

МЕТОДИЧЕСКИЕ
СТАТЬИ

УДК 630*991+631

ДОЛГОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОРОДНО-
ВОЗРАСТНОЙ СТРУКТУРЫ ЛЕСОВ

© 2011 г. Г. Н. Коровин¹, М. Д. Корзухин², О. Б. Бутусов³, А. С. Голованов³

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

² Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН
107258 Москва, ул. Глебовская, 20Б

³ Московский государственный университет инженерной экологии
105066 Москва, ул. Старая Басманная, 21/4
Поступила в редакцию 29.04.2011 г.

Рассматривается концепция долгосрочного прогнозирования породно-возрастной структуры лесов, основанная на математическом моделировании биологических процессов роста и развития насаждений, гибели древостоев в результате деструктивных воздействий природных факторов, их естественной регенерации на временно пустующих лесных землях, а также процессов использования и воспроизводства лесных ресурсов. Приводится схема моделирования динамики лесных экосистем, дается описание интегральной модели естественной и антропогенной динамики породно-возрастной структуры лесов. Описываются входные данные для запуска базового варианта модели, включающие начальные условия, кривые хода роста древостоев и параметры процессов, изменяющих состояние лесов. Предлагаются оценки процессов естественной регенерации древостоев и естественной сукцессии по данным лесоустройства и государственных учетов лесов анализируемых регионов.

Породно-возрастная структура лесов (ПВСЛ), концепция прогнозирования динамики ПВСЛ, естественные нарушения, управляющие воздействия, модели динамики лесных экосистем, интегральная модель динамики ПВСЛ региона.

1. КОНЦЕПЦИЯ ДОЛГОСРОЧНОГО
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ
ПОРОДНО-ВОЗРАСТНОЙ СТРУКТУРЫ
ЛЕСОВ

Целью долгосрочного прогнозирования динамики породно-возрастной структуры лесов является предсказание будущих состояний лесных экосистем, основанное на закономерностях роста и развития древостоев, процессов их гибели и естественной регенерации, а также реакций насаждений на возмущающие (естественные нарушения) и управляющие (хозяйственные мероприятия) воздействия. Долгосрочные прогнозы динамики лесных экосистем призваны служить основой стратегии развития лесного сектора, национальных и региональных лесных планов, ориентированных на максимальное удовлетворение потребностей общества в продуктах и услугах леса, поддержание здоровья и продуктивности

лесных экосистем, оптимизации их вклада в глобальные биосферные циклы [4].

Необходимость долгосрочного прогнозирования динамики лесных экосистем обусловлена большой продолжительностью жизненного цикла деревьев, и, соответственно, характерного времени функционирования лесных экосистем, измеряемого десятками и сотнями лет. Длительность прогнозирования (прогнозный горизонт) должна быть не менее периода полной ротации древостоев или оборота хозяйства в эксплуатационных лесах [5]. Величина этого периода существенно превышает горизонт экономического планирования и позволяет отслеживать последствие естественных нарушений и управляющих воздействий (хозяйственных мероприятий) на каждом этапе прогнозного периода.

Объектом долгосрочного прогнозирования являются лесные экосистемы в границах региона

с относительно однородными природно-климатическими условиями. Таким регионом может быть любая единица административно-территориального деления (лесничество, административный район, субъект Российской Федерации) или районирования лесов (лесной район), доминирующая часть которой расположена в пределах одной лесорастительной зоны.

Породно-возрастная структура лесов характеризуется распределением площади покрытых лесом земель и запасов древесины по преобладающим породам и ступеням (классам) возраста древостоев. Временно пустующим лесным землям приписывается нулевой запас древесины на корню.

Породно-возрастная структура лесов к началу прогнозных расчетов устанавливается по материалам лесоустройства, содержащим детальную информацию о структуре и состоянии лесных экосистем, или по данным государственных учетов лесов, включающим обобщенные сведения о лесных землях и лесной растительности в границах лесничеств (лесхозов) и субъектов Российской Федерации. По материалам лесоустройства породно-возрастная структура лесов устанавливается для каждого типа лесорастительных условий (ТЛУ), а по данным государственных учетов лесов – только для всей совокупности ТЛУ в границах каждого региона.

Динамика породно-возрастной структуры лесов характеризуется изменением во времени площадей преобладающих пород и запасов древесины. При наличии детальной информации о породно-возрастной структуре лесов к началу прогнозных расчетов (по материалам лесоустройства) ее динамика прогнозируется с учетом особенностей лесообразовательных и продукционных процессов в каждом типе лесорастительных условий, а при отсутствии таковой (по данным государственных учетов лесов) – с учетом обобщенных параметров этих процессов.

Динамика породно-возрастной структуры лесов однозначно определяет их **ресурсный потенциал** – максимально допустимый (возможный) объем пользования древесиной и не древесными ресурсами леса при соблюдении экологических и социально-экономических требований устойчивого управления лесами. Эти требования и ограничения базируются на критериях и индикаторах устойчивого лесопользования и принципах экосистемного управления лесами [3].

Динамика породно-возрастной структуры лесов определяет их вклад в глобальные биогеохимические циклы, включая **глобальный углеродный**

цикл и смягчение глобальных изменений климата и природной среды [1].

Динамика породно-возрастной структуры лесов, учитывающая особенности лесообразовательных и продукционных процессов в каждом типе лесорастительных условий, характеризует **динамику экосистемного разнообразия лесов** при различных режимах охраны (защиты), использования и воспроизводства лесных ресурсов.

Долгосрочное прогнозирование динамики породно-возрастной структуры лесов базируется на **математическом моделировании** биологических процессов роста и развития насаждений [6], их гибели в результате деструктивных воздействий природных факторов, естественной регенерации древостоев на временно пустующих (не покрытых лесом) землях, а также процессов использования и воспроизводства лесных ресурсов.

Биологические процессы роста и развития насаждений характеризуются возрастной динамикой удельных запасов древесины и других таксационных показателей древостоев, а так же скоростью и направленностью процессов естественной сукцессии в лесных экосистемах. Они описываются уравнениями (таблицами) хода роста древостоев основных лесообразующих пород и динамическими моделями смены преобладающих пород в процессе естественных сукцессий. Параметры этих процессов определяются типами лесорастительных условий и преобладающими породами древостоев.

Процессы гибели древостоев в результате деструктивных воздействий природных факторов характеризуются структурой и масштабами естественных нарушений, вызванных лесными пожарами, вредными насекомыми и болезнями леса. Они описываются масштабами гибели древостоев и породно-возрастной структурой погибших лесов. Масштабы гибели древостоев определяются уровнем охраны и защиты лесов, а породно-возрастная структура погибших древостоев – породно-возрастной структурой лесов региона.

Процессы естественной регенерации (возобновления) древостоев на пустующих лесных землях характеризуются темпами естественного зарастания этих земель и породной структурой формирующихся на них молодняков естественного происхождения. Они описываются моделями зарастания пустующих лесных земель и породной структуры естественного возобновления. Сроки естественного зарастания и породная структура формирующихся молодняков определяются категорией пустующих лесных земель, типом лесора-

стительных условий и прежней преобладающей породой.

Процессы лесопользования характеризуются объемами, способами и правилами рубок главного пользования (рубок спелых насаждений). Объемы и способы рубок задаются директивно режимом лесопользования или устанавливаются в результате построения допустимых траекторий устойчивого лесопользования при заданных уровнях охраны (защиты) лесов и режимах воспроизводства лесных ресурсов. В зависимости от доступности для рубок главного пользования (рубок спелых насаждений), леса делятся на две категории – эксплуатационные и не эксплуатационные.

Не эксплуатационными считаются леса, где рубки главного пользования юридически запрещены, а также резервные и экономически недоступные (малопродуктивные, удаленные от инфраструктуры) леса. Основными целями ведения лесного хозяйства в не эксплуатационных лесах являются поддержание их продуктивности и выполняемых экологических функций и услуг, формирование разновозрастных древостоев коренных пород.

Эксплуатационными считаются экономически доступные леса, где разрешены рубки главного пользования и проводятся мероприятия по охране и воспроизводству лесных ресурсов. Основными целями ведения хозяйства в эксплуатационных лесах являются обеспечение потребностей общества в лесных ресурсах и формирование требуемой породно-возрастной структуры лесов.

Процессы воспроизводства лесных ресурсов характеризуются способами и масштабами работ по восстановлению лесов на пустующих лесных землях. В общем случае рассматриваются два типа воспроизводства – простое и расширенное. Простое воспроизводство подразумевает сбалансированность темпов изъятия и гибели лесных ресурсов с темпами их восстановления. Оно базируется на использовании естественной регенерационной способности лесных экосистем и проведении мер содействия естественному возобновлению. Лесные культуры назначаются только там, где своевременно не обеспечивается естественное зарастание гарей и вырубок хозяйственно ценными древесными породами.

Расширенное воспроизводство направлено на улучшение породной структуры лесов, повышение их продуктивности и сокращение площади не покрытых лесом лесных земель. Оно базируется на преимущественном использовании лесных

культур, в том числе плантационных. Лесные культуры назначаются в объемах, необходимых для формирования лесов требуемой породной структуры и продуктивности. В качестве базового варианта рассматривается, как правило, существующий в регионе режим воспроизводства лесных ресурсов.

Динамика породно-возрастной структуры лесов определяет их вклад в глобальные биогеохимические циклы, включая глобальный углеродный цикл и смягчение глобальных изменений климата и природной среды.

Математическое моделирование динамики породно-возрастной структуры лесов осуществляется при различных **стратегиях лесопользования**, задаваемых уровнем охраны (защиты) лесов, режимами использования и воспроизводства лесных ресурсов. **Уровень охраны (защиты) лесов** задается составом и масштабами естественных нарушений, **а режимы использования и воспроизводства лесных ресурсов** – составом и масштабами мероприятий по лесопользованию и лесовосстановлению.

2. СХЕМА ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОРОДНО-ВОЗРАСТНОЙ СТРУКТУРЫ ЛЕСОВ

Структура лесных земель и породно-возрастная структура лесов в каждый момент времени определяется как функция их состояния и комплекса внешних воздействий (возмущающих, управляющих) на лесные экосистемы в предыдущий момент (рис. 1). Формально, мы оперируем системой динамических уравнений [7]:

$$S(t + 1) = (S(t), Y(t)),$$

где S – площади насаждений, Y – интенсивности внешних воздействий, t – дискретное время. Эта система уравнений подробно описана в разделе 3.

2.1. Исходная структура лесных земель и породно-возрастная структура лесов к началу прогнозных расчетов

Допускаются два способа представления структуры лесных земель и породно-возрастной структуры лесов:

1) распределением пустующих (не покрытых лесом) лесных земель по их категориям (гари, вырубки и погибшие насаждения) и типам лесорастительных условий, а также распределением покрытых лесом земель и запасов древесины по типам лесорастительных условий, преобладающим породам и возрасту древостоев;



Рис. 1. Схема прогнозирования динамики породно-возрастной структуры лесов.

2) распределением пустующих лесных земель по их категориям, а также распределением покрытых лесом земель и запасов древесины по преобладающим породам и возрасту древостоев.

Первое из указанных распределений строится по материалам лесоустройства [8], а второе – по данным государственных учетов лесов [2, 8].

Под **типом лесорастительных условий** понимается однородный по режиму увлажнения и ресурсам минерального питания тип условий местопроизрастания (ТУМ). **Преобладающей** считается лесобразующая порода, находящаяся в основном ярусе древостоя и имеющая наибольшую долю в общем запасе древесины лесного насаждения. Преобладающая порода является коренной, если она способна формировать устойчивые насаждения, способные при отсутствии внешних воздействий сколь угодно долго произрастать на занятых ими площадях. Древостои, где преобладающей является коренная порода, соответствующая занимаемому типу лесорастительных условий, считаются коренными, а древостои, где преобладающая порода не коренная – производными.

Преобладающая порода древостоя и ТЛУ однозначно определяют **тип леса**. Каждому типу леса соответствует своя траектория роста и развития

древостоев, задаваемая возрастной динамикой удельных запасов древесины, средних высот и средних диаметров древостоев при отсутствии внешних воздействий на лесные экосистемы.

2.2. Биологические процессы роста и старения древостоев

По своему строению древостои делятся на одновозрастные и разновозрастные, простые (одноярусные) и сложные (многоярусные). Одновозрастными считаются древостои, в которых колебания возраста составляющих его деревьев находятся в пределах принятого диапазона (ступени) возраста. Разновозрастные древостои представлены деревьями разных поколений, последовательно сменяющих друг друга в процессе их роста и развития. Устойчивый разновозрастный древостой, породно-возрастная структура которого не изменяется во времени, считается постсукцессионным (климаксовым). Период его существования при отсутствии внешних воздействий может быть сколь угодно большим.

Биологические процессы роста и развития древостоев рассматриваются применительно к четырем последовательным стадиям (рис. 2): (I) естественной регенерации, (II) одновозрастных древостоев, (III) трансформации одновозрастных

древостоев в разновозрастные, (IV) постсукцессионной (стадии климакса).

На *стадии естественной регенерации* происходит зарастание пустующих лесных земель и формирование на них молодняков естественного происхождения. Стадия характеризуется длительностью и породной структурой формирующихся молодняков. Ее длительность определяется интервалом времени с момента образования пустующей площади до перехода её в категорию покрытых лесом земель, а породная структура формирующихся молодняков – долей пустующей площади, зарастающей каждой из преобладающих пород.

Матрицы породной структуры естественного возобновления, базирующиеся на материалах лесоустройства, отражают особенности формирования молодняков на гарях и вырубках с различными типами лесорастительных условий и характеризуют смену преобладающих пород в процессе естественной регенерации древостоев в различных типах лесорастительных условий. Все пустующие лесные земли после их зарастания переводятся в категорию молодняков первой ступени возраста.

На *стадии одновозрастных древостоев* происходит ежегодное увеличение их биологического возраста, накопление удельных (на 1 га) запасов биомассы и изменение основных таксационных показателей древостоев, постепенная смена производных преобладающих пород коренными породами. Стадия одновозрастных древостоев характеризуется ее длительностью, динамикой основных таксационных показателей древостоев, направленностью и скоростью естественной сукцессии насаждений. Длительность стадии одновозрастных древостоев определяется интервалом времени с момента формирования молодняков до достижения ими возраста естественной спелости древостоев коренных пород, а динамика таксационных показателей – кривыми хода роста древостоев, описывающими увеличение удельных запасов, средних высот и диаметров древостоев.

Направленность процессов естественной сукцессии характеризуется сменой производных преобладающих пород коренными породами, а скорость этих процессов – долей площади производных древостоев, переходящих в коренные в единицу времени. Рассматриваются два типа естественных сукцессий: сукцессии, идущие с момента формирования молодняков, и сукцессии, начинающиеся с возраста естественной спелости производных древостоев. Производные древостои, достигшие предельного для них

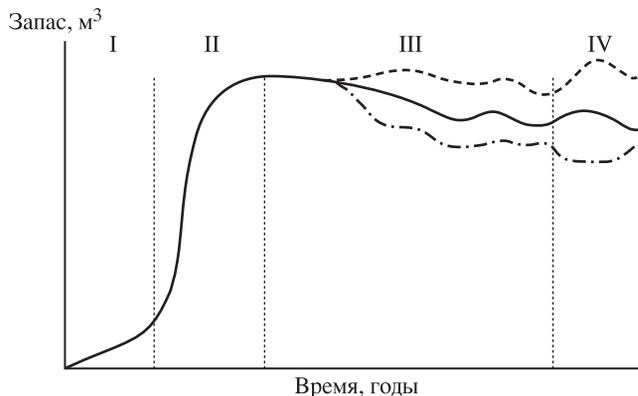


Рис. 2. Стадии роста и развития древостоев при отсутствии внешних воздействий (описание фаз развития I–IV см. в тексте). Возможны колебания запаса в переходном периоде (начиная с фазы III) за счет отмирания перестойных деревьев и последующего воспроизводства. Запас в климаксовой фазе IV меньше, чем у одновозрастных древостоев (конец фазы II).

возраста (предельного возраста жизни деревьев преобладающей породы), переходят в категорию коренных, а коренные древостои, достигшие возраста естественной спелости, переходят в стадию трансформации.

На *стадии трансформации* одновозрастные древостои коренных пород переходят в категорию разновозрастных древостоев. Происходит стабилизация породного состава, удельных запасов биомассы и таксационных показателей разновозрастных древостоев. Стадия трансформации характеризуется ее длительностью и динамикой основных таксационных показателей древостоев.

Длительность стадии трансформации определяется интервалом времени с момента достижения древостоями коренных пород возраста естественной спелости до достижения деревьями коренной породы предельного возраста жизни. Динамика основных таксационных показателей таких древостоев характеризуется приближением величины текущего отпада к величине текущего прироста, снижением участия производных пород в составе древостоя, уменьшением амплитуды колебания удельных запасов древостоев. Основные таксационные показатели разновозрастных древостоев стабилизируются на уровне, соответствующем постсукцессионным (климаксовым) насаждениям.

Постсукцессионная стадия (стадия климакса) соответствует стационарному состоянию древостоев, параметры которых при отсутствии внешних воздействий остаются постоянными в течение сколь угодно длительного времени.

2.3. Естественные нарушения

Естественные нарушения характеризуются масштабами гибели древостоев в результате деструктивных воздействий лесных пожаров, массовых размножений вредных насекомых и болезней леса, а также породно-возрастной структурой нарушенных лесов. Масштабы гибели древостоев задаются площадями гарей и погибших насаждений, а породно-возрастная структура нарушенных лесов – распределением площади гарей и погибших насаждений по преобладающим породам и ступеням возраста древостоев.

Процессы гибели насаждения и образования пустующих лесных земель рассматриваются во всех лесах, эксплуатационных и не эксплуатационных. Всем погибшим древостоям присваивается нулевой возраст, и они переводятся в категорию пустующих лесных земель с последующим естественным или искусственным зарастанием.

Масштабы возмущающих воздействий природных факторов и соответствующих им естественных нарушений рассматриваются в качестве внешних переменных, зависящих от уровня охраны и защиты лесов. *Уровень охраны и защиты лесов* может задаваться в диапазоне от нулевого, соответствующего отсутствию организованной борьбы с естественными нарушениями, до максимального, исключающего возможность гибели древостоев от деструктивных воздействий природных факторов.

За базовый вариант принимается существующий уровень охраны и защиты лесов. Соответствующие ему масштабы естественных нарушений и породно-возрастная структура погибших насаждений устанавливаются по материалам лесоустройства или данных государственных учетов лесов, лесопожарного и лесопатологического мониторинга, а также данных статистической отчетности лесного хозяйства.

2.4. Управляющие воздействия (хозяйственные мероприятия)

Управляющие воздействия (хозяйственные мероприятия) задаются *стратегией управления лесами*, определяющей набор режимов охраны и защиты лесов, использования и воспроизводства лесных ресурсов, отвечающих долгосрочным целям ведения лесного хозяйства. Набор режимов охраны, использования и воспроизводства лесных ресурсов, отвечающих критериям и индикаторам устойчивого управления лесами, рассматривается как стратегия устойчивого лесопользования.

Режим лесопользования характеризуется способами и масштабами изъятия древесных и не древесных ресурсов. До настоящего времени необходимость учета многоцелевого характера лесопользования, как правило, только декларировалась. Основное внимание уделялось тем способам лесопользования, которые оказывают наибольшее влияние на состояние и динамику лесных экосистем – рубкам главного и промежуточного пользования.

Рубки главного пользования (рубки спелых насаждений) проводятся в эксплуатационных лесах, которые по форме ведения хозяйственной деятельности делятся на три категории: со сплошнолесосечной формой хозяйства; с постепенными рубками; с выборочной формой хозяйства.

К фонду сплошнолесосечных рубок без сохранения подроста относятся древостои, где имеющегося жизнеспособного подроста недостаточно для формирования молодняков коренной (хвойной) породы. При проведении таких рубок весь запас древесины изымается в один прием, а пройденные ими площади переводятся в категорию вырубков.

К фонду сплошнолесосечных рубок с сохранением подроста относятся разновозрастные древостои с численностью жизнеспособного подроста, достаточной для формирования молодняков коренной породы. При проведении таких рубок весь запас древесины изымается в один прием, а пройденные ими площади переводятся в категорию хвойных молодняков соответствующей ступени возраста.

К фонду постепенных рубок относятся древостои, где в результате изреживания древесного полога может появиться жизнеспособный подрост коренной породы. Такие рубки проводятся, как правило, в два приема, с первоначальным частичным изъятием древесины и ее полным изъятием при проведении второго приема. После второго приема постепенных рубок все пройденные ими древостои переводятся в категорию молодняков коренной породы. Интервал между первым и вторым приемами постепенных рубок и величина оставляемого (изымаемого) запаса древесины рассматриваются в качестве внешних параметров модели.

Освоение фондов сплошнолесосечных и постепенных рубок начинается с рубки древостоев старшего возраста, а в пределах каждой ступени возраста – с рубки наиболее продуктивных древостоев. Фонд выборочных рубок, проводимых в разновозрастных древостоях, осваивается, начиная с наиболее продуктивных древостоев.

К фонду выборочных рубок относятся разновозрастные древостои хвойных пород. При каждом приеме выборочных рубок изымается определенная доля запаса древесины, обеспечивающая возможность его восстановления к следующему приему рубок. Пройденные такими рубками площади формируют резерв фонда выборочных рубок на период, равный времени восстановления запаса древесины. Динамика породно-возрастной структуры лесов, пройденных выборочными рубками, сводится к восстановлению до очередного приема рубок прежних значений удельных запасов и других таксационных показателей древостоев. Преобладающая порода насаждения остается неизменной, а объемы изымаемой древесины соответствуют величине прироста ее удельных запасов за период между очередными приемами рубок.

К фонду реконструктивных рубок относятся смешанные древостои с преобладанием мягколиственных пород, после изъятия которых, по достижению ими возраста технической спелости, могут сформироваться хвойные насаждения. При проведении таких рубок частично или полностью изымаются запасы древесины лиственных пород, а пройденные реконструктивными рубками древостои переводятся в категорию хвойных соответствующей ступени возраста.

Система экологических и экономических ограничений, обеспечивающих устойчивость лесопользования, может включать в себя: (1) не убывание размеров и не ухудшение структуры лесопользования; (2) не ухудшение породно-возрастной структуры лесов; (3) отсутствие резких колебаний в размерах лесопользования; (4) поддержание экосистемного разнообразия лесов и их вклада в глобальный цикл углерода.

Режим воспроизводства лесных ресурсов задается масштабами создания лесных культур, их породной структурой и продуктивностью (ходом роста лесных культур).

Ход роста лесных культур моделируется кривыми накопления биомассы и возрастной динамики таксационных показателей, аналогичными кривыми хода роста модальных древостоев естественного происхождения. В отличие от древостоев естественного происхождения, лесные культуры не трансформируются в категорию разновозрастных древостоев и не переходят в стационарное состояние. При достижении ими предельного возраста назначаются сплошнолесосечные рубки с последующим лесокультурным освоением вырубков.

Моделирование воспроизводства лесных ресурсов неизбежно связано с введением ограничений

на масштабы и породную структуру создаваемых лесных культур, учитывающих необходимость сохранения биологического разнообразия и устойчивости лесов, их средообразующих и защитных функций. Такого рода ограничения могут включать в себя допустимую долю искусственных насаждений в составе покрытых лесом земель, минимальные площади лесных культур, обеспечивающие сбалансированность темпов использования и воспроизводства лесных ресурсов.

3. ИНТЕГРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ПОРОДНО-ВОЗРАСТНОЙ СТРУКТУРЫ ЛЕСОВ РЕГИОНА

Число публикаций с описанием моделей динамики породно-возрастной структуры весьма невелико, и ссылки обычно даются на руководства для пользователей или на ведомственные разработки, а не журнальные статьи, что объясняется, по-видимому, прикладной ориентацией моделей. В качестве примеров приведем публикации [12, 14–17]. Предлагаемая нами работа в определенной мере восполняет этот пробел, поскольку явно описывает математическую структуру модели.

Любая модель обсуждаемого типа является по существу вариантом возрастно-распределенной демографической модели (напр., [6, 7, 11, 13]), и представляет собой совокупность состояний и переходов между ними, где пространство состояний задается распределением площадей и запасов древесины по преобладающим породам (или типам леса) и ступеням возраста древостоев, а множество переходов определяется протекающими в лесах процессами, приводящими к изменению состояния лесных экосистем.

3.1. Особенности интегральной модели динамики породно-возрастной структуры лесов

Интегральная модель породно-возрастной структуры лесов ориентирована на использование информационного обеспечения, включающего как материалы лесоустройства, так и данные государственных учетов лесов (лесного реестра). По материалам лесоустройства покрытая лесом площадь разбивается на части, каждая из которых считается занятой одним типом леса, задаваемым преобладающей породой и типом лесорастительных условий. По данным государственных учетов лесов (лесного реестра) покрытая лесом площадь делится на части, каждая из которых занята одной и той же преобладающей породой, без учета типов лесорастительных условий.

Прогнозирование породно-возрастной структуры лесов, базирующееся на материалах лесоустройства, содержательнее и корректнее, чем основанное на данных государственных учетов лесов, поскольку учитывает особенности лесообразовательных процессов в каждом типе лесорастительных условий. Такое прогнозирование ограничивается регионами, где лесоустройство проведено на почвенно-типологической основе.

Предлагаемое далее описание не является полностью формализованным, но касается лишь устройства модели динамики породно-возрастной структуры лесов, необходимого для понимания ее работы. При описании модели основной акцент делается на ее модификацию, базирующуюся на данных государственных учетов лесов, более простую и универсальную, чем модификация, базирующаяся на материалах лесоустройства.

Существенным недостатком прогнозирования, базирующегося на данных государственных учетов лесов, является использование параметров продукционных и сукцессионных процессов, а также процессов естественного возобновления, осредненных по всем типам лесорастительных условий. Его основным преимуществом является возможность проведения прогнозных расчетов для любого региона страны.

В зависимости от типов решаемых задач, базирующихся на прогнозе динамики породно-возрастной структуры лесов, за единицу времени принимается десятилетие или год (в тех же единицах измеряется возраст), соответственно, размерности скоростей (частот) переходов – десятилетие⁻¹ или год⁻¹; далее для простоты будем оперировать годами. Единицей площади является гектар, а единицей запаса – м³.

3.2. Пространство состояний лесных экосистем

В модели введены два типа элементарных состояний, одно из которых относится к покрытым лесом (облесенным), а другой – к не покрытым лесом (пустующим) землям.

Пространство состояний пустующих лесных земель, по материалам лесоустройства, определяется числом категорий таких земель, типов лесорастительных условий и диапазоном возрастов гарей, вырубок и погибших древостоев. Пространство состояний пустующих лесных земель, по данным государственных учетов лесов, определяется числом категорий таких земель и диапазоном возрастов гарей, вырубок и погибших древостоев.

Пространство состояний покрытых лесом земель, по материалам лесоустройства, определяется числом типов лесорастительных условий, числом преобладающих пород и диапазоном возрастов древостоев. Пространство состояний покрытых лесом земель, по данным государственных учетов лесов, определяется числом преобладающих пород, возрастов их рубки (естественной спелости) и диапазоном возрастов древостоев.

3.3. Процессы, изменяющие состояния лесных экосистем

Набор процессов, изменяющих состояние лесных экосистем, в базовом варианте модели включает в себя:

- естественные нарушения, задаваемые масштабами гибели насаждений и породно-возрастной структурой погибших древостоев; естественные нарушения приводят к переходу покрытых лесом земель в категории пустующих площадей, условно называемых “гари” (основной фактор гибели);

- рубки главного пользования (рубки спелых древостоев), задаваемые способами рубки (сплошнолесосечные, постепенные, выборочные), их объемами, повторяемостью и интенсивностью; сплошнолесосечные рубки приводят к переходу пройденных ими площадей в категорию пустующих лесных земель (вырубок), постепенные рубки – к формированию благонадежного подроста хозяйственно ценных пород и перехода пройденных ими площадей в категорию молодняков коренных пород первой ступени возраста, выборочные рубки – к формированию изреженных разновозрастных древостоев;

- естественные сукцессии, задаваемые их направленностью ([производная порода] → [коренная порода]) и скоростью протекания; естественные сукцессии приводят к переходу площадей с преобладанием производных, как правило, листовых пород, в площади с преобладанием коренных, как правило, хвойных пород;

- естественная регенерация, задаваемая скоростью зарастания пустующих площадей (гарей и вырубок) и породной структурой формирующихся молодняков естественного происхождения; естественная регенерация обеспечивает переход пустующих площадей в категорию молодняков естественного происхождения;

- искусственное воспроизводство лесов на пустующих лесных землях, задаваемое породной структурой лесных культур и сроками их перевода в покрытые лесом площади; искусственное

воспроизводство приводит к переходу пустующих площадей в категорию молодняков искусственного происхождения;

– оставшиеся площади после описанных выше процессов, переходят в следующее по возрасту и времени состояние (относится к покрытым и не покрытым лесом площадям);

– покрытые лесом площади, достигшие предельного возраста, переходят в климаксное состояние и не изменяются с возрастом (не “стареют”), их величина может уменьшаться только из-за рубок или естественных нарушений, при отсутствии которых может происходить накопление;

– пустующие площади, достигшие возраста, равного длительности их естественного зарастания или смыкания лесных культур, переходят в молодняки первой ступени возраста.

3.4. Формализация состояний и процессов

В соответствии с изложенной выше спецификой модели вводятся переменные и параметры, относящиеся к каждому процессу. Для простоты изложения очевидные индексы по возможности опускаются. “Породой” будет называться преобладающая порода по материалам лесоустройства или данным государственного учета лесов с ее кодом рубки (индекс кода рубки будет опускаться).

Общее число пород равно P ;

t – время, $t = 0 \dots t_{max}$, где t_{max} – максимальное время счета;

a – возраст насаждения;

T_{pmax} – предельный (максимальный) возраст жизни породы p ; вообще говоря, предельный возраст – это параметр модели, в стандартном варианте он ограничен фактическим максимальным возрастом преобладающих пород или двумя классами возраста перестойных древостоев.

Вводятся две группы динамических переменных:

$S_p(t, a)$ – покрытая лесом площадь, занятая преобладающей породой p в момент времени t в возрасте a , га;

$E_p(t, g)$ – пустующая площадь, зарастающая преобладающей породой p в момент времени t в возрасте площади g , га; максимальный возраст пустующей площади равен Q .

Естественная регенерация (воспроизводство) древостоев на пустующих лесных землях описывается двумя (под)моделями: моделью породной структуры естественной регенерации и моделью

сроков естественного зарастания пустующих лесных земель.

Модель породной структуры естественной регенерации. Доминирующая часть площади пустующих лесных земель в большинстве регионов страны приходится на гари и вырубки, поэтому при выполнении прогнозных расчетов можно ограничиться моделированием лесообразовательных процессов на этих категориях земель.

Процессы формирования молодняков на гарях и рубках описываются матрицами породного состава естественной регенерации $\|r_{im}\|$. Величина r_{im} равна доле площади погибшего (вырубленного) насаждения с преобладающей породой m , на которой воспроизводится насаждение с преобладающей породой i . В соответствии с физическим смыслом величин r_{im} , они должны удовлетворять равенствам (следствие сохранения площадей преобладающих пород после нарушения) $r_{i1} + \dots + r_{pi} = 1$ ($i = 1 \dots P$) и неравенствам $0 \leq r_{im} \leq 1$. Таким образом, начальная пустующая площадь, занимаемая породой i , вычисляется как:

$$E_i(t, 1) = \sum r_{im} D_m(t),$$

где D_m – площадь погибших (вырубленных) за год t древостоев с преобладающей породой m .

Модель зарастания пустующих площадей. В базовом варианте используются модели двух видов – ступенчатая или экспоненциальная. В первом случае площадь считается пустующей до возраста Q , и полностью покрытой лесом после этого:

$$\begin{aligned} E(t, g) &= E(t, 0) \text{ при } t \leq Q, \\ &\text{и } E(t, g) = 0 \text{ при } t > Q. \end{aligned} \quad (1a)$$

Во втором случае пустующая площадь уменьшается по закону

$$E(t+1, g+1) = E(t, g)(1-e), \quad (1b)$$

где e – удельная скорость зарастания, год⁻¹, не зависящая от возраста пустующей площади. В обеих моделях заросшая площадь переходит в первую ступень возраста покрытой лесом площади, $S(t, 1)$.

Пустующие площади подразделяются на возникшие после естественных нарушений (“гари”) и рубок (вырубки). Соответственно, переменные $E_p(t, g)$ приобретают дополнительный индекс $v = b$ (гари), и $v = f$ (вырубки) – $E_{pv}(t, g)$. Времена зарастания также различаются: в ступенчатой модели, Q_v , и характерное время зарастания в экспоненциальной, $Q_v = 1/e_v$.

Модель естественных сукцессий. Для описания сукцессий покрытые лесом площади подразделяются на занятые производными и коренными преобладающими породами. Пусть имеется K производных и N коренных пород ($K + N = P$). В базовом варианте модели для каждой производной породы $k = 1 \dots K$ предусмотрены все возможные сукцессионные переходы:

$$\begin{aligned} & [\text{производная порода}]_k \rightarrow \\ & \rightarrow [\text{коренная порода}]_1 \dots [\text{коренная порода}]_N. \end{aligned}$$

Предполагается, что скорости сукцессий не зависят от возраста площади производной породы. Соответственно, вводится N констант скоростей перехода:

$$s_k, \beta_{k1} \dots \beta_{kN}; \beta_{k1} + \dots + \beta_{kN} = 1,$$

где s_k – удельная скорость уменьшения площади производной породы k (доля её площади, суммарно переходящей во все коренные породы); β_{kn} – доля этой скорости для площади, переходящей в коренную породу n . Таким образом, $s\beta_{k1} \dots s\beta_{kN}$ – удельные скорости перехода площади производной породы k в коренные породы $1 \dots N$.

В итоге, для задания параметров подмодели сукцессий надо задать вектор s_1, \dots, s_K удельных скоростей (для всех производных пород) и матрицу $\|\beta_{kn}\|$ долей (где для каждого k должно выполняться $\beta_{k1} + \dots + \beta_{kN} = 1$). Накопление площади производной породы в ее предельном возрасте противоречило бы пониманию хода сукцессии и природы климакса. По этой причине коренные породы считаются долговечнее производных:

$$T_{\text{произв max}} < T_{\text{корен max}}.$$

Таким образом, все площади, остающиеся после гибели или рубки производных насаждений, в ходе естественной сукцессии должны переходить в коренные.

Модель естественных нарушений. В базовом варианте модели скорость естественной гибели насаждений не зависит от их возраста (то есть гибнут насаждения всех возрастов и с одинаковой скоростью), и задается константой d , равной удельной скорости гибели, год^{-1} (то есть в год гибнут насаждения на доле площади d). Гибель фактически складывается из воздействия пожаров, вредителей и болезней леса, ветровалов и других катастрофических воздействий. Породно-возрастная структура гибнущих древостоев определяется породно-возрастной структурой лесов региона.

Модель рубок. В базовом варианте модели рассматриваются три способа рубок: сплошноле-

сосечные, постепенные и выборочные. Насаждения, пройденные сплошнолесосечными рубками, переходят в категорию вырубков; пройденные постепенными рубками – в хвойные молодняки, а выборочными рубками – в изреженные древостои коренной породы.

Сплошнолесосечные рубки моделируются следующим образом. Пусть возраст спелости породы p равен L_p , площадь спелых и перестойных насаждений равна X_p , а их общая площадь для всех пород – X_M . Рассматривается простейший случай, когда целевая суммарная площадь рубки в единицу времени равна некоторой заданной постоянной величине C (некоторой части полной площади). Площадь рубки на площади S_p равна c_p . Вообще говоря, распределение рубок по площадям X_p может производиться различными способами. В базовом варианте модели принят простейший вариант, когда площади равноправны, так что площадь рубки c_p пропорциональна доле площади X_p в общей площади спелых и перестойных древостоев. В этом случае интенсивность рубок для отдельных пород равна $c_p = CX_p/X_M$ и обеспечивает целевую площадь рубки $C = \sum c_p = \sum CX_p/X_M$. Если на каком-то шаге площадь спелых древостоев становится меньше заданной площади рубки $X_M < C$, рубится вся площадь X_M , и целевая площадь рубки достигнута быть не может.

Полная система уравнений громоздка, и ее формальное выписывание не проясняет ее устройства, поэтому ниже приводятся два простых частных случая. В первом примере рассматривается одна порода (поэтому нет сукцессий и распределения по породам площади молодняков, формирующихся на пустующих лесных землях), с рубками и гибелью насаждений. Во втором примере рассматриваются две породы, с сукцессиями и распределением по преобладающим породам площади молодняков, формирующихся на пустующих лесных землях, с гибелью насаждений, но без рубок. Логическая сумма двух примеров дает образец полной системы (небольшое добавление см. после изложения примеров).

1. Территория занята одной породой, подверженной рубкам и естественной гибели. Введены следующие обозначения:

E_b, E_f – площадь погибших насаждений и вырубков;

S – покрытая лесом площадь;

e_b, e_f – их удельные скорости зарастания (используется экспоненциальная модель), для последних возрастов скорости равны 1;

d – удельная скорость гибели древостоев;

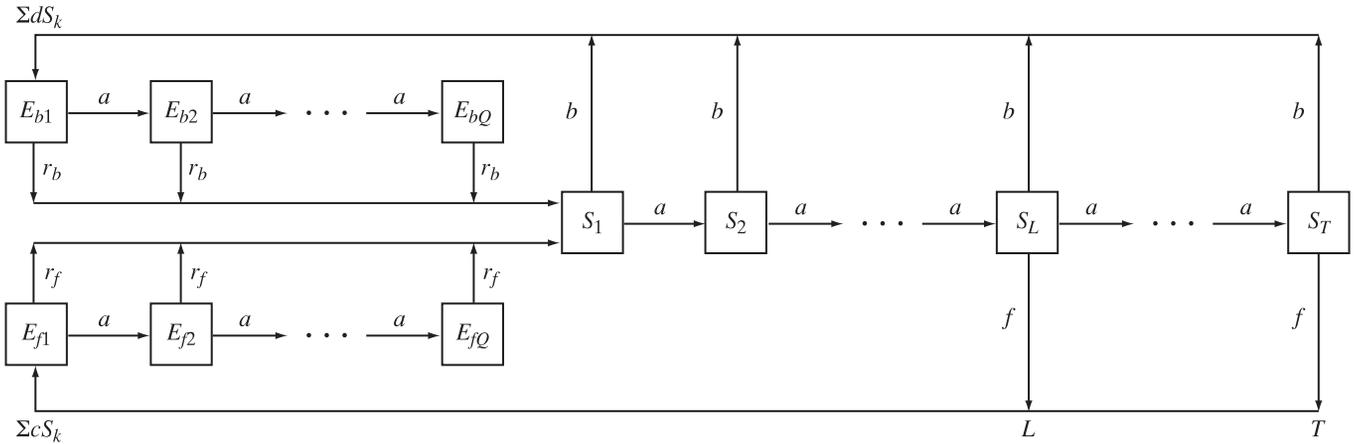


Рис. 3. Схема восстановительной динамики для случая одной породы. В прямоугольниках выписаны обозначения состояний (переменные модели), стрелками обозначены переходы между ними. S_k – покрытая лесом площадь в возрасте породы k ; E_{bg}, E_{fg} – пустующие площади возраста g , возникшие после естественной гибели насаждений и рубок соответственно; r_b, r_f, b, f – процессы зарастания этих пустующих площадей, для гибели и рубок соответственно; a – переход по возрасту (взросление) и времени площадей, оставшихся после зарастания, гибели и рубок; d, c – удельные скорости гибели и рубок соответственно; Q – максимальный возраст пустующей площади; L – минимальный возраст рубки; T – максимальный возраст преобладающей породы.

- C – целевая суммарная площадь рубки;
- X_M – площадь спелых и перестойных насаждений;
- L – минимальный возраст рубки древостоев;
- g – возраст пустующей площади;
- Q – максимальный возраст пустующей площади;
- a – возраст покрытой лесом площади;
- T – максимальный (предельный) возраст преобладающей породы.

Последнее уравнение (для $S(t + 1, T)$) имеет отличную от остальных форму и описывает накопление площади в постсукцессионном (климаксом) состоянии. Иллюстрирующая блок-схема системы приведена на рис. 3. Уравнения динамики имеют вид

$$\begin{aligned}
 E_b(t + 1, 1) &= \Sigma dS(t, a) \\
 E_b(t + 1, 2) &= E_b(t, 1)(1 - e_b) \\
 &\dots\dots\dots \\
 E_b(t + 1, Q) &= E_b(t, Q - 1)(1 - e_b) \\
 E_f(t + 1, 1) &= C \\
 E_f(t + 1, 2) &= E_f(t, 1)(1 - e_f) \\
 &\dots\dots\dots \\
 E_f(t + 1, Q) &= E_f(t, Q - 1)(1 - e_f) \\
 S(t + 1, 1) &= E_b(t, Q)(1 - e_b) + \\
 &+ E_f(t, Q)(1 - e_f) + \Sigma e_b E_b(t, g) + \Sigma e_f E_f(t, g) \\
 S(t + 1, 2) &= S(t, 1)(1 - d) \\
 &\dots\dots\dots
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 S(t + 1, L - 1) &= S(t, L - 2)(1 - d) \\
 S(t + 1, L) &= S(t, L - 1)[(1 - d - C/X_M(t)] \\
 &\dots\dots\dots \\
 S(t + 1, T - 1) &= S(t, T - 2)[(1 - d - C/X_M(t)] \\
 S(t + 1, T) &= S(t, T - 1)[1 - d - C/X_M(t)] + \\
 &+ S(t, T)[1 - d - C/X_M(t)]
 \end{aligned}$$

и решаются с начальными условиями $E_b(0, 1), \dots, E_b(0, Q), E_f(0, 1), \dots, E_f(0, Q), S(0, 1), \dots, S(0, T)$.

2. Территория занята двумя породами, подверженными естественной гибели. Введены следующие обозначения:

- S_1 – площадь производной породы;
- S_2 – площадь коренной породы;
- E_1, E_2 – пустующие площади, на которых формируются молодняки производной и коренной породы;
- e – удельная скорость их зарастания, взятая одинаковой для обеих пород (используется экспоненциальная модель),
- d – удельная скорость гибели, взятая одинаковой для обеих пород;
- s – удельная скорость сукцессии;
- $r_{11}, r_{12}, r_{21}, r_{22}$ – элементы матрицы породного состава естественной регенерации;
- Q – максимальный возраст пустующих площадей;
- T_1, T_2 – максимальный возраст производной и коренной пород, $T_1 < T_2$;

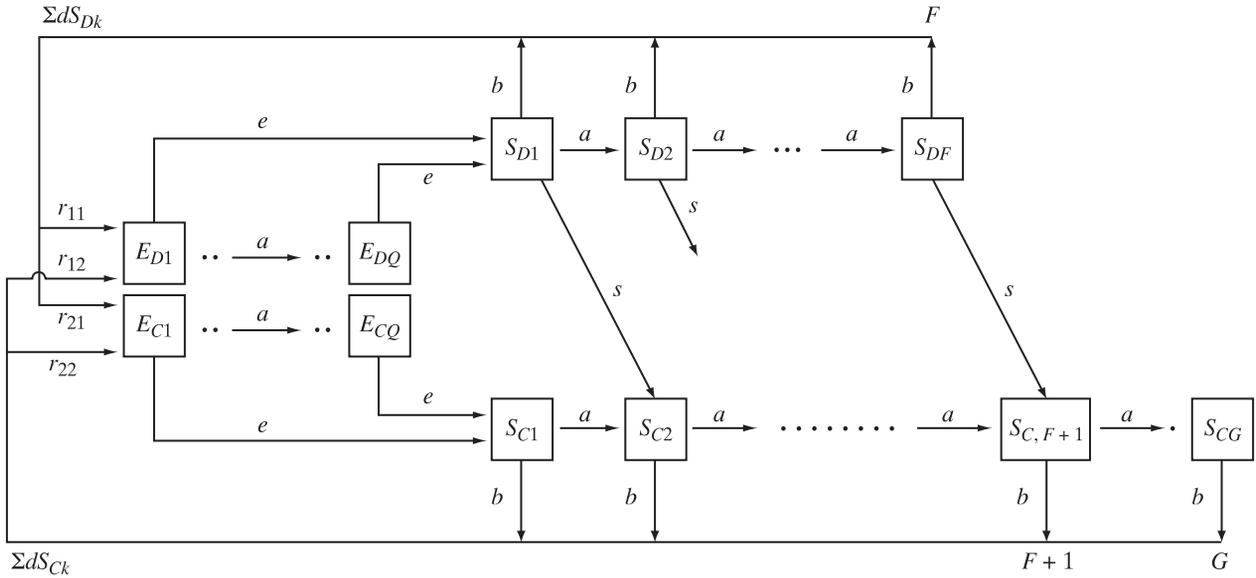


Рис. 4. Схема восстановительной и сукцессионной динамики двух пород. S_{Dk}, S_{Ck} – площади, занятые соответственно производной и коренной породой в возрасте пород k ; E_{Dg}, E_{Cg} – пустующие площади возраста g , возникшие после естественной гибели насаждений, занятые соответственно производной и коренной породой; e, b, s – процессы зарастания этих пустующих площадей, гибели насаждений и сукцессии соответственно; a – переход по возрасту (взросление) и времени площадей, оставшихся после зарастания и гибели; d – удельная скорость гибели; $r_{11}, r_{12}, r_{21}, r_{22}$ – процессы воспроизводства в соответствии с матрицей породного состава регенерации; Q – максимальный возраст пустующих площадей; F, G – максимальные возраста производной и коренной пород соответственно, $F < G$.

s^F – скорость последнего сукцессионного перехода, в ходе которого вся площадь производной породы переходит в коренную;

$D_m(t) = \Sigma dS_m(t, a)$ – площадь погибшего насаждения, занятого породами $m = 1, 2$.

Иллюстрирующая блок-схема системы приведена на рис. 4. Уравнения динамики имеют вид

$$\begin{aligned}
 E_n(t+1, 1) &= \Sigma r_{nm} D_m(t) \quad (n = 1, 2) \\
 E_n(t+1, 2) &= E_n(t, 1)(1 - e) \\
 &\dots\dots\dots \\
 E_n(t+1, Q) &= E_n(t, Q-1)(1 - e) \\
 S_1(t+1, 1) &= E_1(t, Q)(1 - e) + \Sigma eE_1(t, g) \\
 S_2(t+1, 1) &= E_2(t, Q)(1 - e) + \Sigma eE_2(t, g) \\
 S_1(t+1, 2) &= S_1(t, 1)(1 - d) - sS_1(t, 1) \\
 S_2(t+1, 2) &= S_2(t, 1)(1 - d) + sS_1(t, 1) \\
 &\dots\dots\dots \\
 S_1(t+1, T_1) &= S_1(t, T_1-1)(1 - d) - sS_1(t, T_1-1) \\
 &\text{(предпоследний сукцессионный переход)} \\
 S_2(t+1, T_1) &= S_2(t, T_1-1)(1 - d) + sS_1(t, T_1-1) \\
 S_1(t+1, T_1+1) &= S_1(t+1, T_1)(1 - d - s^F) \\
 &\text{(} \equiv 0, \text{ последний сукцессионный переход)} \\
 S_2(t+1, T_1+1) &= S_2(t, T_1)(1 - d) + s^F S_1(t, T_1) \\
 &\text{(последний сукцессионный переход)} \\
 &\dots\dots\dots \\
 S_2(t+1, T_2-1) &= S_2(t, T_2-2)(1 - d) \\
 S_2(t+1, T_2) &= S_2(t, T_2-1)(1 - d) + S_2(t, T_2)(1 - d),
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

и решаются с начальными условиями $E_n(0, 1), \dots, E_n(0, Q), S_n(0, 1), \dots, S_n(0, T), n = 1, 2$.

Случай, не вошедший в приведенные примеры. Если одна производная порода может переходить в несколько коренных, т.е. имеет место сукцессионный переход: [производная порода] $_k \rightarrow$ [коренная порода] $_1 \dots$ [коренная порода] $_N$, в правых частях динамических уравнений для каждого возраста $a = 1 \dots T_1$ производной породы этот процесс описывается столбцом:

$$\begin{aligned}
 S_k(t+1, a+1) &= S_k(t, a) - s_k S_k(t, a) \\
 S_1(t+1, a+1) &= S_1(t, a) + s_k \beta_{1k} S_k(t, a) \\
 &\dots\dots\dots \\
 S_N(t+1, a+1) &= S_N(t, a) + s_k \beta_{Nk} S_k(t, a).
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Здесь S_k – площадь производной породы k ; S_1, \dots, S_N – площади коренных пород; s_k – удельная скорость перехода для площади, занятой производной породой, год $^{-1}$; β_{nk} – коэффициенты, задающие распределение переходящей площади $s_k S_k(t, a)$ по площадям коренных пород, $\Sigma \beta_{1k} = 1$.

4. ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ЗАПУСКА БАЗОВОГО ВАРИАНТА МОДЕЛИ

4.1. Начальные условия

Берутся из данных последнего лесоустройства или государственного учета лесов. В данных государственного учета значения площадей и

запасов приведены по 6 группам возраста, в данных лесоустройства – по 10-летним интервалам (ступеням) возраста. С помощью какого-либо алгоритма интерполяции вычисляются значения покрытых лесом площадей и запасов для каждой ступени или года возраста, $S_p(0, a)$, $V_p(0, a)$.

4.2. Кривые хода роста

Динамика удельных запасов, средних диаметров и средних высот для каждой из преобладающих пород и типов лесорастительных условий или кодов возраста рубки может браться из справочных материалов [9, 10], или рассчитываться прямо по данным ГЛФ. В этом случае величины $S_p(0, a)$, $V_p(0, a)$ позволяют найти кривые хода роста, $U_p(a)$, используемые для расчёта прогнозных значений запасов древесины:

$$U_p(a) = V_p(0, a)/S_p(0, a).$$

Ввиду не монотонности найденных таким образом величин $U_p(a)$, а также наличия пробелов в данных (некоторые $S_p(0, a) = 0$), получение кривых $U_p(a)$ требует специального алгоритма, восстанавливающего пробелы в данных и обеспечивающего монотонность кривых, по крайней мере, до возраста спелости.

4.3. Параметры процессов, изменяющих состояние лесов

4.3.1. Масштабы гибели лесов и структура погибших древостоев

Масштабы гибели древостоев задаются в диапазоне от нулевых (при идеальной охране и защите лесов) до фактических значений, соответствующих существующему уровню охраны и защиты лесов или отсутствию организованной борьбы с огнем, вредителями и болезнями леса. При существующем уровне охраны и защиты лесов они вычисляются путем деления осредненной за многолетний период фактической площади гарей и погибших насаждений на сроки их естественного зарастания, найденные при оценке процессов естественной регенерации древостоев. Ожидаемые масштабы гибели древостоев при отсутствии организованной борьбы с огнем, вредителями и болезнями леса определяются путем деления максимальной за многолетний период площади гарей и погибших насаждений за период проведения государственных учетов лесов на сроки естественного зарастания этих категорий пустующих земель. Породно-возрастная структура погибших насаждений задается распределением их площади по преобладающим породам и ступеням возраста, аналогичным породно-возрастной структуре лесов региона.

4.3.2. Масштабы, интенсивность и повторяемость рубок главного пользования (рубок спелых древостоев)

Масштабы рубок задаются площадями или объемами сплошных, постепенных и выборочных рубок в диапазоне от нулевых до максимально допустимых значений, установленных при оценке ресурсного потенциала лесов. В качестве базового варианта рассматриваются фактические площади или объемы рубок главного пользования (рубок спелых насаждений).

Повторяемость постепенных и выборочных рубок задается числом приемов и интервалом времени между очередными приемами, а их интенсивность – процентом изымаемого запаса при каждом приеме таких рубок. В базовом варианте модели рассматриваются двухприемные постепенные и трехприемные выборочные рубки.

Временной интервал между двумя приемами постепенных рубок принимается равным двум ступеням возраста, а между очередными приемами выборочных рубок – одной трети возраста рубок (естественной спелости). Интенсивность первого приема постепенных рубок μ_1 задается в интервале от 20 до 50% удельного запаса древесины на корню, а интенсивность второго приема вычисляется как $\mu_2 = 100 - \mu_1$. Интенсивность каждого из трех приемов выборочных рубок задается одинаковой, равной 1/3 удельного запаса древесины на корню.

Оценка ресурсного потенциала лесов осуществляется путем построения траекторий максимально допустимых размеров устойчивого лесопользования при заданных режимах охраны (защиты) лесов и воспроизводства лесных ресурсов. Построение траектории максимально допустимых размеров устойчивого лесопользования осуществляется в результате оптимизации площади (объемов) рубок на каждом шаге прогнозного периода при условии не убывания объемов лесопользования. В качестве целевой функции рассматривается максимум пользования древесиной за весь прогнозный период, а в качестве основных ограничений – экологические и экономические требования, вытекающие из критериев и индикаторов устойчивого управления лесами.

4.3.3. Сроки естественного зарастания пустующих лесных земель

Срок зарастания равен интервалу времени между образованием гари или вырубке и переводом их в категорию покрытых лесом земель.

Модель зарастания использует разные подходы к нахождению параметров зарастания для вырубок и нарушений (“гарей”). В случае вырубок берутся данные государственных учетов лесов и ежегодной отчетности лесного хозяйства о масштабах использования и воспроизводства лесных ресурсов, конкретно – величины ежегодных рубок C (га год⁻¹) и площади вырубок E_f .

Из-за отсутствия достоверной информации о масштабах ежегодной гибели древостоев в результате естественных нарушений (лесных пожаров, массовых размножений вредителей и болезней леса, экстремальных погодных условий и т.д.), используются доступные данные о динамике площадей гарей E_b и погибших насаждений в составе лесных земель.

Каждая из двух используемых моделей зарастания пустующих площадей (см. выше) имеет один свободный параметр (Q в ступенчатой модели (1a) и e в экспоненциальной (1b)). Оба параметра находятся методом наименьших квадратов. Например, для случая вырубок и ступенчатой модели параметр Q находится минимизацией отклонения σ наблюдаемой площади вырубок $E_f^{observ}(t_b)$ от расчетной $E_f^{theor}(t_b, Q)$, найденной с использованием модели для тех же моментов времени:

$$\sigma(Q) = \sum (E_f^{observ}(t_b) - E_f^{theor}(t_b, Q))^2,$$

где суммирование ведется по всем моментам наблюдения t_b (“базисным годам”).

4.3.4. Породная структура естественного возобновления на пустующих лесных землях

Параметры лесообразовательных процессов на пустующих лесных землях определяются типом условий местопроизрастания и породным составом ранее произраставших насаждений. Их оценка должна проводиться дифференцированно по категориям пустующих земель и типам лесорастительных условий.

Расчет матриц породной структуры естественной регенерации на гарях и вырубках $\|r_{im}\|$ осуществляется по данным лесоустройства и/или государственных учетов лесов. По данным лесоустройства матрицы породной структуры естественной регенерации рассчитываются для каждого типа (группы типов) лесорастительных условий, а по данным государственных учетов лесов – для всей совокупности условий местопроизрастания.

При отсутствии данных о породной структуре погибших и вырубленных древостоев матрицы породной структуры естественного возобновления на гарях и вырубках оцениваются косвенным методом, основанным на следующих допущениях.

Породная структура вырубаемых древостоев определяется структурой спелых и перестойных лесов, в которых назначаются рубки главного пользования, а породная структура погибающих древостоев – общей породно-возрастной структурой лесов каждого региона, гибель которых в значительной степени связана с крупными лесными пожарами. Последние распространяются в условиях сильной засухи и оказывают разрушительное воздействие практически на все охваченные огнем лесные экосистемы, независимо от их породного состава и возраста.

В случае вырубок, необходимая информация включает в себя данные о породной структуре молодняков, формирующихся на вырубках, и вырубаемых древостоев. Последняя задается фактической породной структурой вырубленных древостоев или породной структурой спелых и перестойных древостоев фонда сплошнолесосечных рубок.

В случае гарей, необходимая информация включает в себя данные о породной структуре формирующихся на гарях молодняков и породной структуре погибших насаждений. Последняя задается фактической породной структурой погибших древостоев или породной структурой не эксплуатационных лесов, где из-за отсутствия промышленных заготовок древесины и пустующие лесные земли представлены гарями и погибшими древостоями.

Таким образом, для расчета необходимо знать площади погибших или вырубленных насаждений D_m и площади возникших молодняков Y_m , где $m = 1 \dots P$ – участвующие породы. Задача является плохо определенной, так как, с учетом условий на элементы матрицы $\|r_{im}\|$, имеется $(P - 1)$ уравнений на $(P - 1)^2$ неизвестных параметров. В связи с этим, матрицы естественной регенерации могут определяться различными методами.

Для случая двух пород элементы матрицы находятся аналитически (с экспертным выбором одного свободного параметра). При $P > 2$ возможно использование данных в разрезе лесничеств (лесхозов), находящихся на территории рассматриваемого региона. При этом применяется метод наименьших квадратов и минимизируется сумма квадратов невязок между моделируемой и фактической породной структурой молодняков на гарях и вырубках. Однако при достаточно больших значениях P , примерно более 4–6 (зависит от данных), и этот метод перестает работать. В этом случае возможно упрощенное аналитическое нахождение элементов матриц (пригодное, впрочем, для любых размерностей).

4.3.5. Параметры естественной сукцессии

Параметры включают в себя длительность стадий сукцессий и матрицу скоростей перехода преобладающих производных пород в коренные (см. Раздел 3.4).

При нахождении матриц по данным лесоустройства вводится допущение, что в процессе естественной сукцессии древостои всех производных пород переходят в древостои коренных пород (однонаправленная сукцессия). Матрицы рассчитываются для каждого из основных типов лесорастительных условий.

Предлагаемые методы оценки параметров лесообразовательных и продукционных процессов в лесных экосистемах по данным лесоустройства и государственных учетов лесов каждого региона страны позволяют формировать информационное обеспечение прогнозных расчетов даже по слабо изученным северным территориям Сибири и Дальнего Востока, не обеспеченным необходимой нормативно-справочной информацией.

Заключение. Интегральная модель естественной и антропогенной динамики породно-возрастной структуры лесов и необходимые для ее практической реализации методы оценки лесообразовательных и продукционных процессов предлагаются в качестве базового инструментария для решения широкого круга региональных задач стратегического планирования и устойчивого управления лесами. К числу важнейших задач лесного планирования и устойчивого управления лесами следует отнести оценку ресурсного и экологического потенциала лесов, обоснование сбалансированных режимов использования и воспроизводства лесных ресурсов, оценку и прогнозирование углеродного бюджета и экосистемного разнообразия.

Возможность решения указанных задач обеспечивает модель динамики породно-возрастной структуры лесов, имеющая на входе стратегии лесопользования, задаваемые уровнем охраны и защиты лесов, режимами использования и воспроизводства лесных ресурсов. При каждом фиксированном уровне охраны (защиты) лесов и режиме воспроизводства лесных ресурсов оценка ресурсного потенциала лесов может быть получена в результате построения траектории устойчивого лесопользования с использованием простого метода бинарной (дихотомической) оптимизации и системы экологических и экономических ограничений, отражающих критерии и индикаторы устойчивого лесопользования.

Аналогичный подход может использоваться для обоснования требуемого уровня охраны и защиты

лесов, режима воспроизводства лесных ресурсов и оценки экосистемного разнообразия лесов. Апробация модели динамики породно-возрастной структуры лесов проведена при оценке углеродного бюджета лесных экосистем и подтвердила возможность ее практического использования на национальном и региональном уровнях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Уткин А.И., Честных О.В., Сонген Б.* Углерод в лесном фонде и сельскохозяйственных угодьях России. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2005. 200 с.
2. Инструкция о порядке ведения государственного учета лесного фонда. Утверждена приказом Рослесхоза от 30 мая 1997 г. № 72.
3. *Исаев А.С., Коровин Г.Н.* Динамика лесных ресурсов и прогнозирование изменений лесного фонда // *Фундаментальные основы управления биологическими ресурсами*. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2005. С. 47–60.
4. *Исаев А.С., Коровин Г.Н.* Актуальные проблемы национальной лесной политики / Под редакцией Захарова В.М. М.: ЦЭПЛ, 2009. 105 с.
5. *Комков В.В., Моисеев Н.А.* Оптимизация воспроизводства лесных ресурсов. М.: Лесн. пром-ость, 1987. 248 с.
6. *Корзухин М.Д., Семевский Ф.Н.* Синэкология леса. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 192 с.
7. *Коровин Г.Н., Карпов Э.А.* Модель динамики лесного фонда в задачах оптимизации лесопользования // *Проблемы мониторинга и моделирования динамики лесных экосистем*. М.: Эколес, 1995. С. 140–156.
8. Лесостроительная инструкция. Утверждена Приказом МПР России от 6 февраля 2008 г. № 31.
9. *Общесоюзные нормативы для таксации лесов / Сост. В.В. Загреев, В.И. Сухих, А.З. Швиденко, Н.Н. Гусев, А.Г. Мошкалев*. М.: Колос, 1992. 495 с.
10. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород северной Евразии: *Нормативно-справочные материалы*. М.: Министерство природных ресурсов РФ 2006. 808 с.
11. *Henderson E.B.* Development of state and transition model assumptions used in National Forest Plan Revision. USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-54. 2008.
12. *Kloss D.* Strategic Forest Management Model Version 2.0. User Guide. Forest Management Planning Section, Forest Policy Management Branch, Ministry of Natural Resources. Queen's Printer for Ontario, 2002. 328 p.

13. *Kurz W.A., Apps M.J.* A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canada forest sector // *Ecological Applications*. 1999. V. 9. № 2. P. 526–547.
14. *Mills J.R., Kincaid J.C.* The aggregate timberland assessment system-ATLAS: a comprehensive timber projection model. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-281. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 1992. 160 p.
15. *Nelson J.* Forest Planning Studio (fps) – Atlas Program Reference Manual Version 6. Faculty of forestry, University of British Columbia, Vancouver, BC, 2003. 104 p.
16. *Newman C.* Vegetation Simulation and Our Changing World: Keynote Address. USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-54. 2008.
17. Woodstock Modeling Reference, V 2006 Remsoft Incorporated. 104 p.

Long-Term Forecasting of Dynamics of Forest Species-Age Structure

G. N. Korovin, M. D. Korzukhin, O. B. Butusov, A. S. Golovanov

Concepts of long-term forecasting of the forest species-age structure are considered. A scheme for modeling of the forest ecosystem dynamics is presented. A description of the integral model for the dynamics of the forest species-age structure with initial data to run the basic model variant, including initial conditions, curves of stand growth and parameters of processes that change the state of forests is given.