Лесоведение. 2006. № 1. с. 70-80.

УДК 634:504.581

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗНООБРАЗИЯ ЛЕСНОГО НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА*

© 2006 г. Л.Г. Ханина[1], М.В. Бобровский[2], А.С. Комаров[2], А.В. Михайлов[2], С.С.Быховец[2], А.М.Лукьянов[2]

[1] Институт математических проблем биологии РАН

142290 Московская обл., г. Пущино, ул. Институтская, 4

[2] Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН

142290 Московская обл., г. Пущино, ул. Институтская, 2

Поступила в редакцию 11.08.2005 г.

Предложен алгоритм моделирования динамики разнообразия живого напочвенного покрова лесных экосистем на уровне лесотаксационного выдела. В основе алгоритма лежит сопряжение информации, полученной на основе данных лесной таксации и геоботанических исследований. Используется система моделей EFIMOD, состоящая из модели древостоя, позволяющей моделировать динамику разновозрастных и смешанных древостоев, модели динамики органического вещества почвы ROMUL, описывающей разложение опада, поступающего на/в почву, динамику азота, доступного для растений, и статистического генератора температуры и влажности почвы SCLISS. Алгоритм реализован в виде программной системы BioCalc и апробирован на модельных территориях для различных сценариев ведения лесного хозяйства. Результаты моделирования представлены в виде серии карт, позволяющих анализировать динамику разнообразия растительности на ландшафтном уровне.

Моделирование лесных экосистем, разнообразие напочвенного покрова, эколого-ценотические группы, типы леса, динамика древостоев, динамика органического вещества почвы

Сохранение и поддержание биоразнообразия является важным критерием устойчивого управления лесами, принятым на международном и национальном уровнях

*Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Научные основы сохранения биоразнообразия России», проектов ИНТАС (01-0633), РФФИ (05-04-49284, 05-04-49289).

[4–6, 28]. Обоснованный выбор оптимальной стратегии ведения лесного хозяйства с учетом принятых критериев и индикаторов невозможен без долгосрочного прогноза, без моделирования динамики всех продукционных и экологических параметров лесных экосистем. При этом использование данных лесной таксации (лесоустройства) в качестве входных параметров является одним из обязательных условий применимости моделей в лесном хозяйстве.

В рамках задачи устойчивого управления лесами оценка биологического разнообразия обычно сводится к оценке числа видов в древостое и наличию подроста и иногда подлеска [6]. Оценка разнообразия напочвенного покрова и его динамики при различных сценариях ведения хозяйства зачастую представляется весьма желательной, но трудновыполнимой задачей. Вместе с тем, в литературе все больше встречается сведений о моделировании растительного покрова как на глобальном уровне [15, 16] в связи с проблемами глобального изменения климата, так и на локальном уровне [21, 22, 27], где ставится задача оценки динамики видового богатства растений в различных типах леса с учетом экологических параметров среды. Цель данной статьи - предложить оригинальный алгоритм моделирования динамики разнообразия напочвенного покрова на уровне лесотаксационного выдела на основе сопряженной динамики древесной растительности и почвенных условий.

Эколого-ценотический подход к оценке разнообразия напочвенного покрова

Мы предлагаем для оценки разнообразия лесных сообществ – видового богатства и структуры напочвенного покрова – использовать представление об эколого–ценотических группах (ЭЦГ) видов растений. Использование ЭЦГ возможно как при одномоментной оценке разнообразия растительного покрова по данным лесной таксации, так и при оценке динамики разнообразия лесных экосистем с применением компьютерных моделей.

Под ЭЦГ мы понимаем группы видов, сходных по отношению к совокупности экологических факторов и приуроченных к сообществам того или иного типа [9, 10]. Для моделирования динамики напочвенного покрова лесных сообществ Центральной России предлагается использовать простейшую систему ЭЦГ из шести следующих групп: Br – бореальная (виды еловых и елово-пихтовых лесов), Nm – неморальная (виды широколиственных лесов), Nt – нитрофильная (виды черноольховых лесов), Pn – боровая (виды сухих боров), Md – лугово-опушечная (виды лугов, опушек) и Wt – водно-болотная (прибрежно-водных и внутриводных местообитаний, низинных и верховых болот).

Впервые анализ растительности по доминирующей в напочвенном покрове ЭЦГ на основе лесотаксационных данных был предложен и апробирован Л.Б. Заугольновой [7].

Затем М.В. Бобровским и Л.Г. Ханиной для расчета параметров разнообразия растительности по данным лесной таксации в качестве базового было предложено использовать понятие «тип леса», принятое как в лесоведении, так и в геоботанике, и задавать тип леса через доминант древостоя и доминирующую ЭЦГ видов напочвенного покрова [1, 23]. Были разработаны алгоритм и методика оценки разнообразия напочвенного покрова для каждого лесотаксационного выдела путем использования технологий баз данных, привлечения баз геоботанических описаний и информации о принадлежности видов растений к ЭЦГ.

Сведения о доминантах древостоя и напочвенного покрова было предложено брать непосредственно из повыдельных лесотаксационных описаний, а принадлежность доминантов напочвенного покрова к ЭЦГ устанавливать в соответствии с базой данных ЭЦГ [24]. Эколого-ценотический подход к типологии растительности позволил использовать единые принципы классификации как лесотаксационных, так и геоботанических описаний. В результате при работе с лесотаксационными данными появилась возможность опосредованно количественно оценить разнообразие напочвенного покрова по геоботаническим данным, относящимся к тому же типу фитоценоза [1]. В целом по лесотаксационным данным, при условии привлечения геоботанической информации, можно определить следующие дополнительные оценки разнообразия растительности на уровне лесотаксационного выдела: 1) доминирующая в напочвенном покрове ЭЦГ; 2) тип леса; 3) уровень видового богатства растительности как отражение показателя видовой насыщенности типа леса (среднее значение или мода числа видов сосудистых растений на единицу площади). Было предложено использовать условную дискретную шкалу видовой насыщенности от 1 до 5, где 1 соответствует наименьшему, а 5 – наибольшему числу видов на единицу площади. Уровни видового богатства для основных типов растительных сообществ задаются на основе анализа региональных геоботанических описаний. Мы используем базу данных геоботанических описаний лесных территорий Европейской России FORUS, которая поддерживается в Институте математических проблем биологии РАН совместно с Центром по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (текущий объем базы данных – более 8000 описаний растительности).

При отсутствии в лесотаксационных описаниях сведений о видах, доминирующих в напочвенном покрове, доминирующую ЭЦГ предложено определять на основе вероятностных региональных таблиц соответствия ЭЦГ и типов условий местопроизрастания (ТУМ по Погребняку – Воробьеву) при различных доминантах древостоя. Такие вероятностные таблицы можно строить путем анализа региональных

лесотаксационных данных, в которых указаны доминанты напочвенного покрова. В этом случае для каждой доминирующей породы (также и при отсутствии древесного яруса) можно рассчитать доли представленности в различных ТУМ выделов с доминированием различных ЭЦГ. Так, например, в таблице приведены проценты выделов с доминированием различных ЭЦГ в пределах основных формаций для каждого ТУМ, отмеченного в лесотаксационных данных Приокско-Террасного заповедника (Московская обл.). Доминанты древостоя и ТУМ являются обязательными параметрами лесоустройства, поэтому наличие региональных вероятностных таблиц «доминант древостоя – ТУМ – ЭЦГ» дает возможность определить вероятность присутствия различных типов леса в тех или иных условиях местопроизрастания по любым лесотаксационным данным.

Процент выделов Приокско-Террасного заповедника с доминированием различных ЭЦГ в напочвенном покрове в пределах каждой формации и ТУМ (по данным таксации 1981 г.)

Тип леса	Типы условий местопроизрастания											
	A1	A2	A3	A4	A5	B2	B3	B4	B5	C2	C3	C4
Сосняки												
неморальные	0	0	0	0	0	4	3	0	50	53	78	0
бореальные	0	36	50	0	0	27	66	0	0	23	10	0
боровые	100	58	50	0	100	68	28	100	50	20	10	0
лугово-опушечные	0	6	0	0	0	1	3	0	0	4	2	0
Ельники												
неморальные	0	0	0	0	0	23	0	0	0	70	70	100
бореальные	0	100	0	0	0	60	90	100	0	18	17	0
боровые	0	0	0	0	0	17	10	0	0	12	13	0
Березняки												
неморальные	0	11	12	0	0	10	12	0	0	65	70	20
бореальные	0	22	75	67	100	20	32	46	100	11	8	8
боровые	0	67	13	0	0	57	41	50	0	15	10	10
нитрофитные	0	0	0	0	0	0	6	4	0	0	4	62
лугово-опушечные	0	0	0	33	0	13	9	0	0	9	8	0
Осинники												
неморальные	0	0	0	0	0	33	60	0	0	84	77	0
бореальные	0	0	0	0	0	34	0	0	0	6	4	0
боровые	0	0	0	0	0	33	40	0	0	10	9	0
нитрофитные	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	10	100

Наличие в лесной таксации сведений о видах напочвенного покрова в настоящее время является обычным для лесных территорий заповедников, национальных парков. При отсутствии в регионе лесотаксационных данных о доминантах напочвенного покрова таблицы «доминант древостоя – ТУМ – ЭЦГ» можно составить на основе геоботанических описаний.

Таким образом, эколого-ценотический подход позволяет принципиально решить проблему оценки разнообразия напочвенного покрова по данным лесной таксации. Для

оценки динамики разнообразия напочвенного покрова при эколого-ценотическом подходе необходимо представлять динамику эколого-ценотических условий, которая может быть задана через динамику древесной растительности и почвенных условий. В связи с этим для прогноза динамики разнообразия напочвенного покрова нами была выбрана система моделей EFIMOD, позволяющая оценивать сопряженную динамику древесной растительности и почвенных параметров.

Система моделей EFIMOD

Система имитационных моделей EFIMOD была разработана для анализа сопряженного описания динамики почвы и растительности в лесных экосистемах. EFIMOD состоит из (1) индивидуально-ориентированной модели древостоя, позволяющей моделировать динамику разновозрастных и смешанных древостоев, (2) модели динамики органического вещества почвы ROMUL, описывающей разложение опада, поступающего на/в почву, и динамику азота, доступного для растений, (3) статистического генератора температуры и влажности почвы SCLISS.

Основная версия модели динамики древостоя EFIMOD детально описана в [17, 26]. Это индивидуально-ориентированная модель с точными позициями деревьев, т.е. имитируемый древостой расположен в ячейках квадратной решетки, клетки которой достаточно малы (0,5 м х 0,5 м), чтобы содержать более одного дерева 10-летнего возраста. Каждое дерево состоит из пяти компонентов (ствол, ветви, листья/хвоя, толстые корни, тонкие корни) и обладает своей собственной зоной питания, зависящей от возраста. Каждое дерево взаимодействует со множеством ближайших деревьев посредством (а) затенения и (б) корневой конкуренции за доступный азот из почвы; прирост дерева зависит от ресурса, находящегося в дефиците (поглощенная радиация или доступный азот). Вследствие стохастического характера входных погодных и почвенных характеристик, включенных в модель, а также случайности начального размещения деревьев в начале моделирования, предусмотрена возможность оценки выходных параметров методом Монте-Карло [3]. Модель описывает круговорот углерода и азота в системе «древостой – почва», включая динамику органического вещества почвы.

Модель динамики органического вещества почвы ROMUL, сопряженная с моделью роста отдельных деревьев через поступающий опад, основана на следующих основных допущениях:

1) разложение органического вещества происходит в результате сукцессионных изменений комплексов организмов-деструкторов, соответствующим используемым в лесном почвоведении типам гумуса – «грубый гумус», «модер» и «мулль»;

2) видовой состав и количество организмов-деструкторов зависит от температуры и влажности почвы и/или подстилки, содержания азота и зольности когорты напочвенного (или внутрипочвенного) опада;

3) скорость минерализации элементов происходит со скоростью минерализации органического вещества, за исключением кинетики азота, которая происходит значительно медленнее и обладает рядом специфических особенностей;

4) минерализованный азот полностью потребляется растениями, избыточный азот иммобилизуется в органическом веществе почвы.

Влияние климатических факторов (температуры и влажности лесной подстилки и собственно почвы) на процессы минерализации и гумификации опада учитывается в модели ROMUL на основе использования генератора почвенного климата SCLISS, который позволяет имитировать среднемесячные показатели этих факторов по известным статистическим характеристикам многолетних данных и пересчитывать стандартные метеоданные в температуру и влажность органических и минеральных горизонтов почвы [2]. Анализ чувствительности и верификация модели ROMUL описаны в [18].

Инициализация модели осуществляется путем оценки начальных значений пулов органического вещества и азота в почве разных типов местообитаний и типов леса [8]. Входными параметрами системы моделей являются: для каждого вида и возрастной когорты (элемента леса) в каждом древостое: средние диаметр и высота, сумма площадей сечений, запас, число деревьев на гектар; пулы углерода и азота лесной подстилки и почвы, включая древесные остатки; среднемесячные температура воздуха и осадки, гидрологические параметры почвы; тип рубок, возраст рубок.

Все данные по элементам леса берутся из данных лесоустройства. Связь с почвенными данными более сложная и требует специальной процедуры калибрации. В основе привязки данных лежит понятие типов леса, для которых почвенные пулы углерода и азота могут быть оценены либо из опубликованных данных, либо с помощью ряда предположений о месте данного типа леса в сукцессионном ряду растительности.

Выходными параметрами системы моделей являются:

1) для каждого вида и возрастной когорты (элемента леса) в каждом древостое: средние диаметр и высота, сумма площадей сечений, запас, число деревьев на гектар;

2) биомасса, углерод и азот в каждом дереве и напочвенном покрове;

3) углерод и азот почвы, включая древесные остатки;

4) биомасса, углерод и азот вырубленной деревесины.

Анализ системы моделей EFIMOD в целом показал, что она чувствительна к температуре воздуха и осадкам, поступлению атмосферного азота из атмосферы, содержанию органического вещества и азота в почве.

Существенной особенностью данной системы моделей является возможность совместного рассмотрения динамики древостоя и пулов органического вещества в почве. Последние условно разделены на лабильный гумус, стабильный гумус, а также органическое вещество лесной подстилки, являющейся непосредственным источником поступления органики на поверхность почвы. Используемый в модели способ простого описания роста дерева с помощью экологических характеристик, так называемых «сильвиков» (silvics), включающих в себя взаимоотношения между деревом и почвой, был предложен О.Г. Чертовым [11, 12, 19, 20]. «Сильвики» описывают видоспецифические характеристики роста и развития дерева. Формализация таких параметров стала возможной на основе данных по биологической продуктивности и эколого-физиологическим характеристикам растений.

Таким образом, модель EFIMOD позволяет моделировать динамику процессов в системе «лес – почва», от которых зависит структура и динамика лесных экосистем. Одновременно она позволяет использовать в качестве входных параметров повыдельные таксационные описания лесов. Все это позволяет использовать ее для моделирования динамики напочвенного покрова лесных экосистем путем последовательного применения эколого-ценотического подхода.

Алгоритм оценки динамики разнообразия напочвенного покрова

Идея количественной оценки динамики разнообразия лесного напочвенного покрова на основе использования модели EFIMOD была высказана нами ранее [25]. Общая схема прогноза динамики разнообразия напочвенного покрова лесных экосистем представлена на рис. 1. Динамику напочвенного покрова с использованием модели EFIMOD предложено оценивать путем модификации доминирующих ЭЦГ по результатам моделирования видовой и возрастной динамики древостоев, количества валежа, почвенного богатства (общее содержание гумуса и азота). Модификация доминирующих ЭЦГ осуществляется путем применения экспертных правил, сформулированных на основе анализа данных экспериментальных исследований – компьютерных и лабораторных экспериментов, полевых наблюдений.

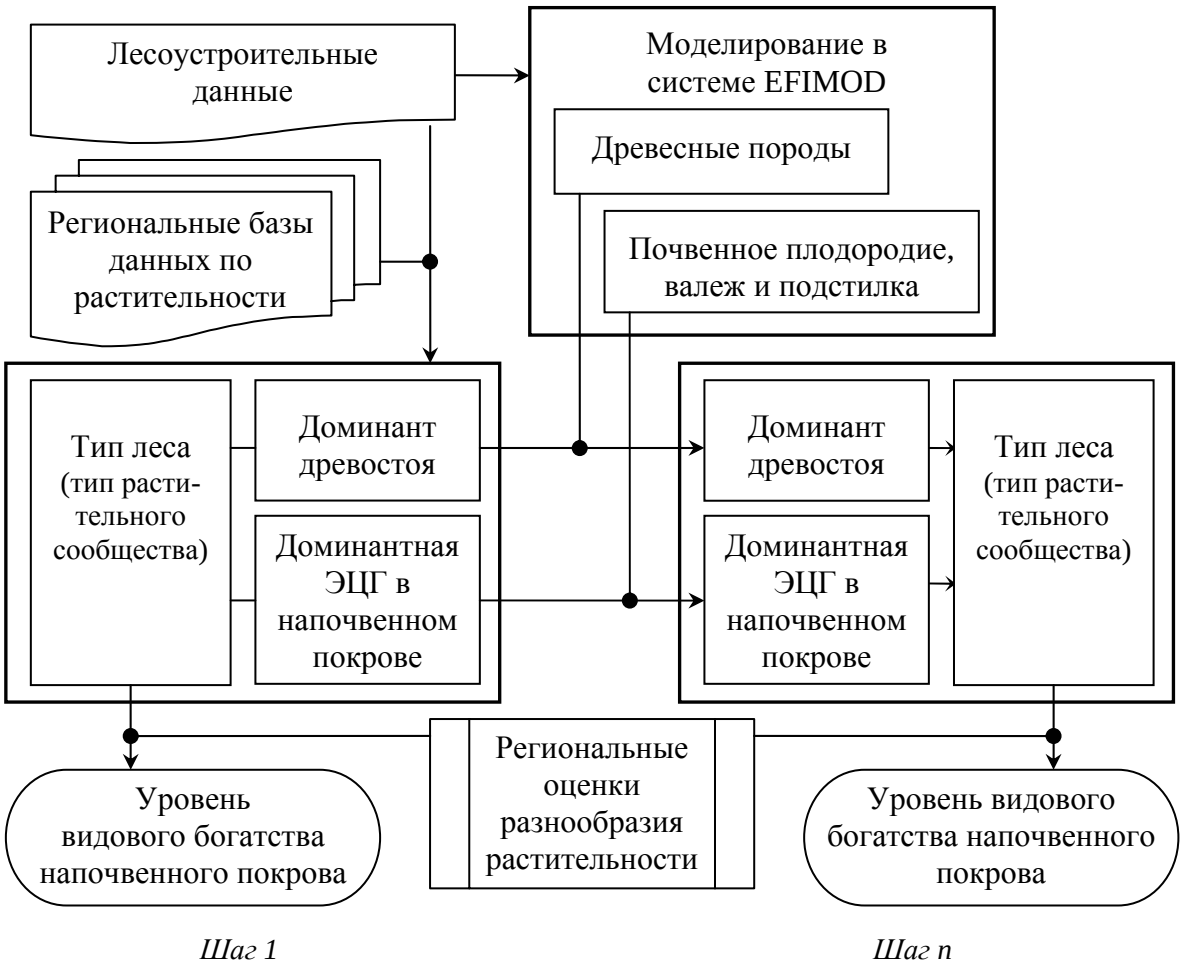

Рис. 1. Схема моделирования динамики разнообразия напочвенного покрова лесных экосистем на основе лесотаксационных данных с использованием модели EFIMOD и геоботанических данных.

Инициализация блока оценки состояния напочвенного покрова и расчета показателей его разнообразия проводится путем присвоения каждому выделу начальных параметров типа леса, определяемых по присутствующим в лесотаксационных данных доминанту древостоя и доминирующей в напочвенном покрове ЭЦГ, либо доминирующую ЭЦГ напочвенного покрова вероятностно присваивают каждому выделу по доминанту древостоя и ТУМ, которые также определяются из входных лесотаксационных параметров.

Далее на каждом следующем шаге моделирования:

1. Модифицируют ЭЦГ предыдущего шага в зависимости от изменения доминанта древостоя и достижения пороговых значений таких параметров, как количество валежа, общее содержание гумуса и азота.

2. По доминанту древостоя и доминирующей ЭЦГ определяют тип леса.

3. Выделу присваивают значение уровня видового разнообразия в баллах, соответствующее типу леса.

Предложенный алгоритм был реализован в программной системе BioCalc. Входные данные BioCalc включают: 1) таблицы вероятностного распределения выделов с различными доминирующими ЭЦГ в напочвенном покрове «доминант древостоя – ТУМ – ЭЦГ»; 2) таблица уровней видового богатства для различных типов леса; 3) таблицу с временными рядами данных по динамике экосистемных параметров по выделам – древостоя, валежа, почвенных характеристик (в качестве данной таблицы нами использовались результаты расчетов модели EFIMOD). Правила модификации ЭЦГ задают в диалоговом режиме, при этом возможен просмотр существующих значений (или их дипазона) временных рядов экосистемных (экспериментальных) данных, используемых в качестве входных данных BioCalc.

Выходные данные BioCalc представляют собой повыдельную динамику следующих параметров: 1) доминирования ЭЦГ в напочвенном покрове, 2) типов леса – сочетания доминантов древостоя и доминирующих ЭЦГ в напочвенном покрове, 3) уровня видового богатства напочвенного покрова. В BioCalc существует возможность в момент расчета непосредственно анализировать изменение числа выделов с доминированием различных ЭЦГ, а также динамику суммарного разнообразия напочвенного покрова (суммы баллов видового богатства всех анализируемых выделов на каждом шаге моделирования). Кроме того, реализована возможность передачи всех расчетных характеристик биоразнообразия в программную систему визуализации пространственно-временных рядов CommonGIS [13, 14], что позволяет непосредственно оценивать и исследовать динамику разнообразия напочвенного покрова в масштабе ландшафта.

Объекты и сценарии моделирования

Предложенный алгоритм и программа BioCalc были опробованы на двух модельных территориях: участке Данковского лес-ва Опытного лесного хозяйства (ОЛХ) «Русский лес» (Московская обл.), граничащего с Приокско-Террасным заповедником, и участке Карьковского лес-ва Мантуровского лесх. (Костромская обл.). Были осуществлены прогоны откалиброванной модели EFIMOD для ключевых участков (104 выдела 4-х кварталов Данковского лес-ва общей площадью 273.4 га; 100 выделов 3-х кварталов Карьковского лес-ва общей площадью 521.5 га) на период 200 лет при заданных постоянных климатических, температурных и водно-физических условиях. Шаг моделирования составлял один год.

Территория Данковского лес-ва по типам условий местообитаний представляет собой в основном свежие боры и субори. Почвы – серые лесные слабоподзолистые с

маломощным гумусовым горизонтом на песках. Для моделирования использовались данные лесоустройства 1990 г. На территории Карьковского лес-ва преобладают влажные субори. Почвы – подзолистые на суглинках. Для моделирования использовали данные лесоустройства 1997 г.

Моделировали динамику напочвенного покрова и изменение параметров биоразнообразия для следующих сценариев лесопользования – заповедание, рубки.

А. Сценарий «заповедание», без проведения каких-либо рубок. Возобновление видов имитировали с интервалом 30 лет (4000 деревьев на гектар) породами смешанного состава. Состав возобновления зависел от типа условий местопроизрастания: при ТУМ А1, А2: 30% сосна, 70% береза; при ТУМ В2, В3, С2, С3, С4: 10% сосна, 25% ель, 30% береза, 20% дуб, 15% липа.

Б. Сценарий «рубки». Имитировали четыре рубки ухода и рубку главного пользования. Возраст рубки зависел от главной породы. Рубка главного пользования – сплошная, порубочные остатки убирались с территории. На следующий год после сплошной рубки имитировали возобновление – 10000 деревьев на гектар, состав возобновления, как и при сценарии А, зависел от типа условий местопроизрастания.

При моделировании во всех сценариях не оценивали влияние ветровалов, болезней, повреждения скотом, насекомыми, а также пожары.

Для апробации алгоритма были заданы простые правила модификации ЭЦГ в напочвенном покрове, основанные на динамике доминантов древостоя и количества валежа: 1) при появлении в древостое в качестве доминанта липы или дуба в напочвенном покрове начинала доминировать неморальная ЭЦГ; 2) при пороговом значении количества валежа I боровая и лугово-опушечная группы менялись на бореальную; 3) при пороговом значении количества валежа II все ЭЦГ менялись на нитрофильную, а при последующем уменьшении этого показателя нитрофильная группа заменялась неморальной. Пороги I и II определяли как доли массы валежа от средней в данном ТУМ массы древостоя. При сценарии «рубки» добавляли лишь одно правило – после проведения рубки доминирующую ЭЦГ выбирали из вероятностной таблицы «доминант древостоя – ТУМ – ЭЦГ» при условии отсутствия древостоя.

Результаты моделирования

Модельная территория Данковского лес-ва ОЛХ «Русский лес» на начальный момент характеризовалась содоминированием в напочвенном покрове бореальной и боровой ЭЦГ (44 и 43% числа выделов соответственно) (Рис. 2, *А*; 3, *А*). При моделировании по сценарию «заповедание» за 200 лет произошла неморализация

напочвенного покрова – выделы с доминированием видов неморальной группы стали составлять 49% от общего числа выделов; бореальная ЭЦГ доминировала в 31% выделов. Важной особенностью явилось исчезновение выделов с доминированием боровой и лугово-опушечной групп и высокий процент выделов с доминированием видов нитрофильной ЭЦГ (20%) (Рис. 2, *А*; 3, *Б*)). При расчете по сценарию «рубки» бореально-боровой характер напочвенного покрова менялся на неморально-бореальный, выделы с доминированием нитрофильной ЭЦГ практически отсутствовали (Рис. 2, *Б*; 3, *В*).

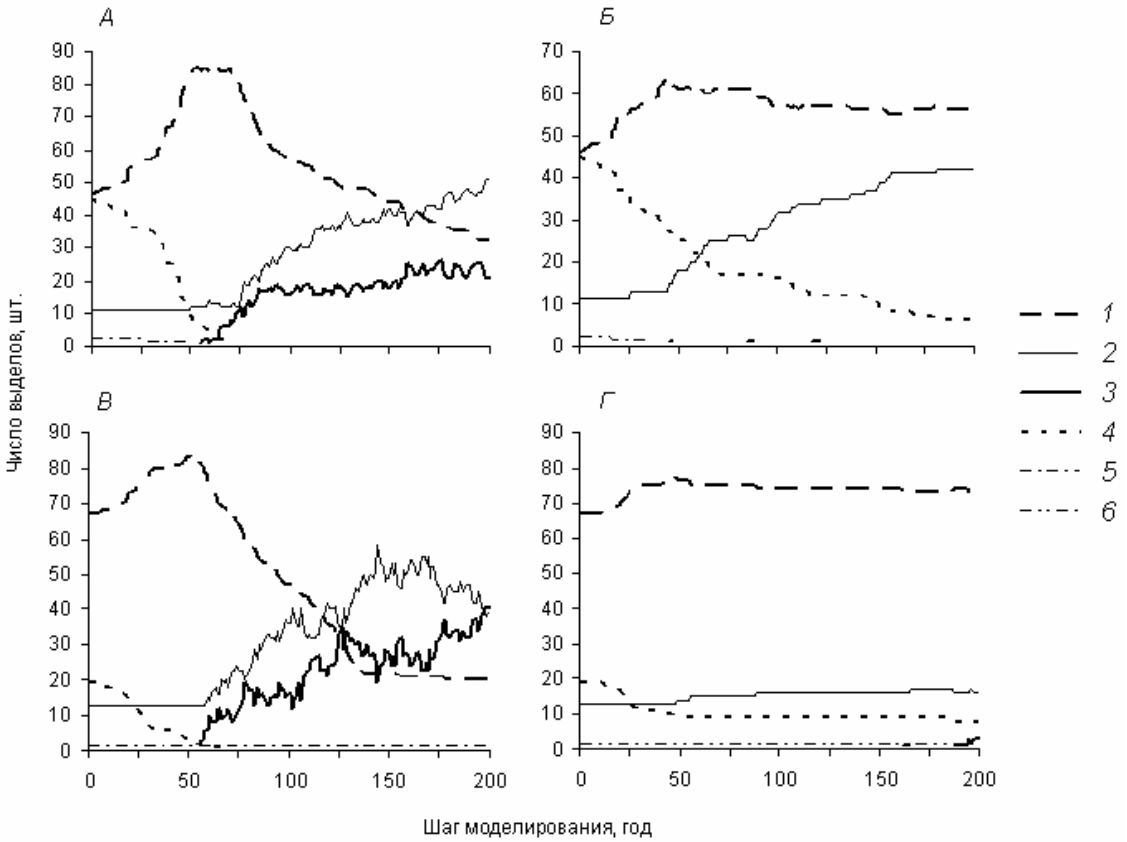

Рис. 2. Изменение соотношения доминирующих эколого-ценотических групп по результатам моделирования ключевых участков Данковского (*А*, *Б*) и Карьковского (*В*, *Г*) лесничеств при сценариях «заповедание» (*А*, *В*) и «рубки» (*Б*, *Г*). Эколого-ценотические группы: *1* – бореальная (Br), *2* – неморальная (Nm), *3* – нитрофильная (Nt), *4* – боровая (Pn), *5* – лугово-опушечная (Md), *6* – водно-болотная (Wt).

Среди типов леса в начальный момент на территории Данковского лес-ва преобладали сосняки боровые (41% выделов) и бореальные (37%). Общее число типов леса составляло девять. При расчете по сценарию заповедания преобладающими типами леса стали сосняки бореальные и дубняки неморальные (27% и 20%), заметную долю составили сосняки неморальные (14%). Интересно, что в режиме заповедания на анализируемой территории формировался комплекс ельников и липняков неморальных, ельников нитрофитных (высокотравных), в целом представляющий собой зональный тип

растительности – хвойно-широколиственный лес с высоким богатством видов теневой флоры.

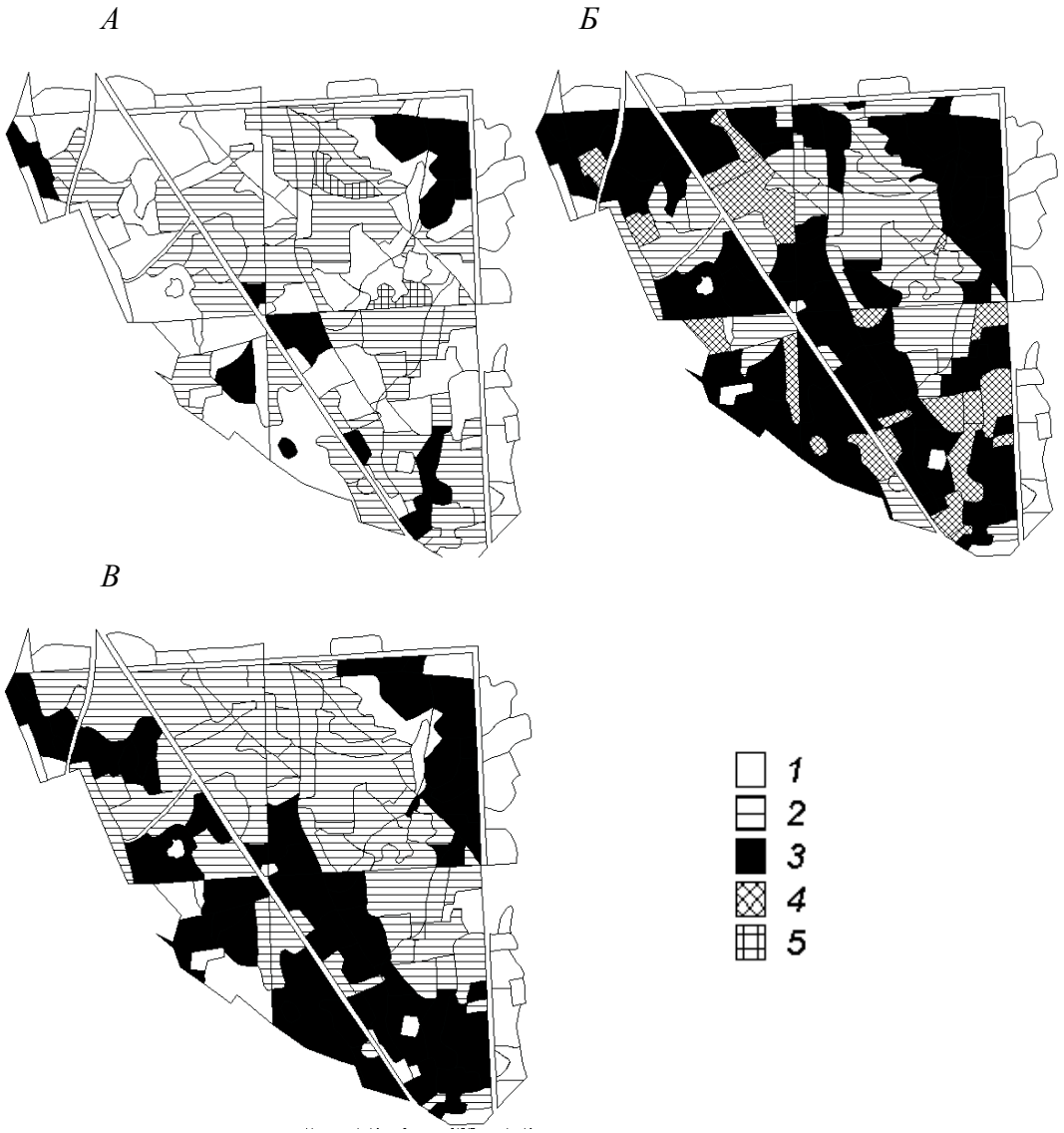

Рис. 3. Динамика эколого-ценотических групп видов растений, доминирующих в напочвенном покрове, по результатам моделирования с использованием модели EFIMOD для ключевых участков (территория ОЛХ «Русский лес»). Эколого-ценотические группы: *1* – бореальная (Br), *2* – неморальная (Nm), *3* – нитрофильная (Nt), *4* – боровая (Pn), *5* – лугово-опушечная (Md). *А* – начальное состояние, *Б* – после 200 лет при сценарии «заповедание», *В* – после 200 лет при сценарии «рубки».

При расчете по сценарию «рубки» увеличилась доля сосняков бореальных (до 38%), также значительную долю составили ельники – неморальные и бореальные (24% и 10%, соответственно). В отличие от сценария заповедания, площадь широколиственных лесов была невелика, ельники нитрофитные на территории не формировались, при этом формировались осинники неморальные. Общее число типов леса при обоих сценариях не менялось.

Уровень видового богатства, оцененный по видовой насыщенности сосудистых растений, изменялся в соответствии с динамикой типов леса (Рис. 4). Вначале преобладали выделы с уровнями богатства 1 и 2 балла (47 и 48% выделов). При

«заповедании» преобладание получили выделы с уровнем богатства 4 балла (56%), при «рубках» – 2 балла (58%). При обоих сценариях разнообразие увеличивалось, однако увеличение уровня видового богатства при сценарии «заповедание» было значительнее, нежели при сценарии «рубки». Суммарный уровень видового богатства увеличился с начальных 180 баллов до 350 и до 280 баллов, соответственно.

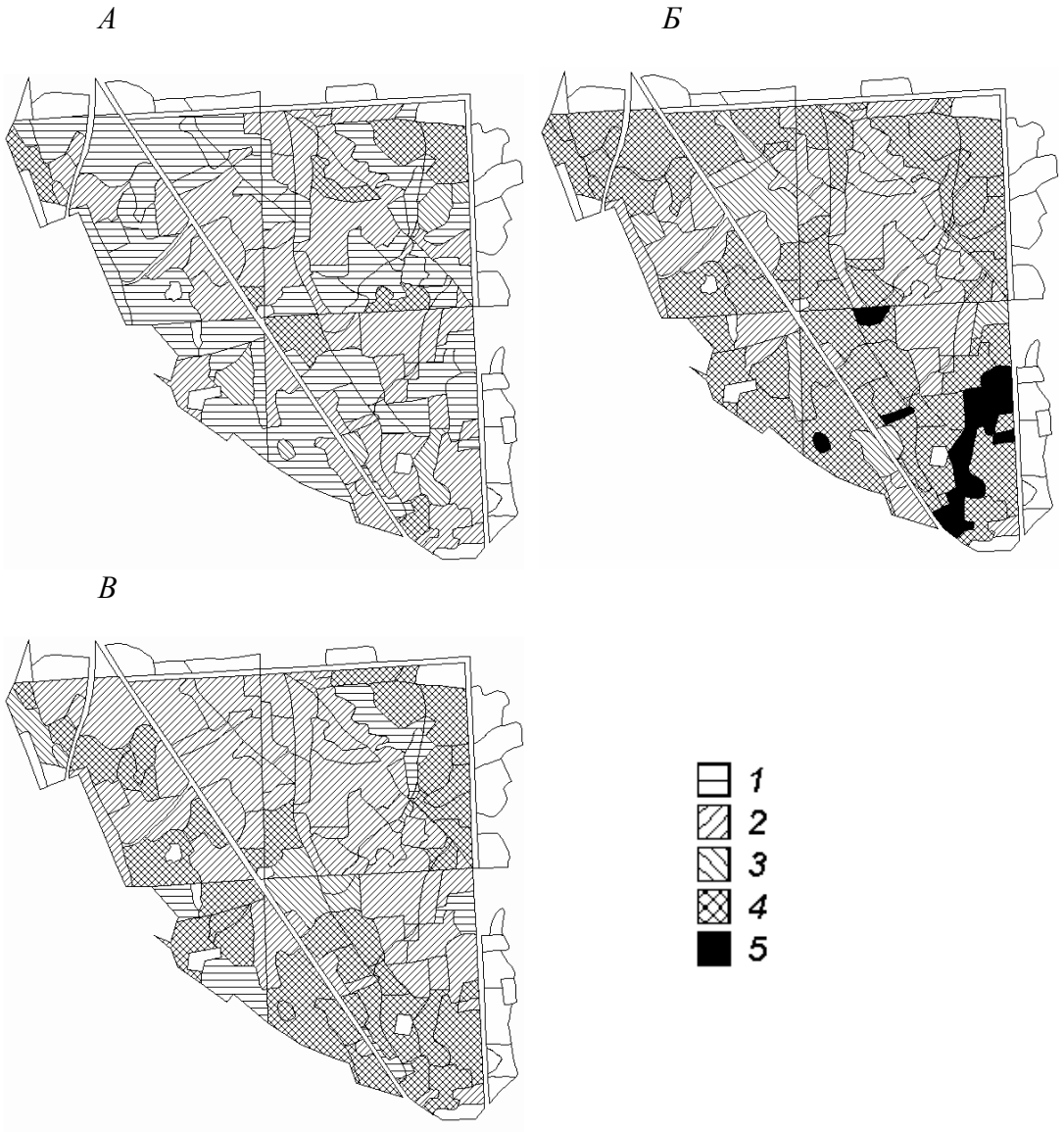

Рис 4. Динамика видовой насыщенности по результатам моделирования с использованием модели EFIMOD для ключевых участков (территория ОЛХ «Русский лес»). *А* – начальное состояние, *Б* – после 200 лет при сценарии «заповедание», *В* – после 200 лет при сценарии «рубки». *1–5* – уровень видовой насыщенности, баллы.

Модельная территория Карьковского лес-ва на начальный момент характеризовалась доминированием в напочвенном покрове бореальной ЭЦГ (67% выделов) (Рис. 2, *В, Г*). При моделировании по сценарию заповедания через 200 лет наблюдалось преобладание выделов с доминированием нитрофильной и неморальной ЭЦГ (40 и 39% соответственно), бореальная ЭЦГ доминировала в 20% выделов. Выделов с доминированием боровой ЭЦГ не осталось (Рис. 2, *В*). При расчете по сценарию «рубки»

распределение выделов по доминированию ЭЦГ слабо изменилось – незначительно увеличилось число выделов с доминированием бореальной, неморальной, нитрофильной ЭЦГ за счет сокращения числа выделов с доминированием боровой ЭЦГ (Рис. 2, *Г*).

Среди типов леса в начальный момент на территории Карьковского лес-ва преобладали ельники бореальные (41% площади), заметную долю составляли сосняки, березняки, осинники бореальные (соответственно 13, 13, 12% выделов), сосняки боровые (13%). Всего на территории было представлено двенадцать типов леса.

При расчете по сценарию «заповедание» господство получили ельники нитрофитные и неморальные (38 и 32%), заметным осталось участие ельников и сосняков бореальные (по 10%). При расчете по сценарию «рубки» увеличилась доля изначально доминировавших ельников бореальных (до 58% выделов), на втором месте по участию остались сосняки бореальные (15%). Общее число типов леса при «заповедании» сократилось до 8, при «рубках» – до 10.

Суммарный уровень видового богатства при сценарии «заповедание» увеличился с начальных 205 до 350 баллов. При сценарии «рубки» суммарный уровень богатства флюктуировал и на конечный момент оказался немного выше начального (220 баллов).

Общие для обоих модельных территорий черты изменения структуры напочвенного покрова, особенно явно проявляющиеся при сценарии «заповедание», – значительное увеличение доминирования неморальной и нитрофильной групп (неморализация и нитрофитизация), исчезновение из числа доминирующих боровой группы. Сходным оказался и характер изменения уровня видового богатства при «заповедании» (увеличение как среднего, так и суммарного уровня примерно в 1.8 раз).

При сценарии «рубки» на обеих территориях в наибольшем числе выделов доминировала бореальная ЭЦГ. Более значительные изменения структуры доминирования ЭЦГ на участке Данковского лес-ва (по сути, приход неморальной ЭЦГ на место боровой) по сравнению с участком Карьковского лес-ва связано с разницей начальных условий (прежде всего, ТУМ). Увеличение уровня видового богатства при «рубках» было заметно меньше, чем при «заповедании», особенно для участка Карьковского лес-ва.

Заключение. Общий результат прогноза сопряженной динамики древостоев, почвы, типов леса и оценок биоразнообразия, основанный на эколого-ценотических группах сосудистых растений, вполне согласуется с теоретическими представлениями и натурными наблюдениями как сукцессионной динамики лесных экосистем, так и последствий лесохозяйственных воздействий [7].

Предложенный подход обладает большими возможностями для дальнейшего развития. Во-первых, возможно более детальное моделирование динамики напочвенного покрова за счет связи ЭЦГ с экосистемными параметрами на основе данных о биоэкологических свойствах видов, входящих в ЭЦГ – требовательности к свету, влажности, богатству почв, приуроченности к различным вариантам субстрата (валеж разных стадий разложения, подстилка различного состава) и др. Во-вторых, возможно принципиальное развитие модели динамики напочвенного покрова как блока системы моделей EFIMOD при переходе к моделированию динамики ЭЦГ внутри выдела с учетом неоднородности среды – освещенности, влажности лесной подстилки, влажности валежа, доступности элементов почвенного питания. Это возможно сделать, проигрывая модель для каждой ячейки квадратной решетки (0,5м х 0,5м). Это увеличит время счета модели, но позволит определять набор ЭЦГ внутри выдела, уменьшит зависимость от точности исходных данных, увеличит чувствительность модели к экологическим и ценотическим параметрам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бобровский М.В., Ханина Л.Г.* Количественная оценка разнообразия растительности на локальном уровне по лесотаксационным данным // Лесоведение. 2004. № 3. С. 28-34.

2. *Быховец С.С., Комаров А.С.* Простой статистический имитатор климата почвы с месячным шагом // Почвоведение. 2002. № 4. С. 443-452.

3. *Ермаков С.М., Михайлов Г.А.* Курс статистического моделирования. Новосибирск: Наука, 1976. 186 с.

4. Критерии и индикаторы для сохранения и устойчивого управления умеренных и бореальных лесов. Монреальский процесс. М.: ВНИИЦлесресурс, 1995. 25 с.

5. Критерии и индикаторы устойчивого управления лесами Российской Федерации. М.: ВНИИЦлесресурс, 1998. 25 с.

6. Национальный доклад Российской Федерации по критериям и индикаторам сохранения и устойчивого управления умеренными и бореальными лесами (Монреальский процесс). М.: ВНИИЛМ, 2003. 84 с.

7. Оценка и сохранения биоразнообразия лесного покрова в заповедниках Европейской России / Под ред. Заугольновой Л.Б. М.: Научный мир, 2000. 196 с.

8. *Работнов Т.А.* Азот в наземных биогеоценозах // Структурно-функциональная организация биогеоценозов. М.: Наука, 1980. С. 69-90.

9. *Смирнов В.Э., Ханина Л.Г., Бобровский М.В.* Обоснование системы эколого-ценотических групп видов растений лесной зоны Европейской России на основе экологических шкал, геоботанических описаний и статистического анализа // Бюлл. МОИП. Сер. Биол. 2006. В печати.

10. *Смирнова О.В., Ханина Л.Г., Смирнов В.Э.* Эколого-ценотические группы в растительном покрове лесного пояса Восточной Европы // Восточно-Европейские леса (история в голоцене и современность). М.: Наука, 2004. Т. 1. С. 165-175.

11. *Чертов О.Г.* Количественный подход к экологическим параметрам видов на примере сосны (*Pinus sylvestris* L., *Pinaceae*) // Ботан. журн. 1983. Т. 68. С. 1318-1324.

12. *Чертов О.Г.* Математическая модель экосистемы одного растения // Журн. общ. биологии. 1983. Т. 44. С. 406-414.

13. *Andrienko G., Andrienko N.* Interactive maps for visual data exploration // Int. J. Geographical Information Science. 1999. № 4. V. 13. P. 355-374.

14. *Andrienko N., Andrienko G., Gatalsky P.* Tools for visual comparison of spatial development scenarios // 7th International Conference on Information Visualization, Proceedings, 16-18 July, 2003, London, UK. Los Alamitos, California: IEEE Computer Society, 2003. P. 237-244.

15. *Bachelet D., Lenihan J.M., Daly C., Neilson R.P., Ojima D.S., Parton W.J.* MC1: a dynamic vegetation model for estimating the distribution of vegetation and associated carbon, nutrients, and water. Technical

documentation. Version 1.0. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-508. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 2001. 95 p.

16. *Bonan G.B., Levis S., Sitch S., Vertenstein M., Oleson K.W.* A dynamic global vegetation model for use with climate models: concepts and description of simulated vegetation dynamics // Global Change Biology. 2003. № 11. V. 9. P. 1543-1566.

17. *Chertov O., Komarov A., Kolström M., Pitkänen S., Strandman H., Zudin S., Kellomäki S.* Modelling the long-term dynamics of populations and communities of trees in boreal forests based on competition on light and nitrogen // Forest Ecology and Management. 2003. № 1-3. V. 176. P. 355-369.

18. *Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.S., Zudin S.L.* ROMUL – a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling // Ecological Modelling. 2001. № 1-3. V. 138. P. 289-308.

19. *Chertov O.G., Komarov A.S., Tsiplianovsky A.M.* A combined simulation model of Scots pine, Norway spruce and Silver birch ecosystems in the European boreal zone // Forest Ecology and Management. 1999. № 1-3. V. 116. P. 189-206.

20. *Chertov O.G., Komarov A.S., Tsiplianovsky A.M.* Simulation of soil organic matter and nitrogen accumulation in Scots pine plantations on bare parent material using forest combined model EFIMOD // Plant and Soil. 1999. № 1-2. V. 213. P. 31-41.

21. *Dumortier M., Butayeb J., Jacquemynb H., Van Campa N., Lusta N., Hermyb M.* Predicting vascular plant species richness of fragmented forests in agricultural landscapes in central Belgium // Forest Ecology and Management. 2000. № 1-2. V. 158. P. 85-102.

22. *Kellomäki S., Väisänen H.* Application of a gap model for the simulation of forest ground vegetation in boreal conditions // Forest Ecology and Management. 1991. № 1-2. V. 42. P. 35-47.

23. *Khanina L.G., Bobrovsky M.V.* A forest type system application for biodiversity estimation at the forestry unit level (the exampe of Central European Russia) // Abstracts of the Int. IUFRO Conf. 'Monitoring and indicators of forest biodiversity in Europe – from ideas to operationality'. Florence, Italy, November 2003. Florence: IUFRO, 2003. P. 42.

24. *Khanina L., Glukhova E., Shovkun M.* Information system on vascular plant species of Central Russia // Тр. ЗИН РАН. СПб., 1999. Т. 278. Информационно-поисковые системы в зоологии и ботанике. С. 62.

25. *Khanina L.G., Bobrovsky M.V., Smirnov V.E., Mikhailov A.V., Komarov A.S., Chertov O.G.* Quantitative assessment of forest biodiversity and dynamic ecosystem modelling // Abstracts of the Int. Conf. 'Decision support for multiple purpose forestry'. Austria, April 2003. Vienna: BOKU, 2003P. 56.

26. *Komarov A.S., Chertov O.G., Zudin S.L., Nadporozhskaya M.A., Mikhailov A.V., Bykhovets S.S., Zudina E.V., Zoubkova E.V.* EFIMOD 2 - a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems // Ecological Modelling. 2003. № 2-3. V. 170. P. 373-392.

27. *Skov F., Svenning J.-C.* Predicting plant species richness in a managed forest // Forest Ecology and Management. 2003. № 1-3. V. 180. P. 583-593.

28. The improved pan-European indicators for sustainable forest management. Proc. of the 4th Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe (MCPFE). Vienna, Austria. 2003. http://www.mcpfe.org/livingforestsummit