), представляется более удобной единицей при оценке регионального ценотического разнообразия. В предлагаемом нами варианте уточнено содержание ряда категорий, в том числе

групп ассоциаций, по части признаков и семантики классифицируемых сообществ, что отражено в ранее опубликованной работе (Черненко, Морозова, 2017). В рамках эколого-фитоценотической классификации выделенные синтаксоны согласовывали с категориями основных направлений классификации растительности, используемыми в отечественной геоботанической школе (Ильинская и др., 1982; Савельева, 2000). В используемых нами группах ассоциаций для рассматриваемой территории также можно отметить важность “циклов” – совокупностей сообществ со сходным характером наземных ярусов при различающихся доминантах древостоя. Данный подход, используемый многими исследователями с несколько различающимися названиями для таких совокупностей сообществ (Порфирьев, 1960; Соколов, 1962; Савельева, 2000; Нешатаева, Демьянов, 2002), особенно актуален для территорий со значительным варьированием доминантов древостоя в силу антропогенных причин. Выделенные группы ассоциаций по объему и признакам выделения согласуются с разработанной Л.Б. Заугольновой схемой типологического разнообразия лесов Европейской России (Ценофонд..., website, 2017).

Классификация по методу Браун-Бланке выполнена на основе флористических принципов (Braun-Blanquet, 1964; Westhoff, van der Maarel, 1973). Обработка описаний проведена в пакетах TURBOVEG (Hennekens, 1996) и Juice 7.0 (Tichý, 2002), дифференциация сообществ осуществлена методом TWINSpan (Hill, 1979). Выделенные синтаксоны соотнесены с классификационной

схемой, полученной ранее для юго-запада Московской области на основе метода Браун-Бланке (Морозова, Тихонова, 2012).

Соотнесение единиц эколого-фитоценотической классификации с синтаксонами эколого-флористической классификации осуществлено различными способами: экспертным путем при анализе видового состава в описании, проверкой точности выделения синтаксона статистическими методами, а также при оценке пространственного распределения тематических классов с проверкой качества модели.

Для корректировки выделенных единиц, а также оценки точности их выделения использовался ПДА в пакетах прикладных программ (STATISTICA 10, IBM SPSS Statistics 20). Выполняемая в рамках дискриминантной модели интерпретация межгрупповых различий позволила не только разделить выделенные группы на основе набора переменных, но и выявить, насколько хорошо эти переменные помогают провести дискриминацию и какие из них наиболее информативны.

Пространственно распределенные данные

Данные разносезонной спектральной съемки системы Landsat использовали в качестве универсальных индикационных характеристик. Для исследуемой территории за последние 10 лет отобраны шесть безоблачных сцен за разные сезоны (Landsat-5 за даты 20.05.2007, 29.06.2010, 15.07.2010, 19.10.2010; Landsat-8 за даты 31.01.2014, 21.04.2014).

В качестве факторов, определяющих закономерности дифференциации лесного покрова, использовали морфометрические характеристики рельефа, рассчитываемые на основе цифровой модели рельефа (ЦМР). С их помощью можно описать потенциальные свойства местобитаний, задаваемые неоднородностями земной поверхности в результате перераспределения тепла и влаги. Информация о рельефе территории получена путем оцифровки изогипс топокарт масштаба 1:50 000. В результате в программной среде ArcGIS10.0 построена цифровая модель рельефа инструментом Топо в Растр (Топо to Raster) с размером ячеек, соответствующим разрешению снимков (30 м). На основе этих исходных данных построены модели различных морфометрических переменных рельефа: экспозиции, уклонов, освещенности при высоте Солнца 45° и азимутах 90° и 180°, а также кривизны: плановой, профильной и общей. Пространственное разрешение всех моделей также составляло 30 м.

Дискриминантный анализ позволяет находить правила по отнесению неизвестных объектов на основе сходства их признаков к заданным группам, определять степень сходства групп и вероятность отнесения объекта к тому или иному классу, а также выделять ведущие переменные в дифференциации растительного покрова (Пузаченко, 2004; Тюрин, Щеглов, 2015). Ключевым понятием анализа является дискриминантная функция – в геометрическом представлении новая ось (оси), позволяющая минимизировать отношение внутригрупповых дисперсий к межгрупповой, или линейная комбинация значений признаков (причем каждый признак входит со своим коэффициентом) и константа уравнения. Возможность построить оси, при проекции на которые группы будут минимально перекрываться (а в идеале вообще не будут перекрываться), позволяет успешно провести классификацию.

В данной работе алгоритм ПДА использован для решения задач: 1) оценки качества классификации и корректировки выделенных синтаксонов с учетом присутствия и обилия всех видов в описаниях; 2) интерполяции данных локальных измерений, полученных в процессе наземных исследований, путем построения вероятностно-статистической модели связи выделенных синтаксонов с изменчивостью свойств местообитаний, характеризующихся спектральными яркостями и морфометрическими переменными рельефа. Информативный комплекс определялся автоматически на основе выбора переменных с наибольшим вкладом в разделение (т.е. путем оценки абсолютной величины коэффициента, с которым переменная входит в дискриминантную функцию) и с учетом вклада переменной по F -критерию. Использован алгоритм “*Forward stepwise*” – последовательное включение в список информативных переменных. Значимость дискриминантных функций оценивается по значению статистики λ Уилкса. Считается, что чем ближе величина λ Уилкса к нулю, тем выше качество разделения групп данной дискриминантной функцией (Клекка, 1989).

Цифровое картографирование

Пиксели с известной принадлежностью к тематическому классу использованы в качестве обучающей выборки путем установления связей выделенных типов растительных сообществ со спектральными характеристиками и морфометрическими переменными рельефа. Растровые исходные данные вместе с обучающей выборкой также в растровом формате были превращены в табличный вид (ERDAS IMAGINE 2014)

и обработаны средствами ПДА (IBM SPSS Statistics 20). Результирующая таблица с предсказанной принадлежностью каждого пикселя к классу была превращена в растровый, а затем – в векторный формат (ArcGIS 10.0). Результатом пространственного отображения явились карты разнообразия лесного покрова модельного региона.

Проверка качества модели

Точность картографических моделей с использованием разных классификационных подходов оценена на основе расчета относительного качества ПДА. Также проанализирован характер распределения предсказанной точности по всем классам для выявления степени однородности класса по характеристикам видового состава, спектральным и морфометрическим характеристикам.

Адекватность картографической модели ценологического разнообразия в рамках эколого-фитоценологической классификации подтверждена проверкой соответствия предсказанных тематических классов описаниям на местности. Для проверки использованы маршрутные описания, которые не участвовали в анализе при составлении модели. Точность карт оценена с помощью составления матрицы ошибок по принципу кросс-табуляции со структурой “предсказанный класс (по полуженной модели)/реальный класс (по данным наземных исследований)”. Проверка качества выделенных тематических классов по эколого-флористической классификации не выполнялась, поскольку для проверки использовались маршрутные описания.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Соотнесение состава единиц эколого-фитоценологической и эколого-флористической классификаций.

В результате классификации лесного покрова юго-запада Московской области выделено 15 эколого-фитоценологических синтаксонов на уровне групп ассоциаций и 9 эколого-флористических синтаксонов. В частности, по методу Браун-Бланке лесные сообщества исследуемой территории отнесены к двум ассоциациям, двум субассоциациям, шести вариантам и трем сообществам. Неморальноотравные ельники и еловые леса с небольшим участием широколиственных пород в древостое включены в ассоциацию *Rhodobryo-Piceetum* и субассоциацию *caricetosum pilosae*. Широколиственные леса и леса с равным соотношением ели и широколиственных пород в верхнем ярусе входят в ассоциацию *Quercus-Tilietum* субассоциацию *caricetosum pilosae*. Участие других

пород в древостое (сосны, березы, осины) отражено на более низком иерархическом уровне при выделении вариантов данных синтаксонов. Так, сосновые леса на месте неморальноотравных ельников отнесены к варианту *Rhodobryo-Piceetum caricetosum pilosae var. Pinus sylvestris*.

Синтаксоны эколого-фитоценологической классификации (в ранге группы ассоциаций)

1. Еловая мелкотравная (Е м)
2. Еловая мелкотравно-широкоотравная (Е м-ш)
3. Еловая широкоотравная (Е ш)
4. Елово-осиново-березовая мелкотравно-широкоотравная (Е-М м-ш)
5. Елово-осиново-березовая широкоотравная (Е-М ш)
6. Елово-сосновая мелкотравная (Е-С м)
7. Елово-сосновая мелкотравно-широкоотравная (Е-С м-ш)
8. Сосновая широкоотравная (С ш)
9. Дубовая широкоотравная (Д ш)
10. Липовая широкоотравная (Лп ш)
11. Березовая широкоотравная (Б ш)
12. Дубово-липово-березово-осиновая широкоотравная (М-Ш ш)
13. Березовая разнотравная (Б разн)
14. Осинная широкоотравная (Ос ш)
15. Сероольховая влажноотравная (Олс вл)

Синтаксоны эколого-флористической классификации

1. Сообщество *Alnus incana–Humulus lupulus* (AH)
2. Сообщество *Betula pendula–Angelica sylvestris* (BA)
3. Сообщество *Betula pendula–Corylus avellana* (BC)
4. *Rhodobryo-Piceetum caricetosum pilosae var. Athyrium filix-femina* (RP_af)
5. *Rhodobryo-Piceetum caricetosum pilosae var. Pinus sylvestris* (RP_cp_P)
6. *Rhodobryo-Piceetum caricetosum pilosae var. typica* (RP_cp_t)
7. *Quercus-Tilietum caricetosum pilosae var. typical* (QT)
8. *Quercus-Tilietum caricetosum pilosae var. Populus tremula* (QT_Pt)

9. *Quercu-Tilietum caricetosum pilosae var. Betula pendula (QT_Bp)*.

Выделенные в соответствии с эколого-флористической классификацией сообщество *Alnus incana–Humulus lupulus* (сероольшаники пойменные) по составу входящих в него описаний полностью совпадают с сероольховыми влажнотравными лесами по эколого-фитоценотической классификации. Сообщество *Betula pendula–Angelica sylvestris* (березняки разреженные, в том числе зарастающие вырубки) также включают в себя все сообщества из березовой разнотравной группы ассоциаций. Более сложная ситуация наблюдается с сообществом *Betula pendula–Corylus avellana* (мелколиственные леса с лещиной), поскольку они включают самые разнообразные сообщества из эколого-фитоценотических синтаксонов, характеризующие различные сукцессионные стадии лесовосстановительного цикла данной группы. Так, в *Betula pendula–Corylus avellana* попадают елово-мелколиственные мелкотравно-широкотравные, елово-мелколиственные широколиственные, березовые широколиственные, а также (по одному описанию/сообществу) елово-сосновые мелкотравно-широкотравные, березовые разнотравные и осиновые широколиственные леса.

Вариант *Rhodobryo-Piceetum caricetosum pilosae var. Athyrium filix-femina* представлен в эколого-флористической трактовке обедненными сообществами неморальнотравных ельников со смешанным древостоем (мелколиственно-еловые леса). Этот синтаксон включает несколько единиц эколого-фитоценотической классификации с преобладанием еловых сообществ из следующих трех групп: еловой мелкотравной, еловой мелкотравно-широкотравной и елово-мелколиственной мелкотравно-широкотравной, которые характеризуются участием бореального спектра видов. Совсем небольшая доля приходится на еловые широколиственные, елово-мелколиственные широколиственные и елово-сосновые мелкотравные леса. Подобное разнообразие сообществ, выделенных на эколого-фитоценотической основе, может свидетельствовать о включении сообществ разных сукцессионных стадий в данный синтаксон, что отражает актуальное состояние лесных сообществ.

Вариант *Rhodobryo-Piceetum caricetosum pilosae var. Pinus sylvestris* представлен сообществами с сосной на месте неморальнотравных ельников. Наибольшее число описаний данного синтаксона соответствует сосновым широколиственным лесам по эколого-фитоценотической классификации.

Также здесь отмечены елово-сосновые мелкотравные и елово-сосновые мелкотравно-широкотравные сообщества.

Типичному варианту субассоциации волосисто-соковых неморальнотравных ельников (*Rhodobryo-Piceetum caricetosum pilosae var. typica*) по эколого-фитоценотической классификации соответствуют ельники широколиственные, ельники мелкотравно-широкотравные. Единично здесь отмечены сообщества из елово-мелколиственной широколиственной, елово-сосновой мелкотравно-широкотравной и березовой широколиственной групп.

Состав субассоциации *Quercu-Tilietum caricetosum pilosae* характеризуется значительным участием широколиственных пород и неморальным характером наземного покрова. Большая часть этих лесов отнесена к типичному варианту (*var. typica*). Среди сообществ, выделенных в соответствии с эколого-фитоценотической классификацией, здесь преобладают дубовые широколиственные, липовые широколиственные и дубово-липово-березово-осиновые широколиственные леса. Также отмечены еловые широколиственные, елово-мелколиственные широколиственные, березовые широколиственные и осиновые широколиственные сообщества. В варианте широколиственных лесов с преобладанием осины (*Quercu-Tilietum caricetosum pilosae var. Populus tremula*) представлены в основном осиновые широколиственные сообщества эколого-фитоценотической классификации, но также единично сюда попали елово-мелколиственные широколиственные и липовые широколиственные. В варианте с березой (*Quercu-Tilietum caricetosum pilosae var. Betula pendula*) преобладают сообщества березовой широколиственной группы ассоциаций, единично отмечены елово-мелколиственные широколиственные и дубово-липово-березово-осиновые широколиственные леса.

Таким образом, в ряде случаев наблюдается полное совпадение синтаксонов двух классификаций (*Alnus incana–Humulus lupulus* – сероольховые влажнотравные и *Betula pendula–Angelica sylvestris* – березовые разнотравные леса). Чаше отмечается сходство выделенных классов по составу и богатству напочвенного покрова, в частности, типичный вариант субассоциации *Quercu-Tilietum caricetosum pilosae* объединяет зрелые неморальнотравные сообщества с богатым видовым составом. Его вариантам с участием осины и березы (*Quercu-Tilietum var. Populus tremula* и *Quercu-Tilietum var. Betula pendula*) соответствуют производные сообщества с преобладанием соответствующей мелколиственной породы в древесном ярусе. Неоднородность состава как по

древесным эдификаторам, так и по наземному покрову сообществ *Betula pendula*–*Corylus avellana* можно объяснить сукцессионной стадией лесов с характерным пологом лещины в подлеске.

Сообщества *Rhodobryo-Piceetum caricetosum pilosae* var. *Athyrium filix-femina* включают большой спектр сообществ с преобладанием разных эколого-фитоценологических групп видов в наземном покрове (мелкотравные, мелкотравно-широколистственные и широколистственные), а также группы с разным соотношением ели и мелколиственных пород в древесном ярусе.

Относительное качество дискриминантного анализа выделенных единиц по присутствию и обилию видов в рамках эколого-фитоценологической классификации – 78.9%. Качество классификации эколого-флористических синтаксонов выше, чем при выделении единиц эколого-фитоценологической классификации, и составляет 87.1%.

Классификацию обучающей выборки по спектральным яркостям и морфометрическим переменным рельефа осуществляли с построением вероятностно-статистической модели.

Относительное качество ПДА выделенных эколого-фитоценологических классов по спектральным характеристикам и цифровым моделям рельефа указывает на довольно высокую точность картографической модели – 78.6% (табл. 1).

Самым высоким относительным качеством классификации обучающей выборки (90–100%) характеризовались сообщества в специфических местообитаниях. Так, сосновые широколиственные леса (90%) встречаются на террасах р. Протва. Сообщества с участием широколиственных пород (дубовые, липовые, дубово-липово-березово-осиновые (100%) располагаются в верхних частях холмов с хорошим дренажом и близким залеганием моренных отложений. При этом последние 3 группы хорошо дифференцировались из-за различного состава доминантов древесного полога. Что касается сероольховых влажнотравных лесов, то они однозначно выделялись как по условиям местообитаний (долины ручьев), так и по видовому составу (в них много нитрофильных видов с высоким обилием) и структуре (древостой разреженный, проективное покрытие травяного яруса – 100%). Характеристики данных групп

Таблица 1. Относительное качество дискриминантного анализа эколого-фитоценологических синтаксонов по спектральным характеристикам и цифровым моделям рельефа

Группа ассоциаций	Предсказанная принадлежность к группе, %														
	Е м	Е м-ш	Е ш	Е-М м-ш	Е-М ш	Е-С м	Е-С м-ш	С ш	Д ш	Лп ш	Б ш	М-Ш ш	Б разн	Ос ш	Олс вл
Е м	86.7	0.0	0.0	0.0	0.0	6.7	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Е м-ш	6.5	64.5	6.5	12.9	6.5	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Е ш	0.0	23.1	53.8	0.0	15.4	0.0	0.0	7.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Е-М м-ш	0.0	8.3	0.0	70.8	12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	0.0	0.0	4.2	0.0
Е-М ш	0.0	6.7	0.0	13.3	73.3	0.0	0.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Е-С м	12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	87.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Е-С м-ш	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	85.7	14.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
С ш	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	90.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Д ш	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Лп ш	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Б ш	0.0	0.0	0.0	9.1	9.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	81.8	0.0	0.0	0.0	0.0
М-Ш ш	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	0.0	0.0	0.0
Б разн	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.0	0.0	75.0	0.0	0.0
Ос ш	0.0	0.0	7.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.7	0.0	0.0	84.6	0.0
Олс вл	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100

Примечания. Е м – еловая мелкотравная; Е м-ш – еловая мелкотравно-широколистственная; Е ш – еловая широколистственная; Е-М м-ш – елово-осиново-березовая мелкотравно-широколистственная; Е-М ш – елово-осиново-березовая широколистственная; Е-С м – елово-сосновая мелкотравная; Е-С м-ш – елово-сосновая мелкотравно-широколистственная; С ш – сосновая широколистственная; Д ш – дубовая широколистственная; Лп ш – липовая широколистственная; Б-Ш ш – березовая широколистственная; М-Ш ш – дубово-липово-березово-осиново-березовая широколистственная; Б разн – березовая разнотравная; Ос ш – осинная широколистственная; Олс вл – сероольховая влажнотравная.

сообществ скоррелированы с особым диапазоном значений морфометрических переменных и спектральных яркостей.

Наименьшим относительным качеством классификации отличались 4 группы: еловые мелко-травно-широко-травные, еловые широко-травные, елово-осиново-березовые мелко-травно-широко-травные и елово-осиново-березовые широко-травные. Качество дискриминации группы еловых мелко-травных лесов выше, что связано с их положением в рельефе и особенностями состава. Эти сообщества встречаются на выровненных бедных местообитаниях, а в составе наземных ярусов преобладают бореальные виды, что отличает их от других сообществ. Остальные группы еловых и елово-мелколиственных лесов различались хуже. Во-первых, они распространены в сходных условиях местообитаний. Во-вторых, характер состава наземных ярусов у этих групп – переходный, во многих случаях однозначное отнесение сообщества к мелко-травно-широко-травной или же к широко-травной группе проблематично. То же касается и состава древостоя: в еловых сообществах зачастую встречаются мелколиственные породы, из-за чего может происходить их перекрывание по спектральным характеристикам с елово-осиново-березовыми. Таким образом, почти 13% сообществ еловых мелко-травно-широко-травных лесов отнесено к елово-осиново-березовым мелко-травно-широко-травным, а по 6.5% – к еловым мелко-травным, еловым широко-травным и елово-осиново-березовым широко-травным. Среди всех сообществ наименьшим качеством классификации отличаются еловые широко-травные; в группу еловых мелко-травно-широко-травных лесов отнесено 23.1% этих сообществ. Предсказанная принадлежность к группе остальных сообществ – более 80%, что является высоким показателем. Выделяются только березовые разнотравные леса, четвертая часть которых отнесена к березовым широко-травным сообществам. По всей видимости, часть описаний разнотравных сообществ по положению в рельефе и физическим особенностям оказалась ближе к широко-травным лесам, что не отражено в видовом составе этих сообществ.

В результате проведения ПДА выделены следующие переменные, отвечающие в наибольшей степени за разделение классов: яркости каналов ближнего инфракрасного за 20.05.2007 и 21.04.2014; среднего инфракрасного (SWIR2) за 15.07.2010 и 21.04.2014; голубого за 31.01.2014, а также морфометрическая переменная – высота над уровнем моря. Ближний инфракрасный канал чувствителен к биомассе растительности,

при максимальном фотосинтезе он дает максимум отражения. Средний инфракрасный (SWIR2) различает системы по содержанию в них влаги (Кренке, 2011). Значимость голубого канала при разделении единиц растительного покрова является не совсем стандартной, однако в литературе подобные случаи отмечены (Комарова, 2017). Включение переменной “высота над уровнем моря” говорит о связи в приуроченности картографируемых единиц к определенным высотным диапазонам, что является статистическим подтверждением факта, известного из литературных источников (Савельева, 2000).

В анализе использовались 6 дискриминантных функций, при этом первые две учли 82.3% дисперсии (первая – 65.7%, вторая – 16.6%). Величины лямбда Уилкса равны соответственно 0.028 и 0.159. В табл. 2 представлены коэффициенты, по абсолютным значениям (модулю) которых можно определить относительный вклад переменных в значение дискриминантных функций (с учетом влияния остальных переменных). Так, в первую функцию наибольший вклад вносят яркости среднего инфракрасного канала (SWIR2) за 21.04.2014, во вторую – среднего ИК канала за 15.07.2010 и т.д.

Относительное качество дискриминантного анализа эколого-флористических классов по спектральным характеристикам и цифровым моделям рельефа также достаточно высоко (69.7% исходных сгруппированных наблюдений классифицировано правильно) (табл. 3). При этом наилучшим качеством характеризуются синтаксоны сообщества *Alnus incana–Humulus lupulus, Rhodobryo-Piceetum caricetosum pilosae var. Athyrium filix-femina* и *Quercu-Tilietum caricetosum pilosae var. Betula pendula*. Группа сероольховых влажнотравных сообществ хорошо выделяется по условиям местообитания и структуре сообществ, как и соответствующий синтаксон эколого-фитоценотической классификации (Олс вл). *Quercu-Tilietum caricetosum pilosae var. Betula pendula* объединяет березняки широко-травные, которые хорошо дифференцируются по спектральным характеристикам вследствие довольно однородного формационного состава, они также хорошо выделяются и при использовании эколого-фитоценотического подхода.

Сообщества Betula pendula–Corylus avellana дискриминировались с минимальной точностью (38.5%). Их отличает неоднородность состава, а также отсутствие связи с определенным типом местообитаний, что и повлияло на разброс

Таблица 2. Нормированные коэффициенты канонических дискриминантных функций при эколого-фитоценоотическом подходе

Переменная	Функция					
	1	2	3	4	5	6
NIR2007_140	0.848	0.408	-0.754	1.106	-0.487	-0.375
SWIR22010_196	-0.198	-0.756	-0.378	-0.350	1.067	0.456
Blue 2014_031	-0.080	-0.723	0.095	0.535	-0.535	0.562
NIR2014_111	-0.886	0.278	0.845	0.256	0.779	0.186
SWIR22014_111	0.910	0.230	0.753	-0.871	-0.335	-0.463
Elevation	0.124	0.663	0.040	-0.364	0.031	0.719

Примечания. В табл. 2 и 4: NIR – ближний инфракрасный канал, SWIR2 – средний ИК канал, Blue – голубой канал, Elevation – высота над уровнем моря. В графе “Переменная” после названия канала следует год и день от начала года, когда был получен снимок.

яркостных характеристик и небольшую зависимость от условий среды.

Наиболее значимыми переменными при разделении классов эколого-флористической классификации по спектральным яркостям и морфометрическим переменным оказались яркости следующих каналов: ближнего инфракрасного за 20.05.2007; средних инфракрасных за 15.07.2010 (SWIR-2), 31.01.2014 (SWIR-1) и 21.04.2014 (SWIR-1 и SWIR-2); голубого за 31.01.2014; зеленого за 31.01.2014; теплового за 20.05.2007, а также морфометрическая характеристика – высота над уровнем моря. Пять переменных, включенных при разделении эколого-фитоценоотических синтаксонов, были использованы и для различения единиц эколого-флористической классификации (NIR2007_140, SWIR22010_196, blue 2014_031, SWIR22014_111, elevation). Также для дискриминации эколого-флористических синтаксонов были использованы тепловой (TIR2007_140), зеленый (green 2014_031) и средний инфракрасный (SWIR1) (SWIR12014_031, SWIR12014_111) каналы. Тепловой канал отвечает за измерение теплового потока, исходящего от поверхности. Зеленый чувствителен непосредственно к цвету растительности. Средний инфракрасный канал (SWIR1) чувствителен к содержанию влаги в растительном покрове (Кренке, 2011).

В анализе использованы 8 дискриминантных функций. Первые 3 учли 82.5% дисперсии (первая – 48.7%, вторая – 19.3%, третья – 14.5%). Величины λ Уилкса равны соответственно 0.023, 0.092 и 0.205. По результатам анализа, наибольший вклад в первую функцию вносит средний инфракрасный канал (SWIR-2) за 21.04.2014, во вторую – та же переменная, в третью – средний

инфракрасный канал с меньшей длиной волн (SWIR-1) за 21.04.2014 и т.д. (табл. 4).

Цифровое картографирование

Элементы будущей картографической модели охарактеризованы по элементам растровой сети (матрицы, пикселей) с использованием признаков спектральных и морфометрических характеристик. Для каждого элемента сетки, не обеспеченного полевыми описаниями, рассчитывалось наиболее вероятное значение моделируемого свойства. Получены карты лесной растительности модельного региона в юго-западной части Московской области, созданные на основе двух классификационных подходов (рис. 2, 3). При проверке качества модели по данным наземных описаний, не участвующих в обучающей выборке, с использованием эколого-фитоценоотических единиц выяснилось, что модель совпадает с реальным распределением лесных сообществ на 78%. Точность распознавания объектов в диапазоне 70–85% считается приемлемой (Малышева, 2012).

При оценке площади самыми распространенными формациями, составляющими более половины всех лесов (62%), являются еловые и елово-мелколиственные (елово-осиново-березовые) леса. Они включают 5 групп ассоциаций, выделенных на основе эколого-фитоценоотического подхода (рис. 4а). Четверть лесной территории (26%) занимают еловые мелкотравно-широкотравные сообщества. Значительное участие в составе лесопокрываемой площади принадлежит производным мелколиственным лесам (березнякам широколиственным, березнякам разнотравным и осинникам широколиственным)

Таблица 3. Относительное качество дискриминантного анализа эколого-флористических синтаксонов по спектральным характеристикам и цифровым моделям рельефа

Группа сообществ	Предсказанная принадлежность к группе, %								
	АН	ВА	ВС	RP_af	RP_cp_P	RP_cp_t	QT	QT_Pt	QT_Bp
АН	80.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0	0.0	0.0
ВА	0.0	66.7	16.7	0.0	0.0	0.0	16.7	0.0	0.0
ВС	0.0	0.0	38.5	30.8	0.0	0.0	23.1	7.7	0.0
RP_af	0.0	0.0	1.7	86.4	5.1	5.1	0.0	1.7	0.0
RP_cp_P	0.0	0.0	0.0	16.7	66.7	16.7	0.0	0.0	0.0
RP_cp_t	0.0	0.0	3.2	22.6	6.5	61.3	0.0	3.2	3.2
QT	4.2	4.2	12.5	0.0	0.0	12.5	54.2	4.2	8.3
QT_Pt	0.0	0.0	10.0	10.0	0.0	0.0	20.0	60.0	0.0
QT_Bp	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.1	88.9

Примечания. АН – сообщество *Alnus incana–Humulus lupulus*; ВА – сообщество *Betula pendula–Angelica sylvestris*; ВС – сообщество *Betula pendula–Corylus avellana*; RP_af – *Rhodobryo-Piceetum caricetosum pilosae var. Athyrium filix-femina*; RP_cp_P – *Rhodobryo-Piceetum caricetosum pilosae var. Pinus sylvestris*; RP_cp_t – *Rhodobryo-Piceetum caricetosum pilosae var. typica*; QT – *Quercus-Tilietum caricetosum pilosae var. typical*; QT_Pt – *Quercus-Tilietum caricetosum pilosae var. Populus tremula*; QT_Bp – *Quercus-Tilietum caricetosum pilosae var. Betula pendula*.

Таблица 4. Нормированные коэффициенты канонических дискриминантных функций при эколого-флористическом подходе

Переменная	Функция							
	1	2	3	4	5	6	7	8
NIR2007_140	0.615	-0.228	0.426	-1.039	-0.314	-1.373	0.179	-0.185
TIR2007_140	-0.322	0.274	0.660	-0.201	0.482	0.140	-0.066	0.186
SWIR22010_196	-0.127	0.091	-1.129	0.477	-0.131	0.314	0.170	0.709
Blue 2014_031	1.628	1.517	-1.096	-1.256	-0.565	1.037	-1.906	0.461
Green 2014_031	-1.457	-0.768	0.915	1.017	0.862	-1.237	2.277	0.114
SWIR12014_031	0.398	0.125	-0.110	-0.502	-0.359	1.308	0.247	0.164
SWIR12014_111	-1.425	4.380	2.170	4.846	-4.395	1.999	-1.194	-0.237
SWIR22014_111	1.686	-4.807	-1.664	-3.545	4.803	-1.983	0.869	-0.797
Elevation	0.006	-0.473	0.466	0.338	0.018	0.268	-0.442	0.631

Примечания. Обозначения см. табл. 2. Кроме того: TIR – дальний инфракрасный канал (тепловой), Green – зеленый канал, SWIR1 – средний инфракрасный канал.

(28%). Минимальная площадь распространения принадлежит елово-сосновым мелкотравно-широколистным (Е-С м-ш), дубовым широколистным (Д ш) и дубово-липово-березово-осиновым широколистным (М-Ш ш) лесам. Каждая из этих групп занимает менее 1% лесных массивов. Самыми распространенными тематическими единицами, выделенными при использовании

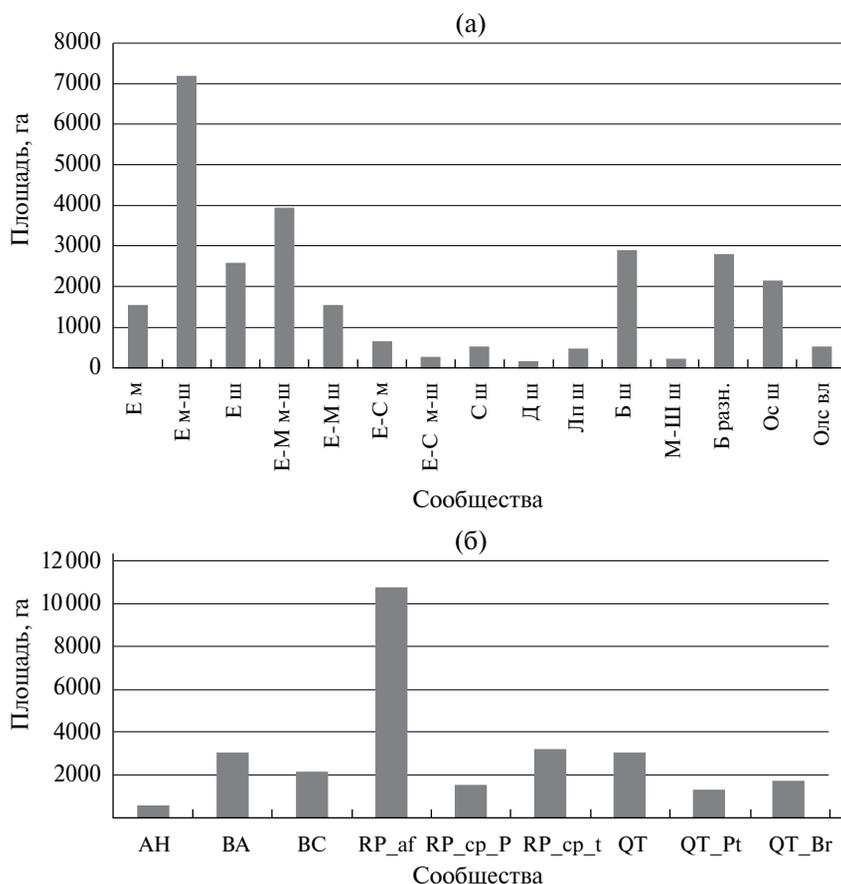


Рис. 4. Распределение групп сообществ, выделенных в соответствии с эколого-фитоценотической (а) и эколого-флористической (б) классификациями, по площади. Обозначения см. в табл. 1 и 3, а также в перечне синтаксонов.

эколого-флористической классификации, являются еловые обедненные и елово-мелколиственные сообщества (*Rhodobryo-Piceetum caricetosum pilosae* var. *Athyrium filix-femina*) (рис. 4б). Минимальной площадью распространения отличаются сообщества *Alnus incana–Humulus lupulus*, *Rhodobryo-Piceetum caricetosum pilosae* var. *Pinus sylvestris*, *Quercus-Tilietum caricetosum pilosae* var. *Populus tremula* (QT_Pt) и *Quercus-Tilietum caricetosum pilosae* var. *Betula pendula* (QT_Bp). Этот результат согласуется с оценкой участия сообществ в лесном покрове в соответствии с эколого-фитоценотическим подходом. Следует отметить, что распределение классов по доле участия менее равномерное по эколого-флористической классификации, чем в случае эколого-фитоценотической классификации. О более низкой точности воспроизведения классов свидетельствует “размытость” их состава по другим синтаксонам из-за объединения сообществ с разным формационным составом, что понижает относительное качество ПДА (табл. 2).

Пространственное соотношение единиц эколого-фитоценотической и эколого-флористической

классификаций проанализировано путем пересечения векторных слоев. Картографический анализ позволил выявить, что синтаксоны двух классификационных подходов, хорошо совпадающие по объему и содержанию, достаточно хорошо совпадают и в пространственном отношении. Как было отмечено, по составу сообществ полностью идентичны сообщества *Alnus incana–Humulus lupulus* (сероольшаники пойменные) и сероольховые влажнотравные леса, а также сообщества *Betula pendula–Angelica sylvestris* (березняки разреженные, в том числе зарастающие вырубки) и березовая разнотравная группа ассоциаций.

В пространственном отношении эти пары классов также хорошо совпадают (табл. 5). Варианты субассоциации *Quercus-Tilietum caricetosum pilosae* по содержанию очень близки к осиновым и березовым широколиственным группам ассоциаций. При этом синтаксоны березняков широколиственных и *Quercus-Tilietum* var. *Betula pendula* имеют между собой максимальное пространственное перекрытие по сравнению с другими тематическими классами. Что касается распределения осиновых

Таблица 5. Соотношение площадей единиц эколого-флористической и эколого-фитоценотической классификаций, га

Единицы эколого-фитоценотической классификации	Единицы эколого-флористической классификации										
	<i>АН</i>	<i>ВА</i>	<i>ВС</i>	<i>RP_af</i>	<i>RP_cp_P</i>	<i>RP_cp_t</i>	<i>QT</i>	<i>QT_Pt</i>	<i>QT_Bp</i>	<i>S общ., га</i>	
Е м	62.0		1.0	1277.1	35.1	45.0					1420.2
Е м-ш	935.9	508.1	171.8	3999.6	486.4	902.8	10.4	39.3	29.7		7084.0
Е ш	62.6	61.7	280.4	813.9	140.0	719.0	186.8	106.8	87.2		2458.3
Е-М м-ш		0.4	357.4	2670.3	5.6	472.4	56.4	75.3	209.3		3847.1
Е-М ш	2.3		293.2	601.4	7.3	220.9	41.9	60.0	184.9		1411.7
Е-С м	45.0	5.3	1.9	301.9	152.1	9.4			0.1		515.6
Е-С м-ш	0.2	0.2	0.3	87.4	49.6	15.6		0.4			153.5
С ш	1.6		49.6	80.6	94.8	146.4	13.7	3.7	0.7		391.1
Д ш	0.6	0.6	2.7	1.2		0.9	16.8	1.4	0.2		24.5
Лп ш	65.3	87.2	42.8	5.9	8.9	15.9	63.8	45.5	20.7		356.0
Б ш	110.7	86.8	276.4	353.9	122.0	126.4	877.2	168.7	653.6		2775.6
М-Ш ш		1.0	4.0	0.5		1.8	55.9	8.8	14.7		86.6
Б разн	164.9	1436.7	93.6	72.7	104.2	36.2	404.4	231.9	128.0		2672.6
Ос ш	74.3	23.0	197.6	159.8	9.9	115.1	1113.6	264.2	76.8		2034.1
Олс вл	1307.9	493.3	34.7	29.9	19.3	16.1	17.3	47.5	4.2		1970.1
S общ., га	2833.1	2704.1	1807.2	10455.9	1235.2	2843.8	2858.1	1053.5	1410.0		27201

Примечание. Обозначения см. табл. 1 и 3, а также перечень синтаксонов. В ячейках пусто при отсутствии пространственного пересечения синтаксонов двух классификаций.

широкотравных лесов, выделенных по эколого-фитоценотической классификации, то они в значительной степени перекрываются с субассоциацией *Quercus-Tilietum caricetosum pilosae*, что может быть связано со смешанным составом древостоя данного эколого-флористического синтаксона и присутствием в нем осины с небольшим обилием. Наибольшее перекрытие *Quercus-Tilietum caricetosum pilosae var. Populus tremula* наблюдается все же с осиновыми широколиственными лесами. Сообщество *Betula pendula-Corylus avellana*, которое очень разнородно по входящим в него сообществам эколого-фитоценотических синтаксонов, встречается в равной доле на территории распространения елово-мелколиственных, некоторых еловых и мелколиственных групп ассоциаций. Таким образом, и на основе картографического анализа подтверждена разнородность этого синтаксона.

В обеих картографических моделях есть класс, существенно преобладающий по площади, причем для обеих классификаций его содержание схоже. В эколого-флористической классификации это *Rhodobryo-Piceetum caricetosum pilosae var. Athyrium filix-femina*, а в эколого-фитоценотической – еловые мелкотравно-широкотравные леса.

В пространственном отношении эти единицы хорошо совпадают, при этом решающую роль здесь играет их широкое распространение. Обращает на себя внимание, что присутствие сообществ, отнесенных к *RP_af*, имеет место и в некоторых других эколого-фитоценотических классах, преимущественно с елью, иногда с березой.

Учитывая разный объем и содержание выделенных синтаксонов по сравниваемым классификационным подходам и как следствие существенные различия обучающей выборки, мы не можем ожидать значительного совпадения пространственного расположения для большинства выделенных единиц. Однако в случае совпадения двух единиц разных классификаций по содержанию наблюдается достаточно хорошее пространственное соответствие.

Заключение. Использование эколого-фитоценотической классификации лесной растительности с уточненными признаками классифицируемых объектов, а также более детальных категорий для синтаксонов эколого-флористической классификации с частичным учетом формационного состава позволило достаточно полно оценить типологическое разнообразие территории. Высокая точность группировки описаний с применением

обоих классификационных подходов подтверждена статистическими методами. Относительное качество дискриминантного анализа выделенных единиц по присутствию и обилию видов в рамках эколого-фитоценотической классификации – 78.9%. Качество классификации эколого-флористических синтаксонов выше, чем у единиц эколого-фитоценотической классификации, и составляет 87.1%.

Результатом пространственного отображения разнообразия лесного покрова явились карты лесной растительности юго-западной части Московской области, созданные с использованием двух классификационных подходов. Карты разработаны на основе получения вероятностно-статистических моделей связи выделенных синтаксонов с изменчивостью свойств местообитаний по признакам спектральных характеристик и морфометрическим характеристикам рельефа. Точность карт распределения эколого-фитоценотических классов была выше (78.6%), чем эколого-флористических классов (69.7%). В обоих случаях значимыми переменными для разделения классов выступали яркости каналов: ближнего инфракрасного, отвечающего за интенсивность процесса фотосинтеза; среднего инфракрасного (SWIR2), чувствительного к содержанию влаги в экосистемах; голубого. Роль ландшафтных условий подтверждена значимой связью распределения лесных сообществ с одной из морфометрических характеристик рельефа – высотой над уровнем моря. Большая величина дисперсии учтенной первой дискриминантной функции при анализе эколого-фитоценотических классов (65.7%) по сравнению с эколого-флористическими классами (48.7%) говорит о лучшей разделимости синтаксонов, выделенных по спектральным характеристикам и морфометрическим переменным в рамках первого подхода. Также об этом свидетельствует более высокое качество воспроизведения эколого-фитоценотических классов, как общее (78.6 против 69.7%), так и по группам, по сравнению с эколого-флористическими классами. Это связано с меньшей однородностью состава древостоя единиц эколого-флористической классификации, поскольку они включали сообщества разного формационного состава, что в целом понижало относительное качество ПДА. Проверка картографической модели на основе эколого-фитоценотической классификации по данным независимой выборки описаний показала точность 78%.

На основе картографического анализа проанализировано пространственное соотношение тематических классов двух карт. При совпадении

содержания синтаксонов, выделенных с использованием разных подходов по входящим в них сообществам, наблюдается хорошее пространственное соответствие представляющих их тематических классов. При этом с большей точностью воспроизводятся единицы эколого-фитоценотической классификации, поскольку они отражают актуальное состояние растительных сообществ на определенной сукцессионной стадии развития, в то время как единицы эколого-флористической классификации скорее дают представление о потенциально возможном составе растительности, свойственном данному местообитанию. Большой объем основных синтаксонов эколого-флористической классификации (ассоциаций и субассоциаций) при крупномасштабном картографировании позволяет отслеживать общие закономерности распределения растительности, более содержательные в средне- и мелко-масштабном выполнении. Оба классификационных подхода в целом имеют высокую точность и могут быть успешно использованы при анализе состава лесной растительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анненская Г.Н., Жучкова В.К., Калинина В.Р., Мамай И.И., Низовцев В.А., Хрусталева М.А., Цесельчук Ю.Н.* Ландшафты Московской области и их современное состояние. Смоленск: Изд-во Смоленского гуманитарного университета, 1997. 296 с.
- Заугольнова Л.Б., Морозова О.В.* Типология и классификация лесов Европейской России: методические подходы и возможности их реализации // Лесоведение. 2006. № 1. С. 34–48.
- Ильинская С.А., Матвеева А.А., Речан С.П., Казанцева Т.Н., Орлова М.А.* Типы леса // Леса Западного Подмосковья. М.: Наука, 1982. С. 20–149.
- Клекка У.Р.* Дискриминантный анализ // Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1989. С. 78–137.
- Козлов Д.Н.* Инвентаризация ландшафтного покрова методами пространственного анализа для целей ландшафтного планирования // Ландшафтное планирование: общие основания, методология, технология: Труды междунар. школы-конф. “Ландшафтное планирование”. М.: Географический факультет МГУ, 2006. 280 с.
- Козлов Д.Н., Пузаченко М.Ю., Федяева М.В., Пузаченко Ю.Г.* Отображение пространственного варьирования свойств ландшафтного покрова на основе дистанционной информации и цифровой модели рельефа // Известия РАН. Сер. геогр., 2008, № 4. С. 112–124.
- Комарова А.Ф.* Разнообразие темнохвойных лесов Северо-Западного Кавказа и закономерности их пространственного распределения: Автореф. дисс. ... канд.

- биол. наук (спец. 03.02.01). М.: Московский гос. университет, 2017. 22 с.
- Кренке А.Н.* Отображение факторов формирования компонентов ландшафта на основе тематических карт, дистанционной информации и трехмерной модели рельефа: Автореф. дисс. ... канд. географ. наук (спец. 25.00.23). М.: Институт географии РАН, 2011. 27 с.
- Мальшева Н.В.* Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений лесных насаждений. М.: Изд-во Московского гос. университета леса, 2012. 154 с.
- Морозова О.В., Тихонова Е.В.* Дифференциация лесных сообществ юго-западной части Московской области // Изв. Самарского НЦ РАН. 2012. Т. 14. № 1 (4). С. 1073–1077.
- Нешатаева В.Ю., Демьянов В.А.* Лесная растительность Полярного Урала в верхнем течении реки Сось // Ботанический журнал, 2002. Т. 87. № 5. С. 90–109.
- Попов С.Ю.* Опыт создания геоботанической карты методом дискриминантного анализа полевых и дистанционных данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 25–35.
- Порфирьев В.С.* О применении понятий серии и цикла при изучении хвойно-широколиственных лесов // Бюл. МОИП. Отд. биол. 1960. Вып. 3. С. 93–99.
- Пузаченко М.Ю., Черненко Т.В.* Определение факторов пространственного варьирования растительного покрова с использованием ДДЗ, ЦМР и полевых данных на примере центральной части Мурманской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 167–191.
- Пузаченко М.Ю., Пузаченко Ю.Г., Козлов Д.Н., Федяева М.В.* Картографирование мощности органогенного и гумусового горизонтов лесных почв и болот южнотаежного ландшафта (юго-запад Валдайской возвышенности) на основе трехмерной модели рельефа и дистанционной информации (Landsat 7) // Исследование Земли из космоса. 2006. № 4. С. 1–9.
- Пузаченко Ю.Г.* Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: АСАДЕМА, 2004. 416 с.
- Пузаченко Ю.Г., Сандлерский Р.Б., Кренке А.Н., Пузаченко М.Ю.* Мультиспектральная дистанционная информация в исследовании лесов // Лесоведение. 2014. № 5. С. 13–29.
- Савельева Л.И.* Типы хвойных лесов Подмосковья // Динамика хвойных лесов Подмосковья. М.: Наука, 2000. 221 с.
- Соколов С.Я.* Таксономия лесных ассоциаций // Проблемы ботаники. 1962. Т. 6. С. 36–42.
- Тюрин В.В., Шеглов С.Н.* Дискриминантный анализ в биологии. Краснодар: Кубанский гос. университет, 2015. 126 с.
- Ценофонд лесов Европейской России. <http://cepl.rssi.ru/bio/flora/main.htm>. Дата обращения 12.12.2017.
- Черненко Т.В., Морозова О.В.* Классификация и картографирование типологического разнообразия лесов // Лесоведение. 2017. № 4. С. 243–255.
- Черненко Т.В., Левицкая Н.Н., Козлов Д.Н., Тихонова Е.В., Огуреева Г.Н., Пестерова О.А.* Оценка состояния и динамики биоразнообразия лесов с использованием наземных и дистанционных методов на примере Московской области // Разнообразие и мониторинг лесных экосистем России / Под ред. А.С. Исаева. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. Т. 1. С. 316–370.
- Черненко Т.В., Морозова О.В., Пузаченко М.Ю., Попов С.Ю., Беляева Н.Г.* Состав и структура еловых лесов юго-западного Подмосковья // Лесоведение. 2015. № 5. С. 323–338.
- Braun-Blanquet J.* Pflanzensoziologie. 3. Aufl. Wien; N.-Y. 1964. 865 S.
- Chernenkova T.V., Puzachenko M.Yu., Morozova O.V., Ogureeva G.N., Kuperman R.G.* An approach for mapping Northern Fennoscandian forests at different scales // Botanica Pacifica. 2015. V. 4. № 1. P. 1–10.
- Hennekens S.M.* TURBO(VEG). Software package for input, processing and presentation of phytosociological data. User's guide. Lancaster: IBN-DLO Wageningen, University of Lancaster. 1996. 59 p.
- Hill M.O.* TWINSpan: a FORTRAN program for arranging multivariate data in ordered two-way table classification of the individuals and attributes. N.-Y.: Cornell University Ithaca. 1979. 48 p.
- Tichý L.* JUICE, software for vegetation classification // Journal of Vegetation Science. 2002. V. 13. P. 451–453.
- Westhoff V., van der Maarel E.* The Braun-Blanquet approach // Handbook of Vegetation Science. 1973. V. 5. P. 617–726.

Comparing Eco-Phytocoenotic and Eco-Floristic Methods of Classification to Estimate Coenotic Diversity and to Map Forest Vegetation

N. G. Belyaeva¹, T. V. Chernen'kova¹, O. V. Morozova^{1,2}, R. B. Sandlerkii³, M. V. Arkhipova⁴

¹Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences
Profsoyuznaya st. 84/32 bldg. 14, Moscow, 117997, Russia
E-mail: n.vin@mail.ru

²Institute of Geography, Russian Academy of Sciences
Staromonetny ln. 29, Moscow, 119017, Russia

³Severtsov institute of ecology and evolution, Russian Academy of Sciences
Leninsky ave. 33, Moscow, 119071, Russia

⁴Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Science
Ulansky ln. 13 bldg. 2, Moscow, 101000, Russia

Received 28 June 2017

Coenotic diversity of forests was assessed using data of field studies, remote sensing (Landsat-5 TM, Landsat-8 OLI and TIRS) and digital elevation models. The study area of $51.5 \cdot 10^3$ ha was located in southwestern Moscow Oblast. Forest communities were classified using two different methods: eco-phytocoenotic and eco-floristic. We recognized 15 eco-phytocoenotic syntaxons at groups of associations level, and 9 eco-floristic syntaxons. Accuracy of grouping of field documentation was supported statistically for every approach to classification. Quality of classification was evaluated for representation and abundance of species by step-wise discriminant analysis. It was higher for eco-floristic syntaxons (87.1%) than for eco-phytocoenotic ones (78.9%). Adjustment of composition and names of syntaxons of eco-phytocoenotic classification ensured compliance of typological and mapping units. Quality of prediction of syntaxons recognized from pixel brightness and topographic variables was 78.6%. Quality of discriminant analysis of recognized syntaxons of eco-phytocoenotic model showed lower accuracy of mapping (69.7%). We developed largescale maps of forest vegetation based on both classifications. We showed that representations of eco-phytocoenotic units have higher accuracy. These units correspond to recent state of plant communities at their actual succession stage. On the other hand, eco-floristic units provide insight of a potential vegetation composition of habitat. Large amount of syntaxons of eco-floristic classification (associations and sub-associations) allowed tracing general patterns of vegetation on large-scale maps. This feature could be more informative in medium- to small scale mapping.

Keywords: mixed forests, remote sensing, eco-phytocoenotic and eco-floristic classifications, discriminant analysis, mapping.

Acknowledgements: This study was conducted in the framework of the State Appointment to the Center of forest ecology and productivity of the Russian Academy of sciences "The concept of remote sensing of health and dynamics of forest ecosystems" (project 0110-2014-0001). It was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research: study of coenotic diversity of forests of East-European Plain (grant 16-05-0014216), study of ecology of forest communities (grant 16-35-00562 mol_a),— and by Russian Scientific Foundation (grant 17-77-10135) for processing of remote sensing data.

REFERENCES

- Annenskaya G.N., Zhuchkova V.K., Kalinina V.R., Maimai I.I., Nizovtsev V.A., Khrustaleva M.A., Tsel'chuk Y.N., *Landshafty Moskovskoi oblasti i ikh sovremennoe sostoyanie* (Landscapes of Moscow Oblast and the current state), Smolensk: Izd-vo SGU, 1997, 296 p.
- Braun-Blanquet J., *Pflanzensoziologie: Grundzüge der Vegetationskunde*, Wien: Springer-Verlag, 1964, 866 p.
- Chernen'kova T.V., Levitskaya N.N., Kozlov D.N., Tikhonova E.V., Ogureeva G.N., Pesterova O.A., Otsenka sostoyaniya i dinamiki bioraznoobraziya lesov s ispol'zovaniem nazemnykh i distantsionnykh metodov na primere Moskovskoi oblasti (Assessment of health and biodiversity of forests with on-ground and remote sensing methods (case study of Moscow Oblast)), In: *Raznoobraziye i dinamika lesnykh ekosistem Rossii* (Diversity and dynamics of forest ecosystems in Russia) Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2012, Vol. 1, pp. 316–370 (460 p.).
- Chernen'kova T.V., Morozova O.V., *Klassifikatsiya i kartografirovaniye tipologicheskogo raznoobraziya lesov* (Classification and mapping of coenotic diversity of forests), *Lesovedenie*, 2017, No. 4, pp. 243–255.
- Chernen'kova T.V., Morozova O.V., Puzachenko M.Y., Popov S.Y., Belyaeva N.G., Composition and structure of spruce forests of the southwestern part of Moscow region, *Contemporary problems of ecology*, 2016, Vol. 9, No. 7, pp. 820–833.
- Chernenkova T.V., Puzachenko M.Y., Morozova O.V., Ogureeva G.N., Kuperman R.G., An approach for mapping Northern Fennoscandian forests at different scales, *Botanica Pacifica*, 2015, Vol. 4, No. 1, DOI: 10.17581/bp.2015.04106
- Hennekens S.M., *TURBO(VEG). Software package for input, processing and presentation of phytosociological data.*

User's guide., Wageningen – Lancaster: IBN-DLO, Lancaster University, 1996, 59 p.

Hill M.O., *TWINSPAN: a FORTRAN program for arranging multivariate data in ordered two-way table classification of the individuals and attributes*, Ithaca: Cornell University, 1979, 48 p.

<http://cepl.rssi.ru/bio/flora/main.htm>, (12 December 2017).

Il'inskaya S.A., Matveeva A.A., Rechan S.P., Orlova M.A., Kazantseva T.N., *Tipy lesa (Forest types)*, In: *Lesa zapadnogo Podmoskov'ya* Moscow: Nauka, 1982, pp. 20–150 (236 p.).

Klecka W.R., *Discriminant analysis (Factor, discriminant and cluster analysis)*, In: *Faktornyi, diskriminantnyi i klasternyi analiz* Moscow: Finansy i statistika, 1989, pp. 78–137 (215 p.).

Komarova A.F., *Raznoobrazie temnokhvoynkh lesov Severo-Zapadnogo Kavkaza i zakonmernosti ikh prostranstvennogo raspredeleniya. Avtoref. diss. kand. biol. nauk (Diversity of dark coniferous forests in Northwestern Caucasus: a spatial pattern. Extended abstract of candidate's biol. sci. thesis)*, Moscow: MGU, 2017, 22 p.

Kozlov D.N., *Inventarizatsiya landshaftnogo pokrova metodami prostranstvennogo analiza dlya tselei landshaftnogo planirovaniya (Inventories of landscape cover with the means of spatial analysis for landscape planning)*, *Landscape planning*, Proc. Conf., Moscow, 22–25 August 2006, Moscow: Izd-vo Geograficheskogo fakul'teta MGU, 2006, pp. 117–137.

Kozlov D.N., Puzachenko M.Y., Fedyayeva M.V., Puzachenko Y.G., *Otobrazhenie prostranstvennogo var'irovaniya svoistv landshaftnogo pokrova na osnove distantsionnoi informatsii i tsifrovoi modeli rel'efa (Representation of spatial variations of the landscape cover features based on remote-sensing data and digital elevation model)*, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2008, No. 4, pp. 112–124.

Krenke A.N., *Otobrazhenie faktorov formirovaniya komponentov landshafta na osnove tematicheskikh kart, distantsionnoi informatsii i trekhmernoii modeli rel'efa. Avtoref. diss. kand. geogr. nauk (Depicting of formation factors of landscape components from thematic maps, remote sensing data and 3D elevation model. Extended abstract of candidate's geogr. sci. thesis)*, Moscow: IG RAN, 2011, 27 p.

Malysheva N.V., *Avtomatizirovannoe deshifrirovaniye aerokosmicheskikh izobrazhenii lesnykh nasazhdenii (Automated interpretation of aerospace imagery of the forest stands)*, Moscow: Izd-vo MGUL, 2012, 151 p.

Morozova O.V., Tikhonova E.V., *Differentsiatsiya lesnykh soobshchestv yugo-zapadnoi chasti Moskovskoi oblasti (Differentiation of forest communities in the south-western part of the Moscow region)*, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi Akademii nauk*, 2012, Vol. 14, No. 1–4, pp. 1073–1076.

Neshatayeva V.Y., Dem'yanov V.A., *Lesnaya rastitel'nost' Polyarnogo Urala v verkhnem techenii reki Sob' (Forest vegetation of Polar Urals in upper reaches of Sob River)*, *Botanicheskii zhurnal*, 2002, Vol. 87, No. 5, pp. 90–109.

Popov S.Y., *Opyt sozdaniya geobotanicheskoi karty metodom diskriminantnogo analiza polevykh*

i distantsionnykh dannykh (Experience of creating a geobotanical map using discriminant analysis of field vegetation description and remote sensing data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 25–35.

Porfir'ev V.S., *O primeneniі ponyatii serii i tsikla pri izuchenii khvoino-shirokolistvennykh lesov (Application of sere and cycle terms in studies of mixed forests)*, *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody. Otdel biologicheskii*, 1960, Vol. 65, No. 3, pp. 93–102.

Puzachenko M.Y., Chernenkova T.V., *Opreделение faktorov prostranstvennogo var'irovaniya rastitel'nogo pokrova s ispol'zovaniem DDZ, TSMR i polevykh dannykh na primere tsentral'noi chasti Murmanskoi oblasti (Definition of factors of spatial variation in vegetation using RSD, DEM and field data by example of the central part of Murmansk Region)*, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 167–191.

Puzachenko M.Y., Puzachenko Y.G., Kozlov D.N., Fedyayeva M.V. *Kartografirovaniye moshchnosti organogenogo i gumusovogo gorizontov lesnykh pochv i bolot yuzhnotaezhnogo landshafta (yugo-zapad Valdaiskoi vozvysheynosti) na osnove trekhmernoii modeli rel'efa i distantsionnoi informatsii (Landsat-7) (The mapping of the thickness of organic matter and humus horizons of soils and bogs in the southern taiga (Valdai Hills) on the basis of digital elevation model and remote sensing data (Landsat-7))*, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 4, pp. 70–79.

Puzachenko Y.G., *Matematicheskie metody v ekologicheskikh i geograficheskikh issledovaniyakh (Mathematical methods in ecological and geographical studies)*, Moscow: Akademiya, 2004, 408 p.

Puzachenko Y.G., Sandler'skii R.B., Krenke A.N., Puzachenko M.Y., *Mul'tispektral'naya distantsionnaya informatsiya v issledovanii lesov (Multispectral remote information in forest research)*, *Lesovedenie*, 2014, No. 5, pp. 13–29.

Savel'eva L.I.S., *Tipy khvoynykh lesov Podmoskov'ya (Forest types of Moscow region)*, In: *Dinamika khvoynykh lesov Podmoskov'ya (Coniferous forests dynamics in Moscow Region)*, Moscow: Nauka, 2000, pp. 33–66 (221 p.).

Sokolov S.Y., *Taksonomiya lesnykh assotsiatsii (Taxonomy of forest associations)*, In: *Problemy botaniki (Challenges in botany)* Moscow – Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1962, Vol. 6, pp. 110–123 (421 p.).

Tichý L., JUICE, software for vegetation classification, *Journal of Vegetation Science*, 2002, Vol. 13, No. 3, pp. 451–453.

Tyurin V.V., Shcheglov S.N., *Diskriminantnyi analiz v biologii (Discriminant analysis in biology)*, Krasnodar: Izd-vo KubGU, 2015, 126 p.

Westhoff V., Van Der Maarel E., *The Braun-Blanquet approach*, In: *Handbook of Vegetation Science. Ordination and Classification of Communities* Hague: Springer, 1973, Vol. 5, pp. 617–726 (738 p.).

Zaugol'nova L.B., Morozova O.V., *Tipologiya i klassifikatsiya lesov Evropeiskoi Rossii: metodicheskie podkhody i vozmozhnosti ikh realizatsii (Typology and classification of European Russian forests: Methodological approaches and potentialities of their realization)*, *Lesovedenie*, 2006, No. 1, pp. 34–48.

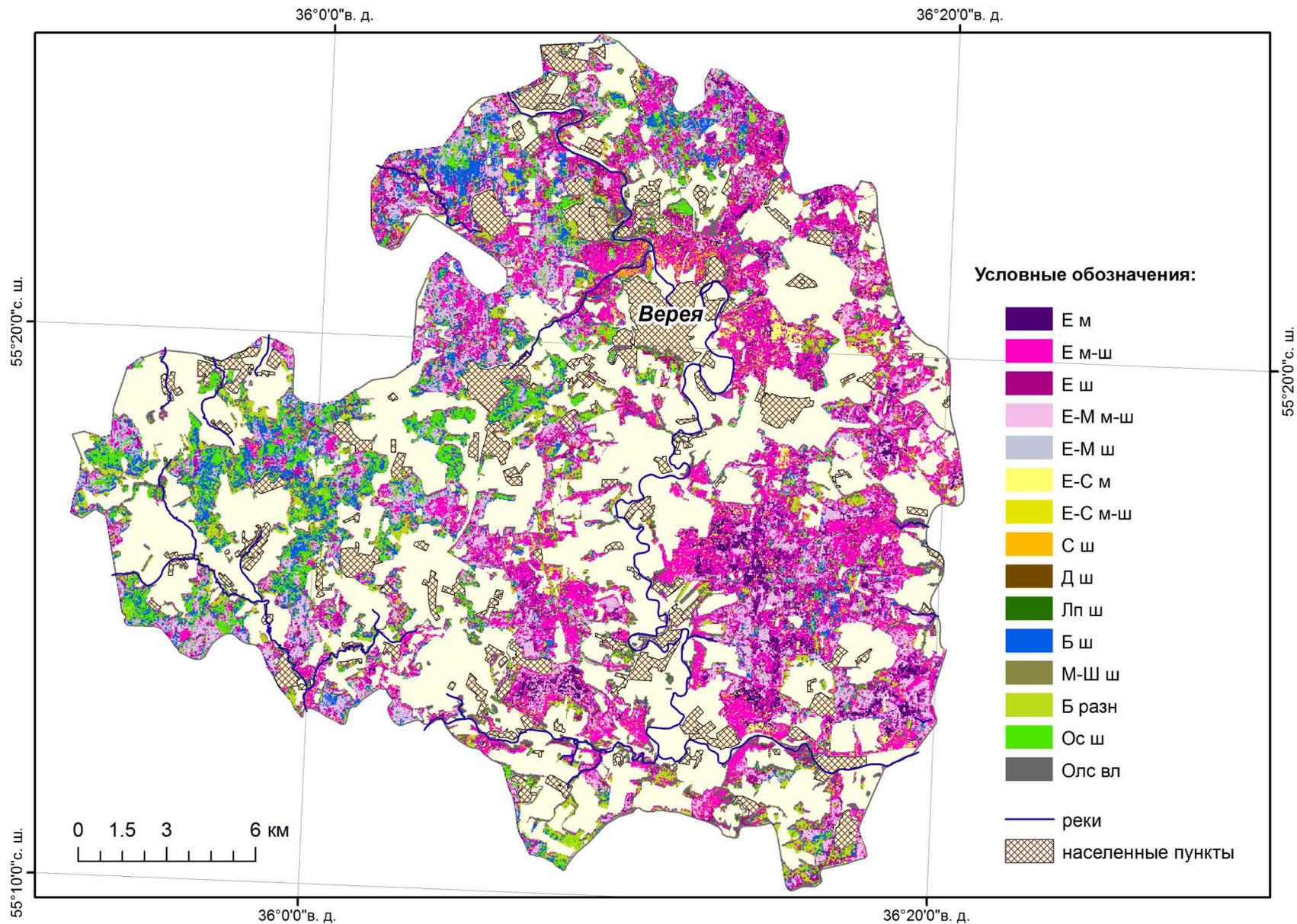


Рис. 2. Карта лесной растительности на основе эколого-фитоценотической классификации. Расшифровку обозначений тематических классов см. в перечне синтаксонов.

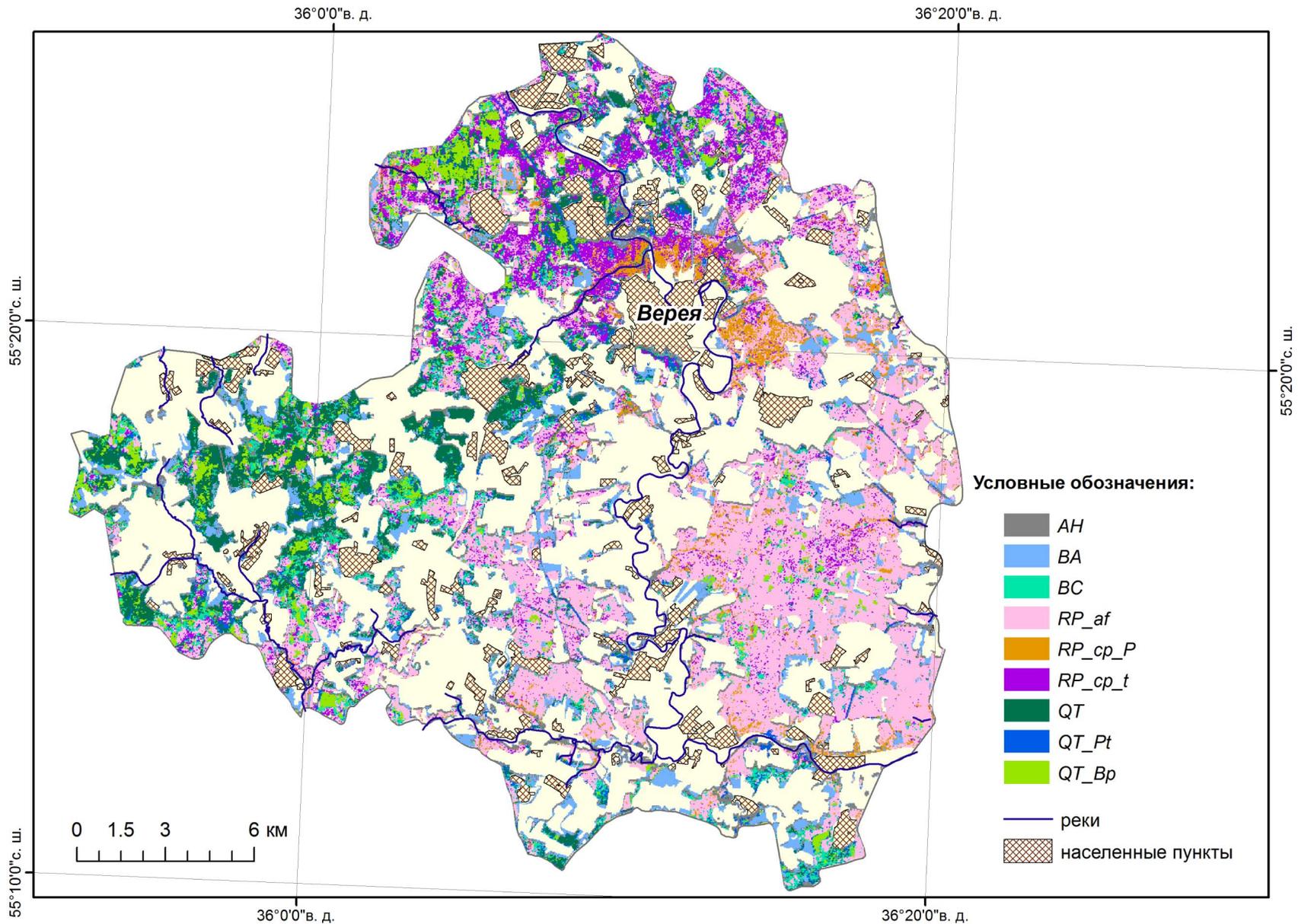


Рис. 3. Карта лесной растительности на основе эколого-флористической классификации. Расшифровку обозначений тематических классов см. в перечне синтаксонов.