

А
Г 82

ности, необходимых при лесоустройстве, а также при оценках биосферной роли лесных экосистем и антропогенных воздействий на них.

5. Впервые для насаждений *Populus* установлены географические закономерности изменения предельных показателей фитомассы, найденных по условию самоизреживания.

6. Экстраполяция фактических данных фитомассы на площадь осинников дала дополнительно к традиционному таксационному описанию каждого выдела показатели фитомассы по фракциям, что позволило оценить общую фитомассу и ее фракционный состав на всей занятой осиной площади. Это составляет основу для картографирования фитомассы осинников.

На правах рукописи

Грибенников Андрей Николаевич

Грибенников

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Структура надземной фитомассы осинников в колках Омской области // Таксация леса на рубеже XXI века: состояние и перспективы развития (Материалы конференции).- С.-Петербург: С.-ПбГЛТА, 2001.- С. 57.
2. Фитомасса насаждений *Abies* и *Populus* в связи с континентальностью климата Евразии // Там же.- С. 54-56 (соавторы В. А. Усольцев, В. А. Азаренок, А. И. Антропов).
3. Рекурсивно-блочные модели и география фитомассы лесов // Компьютерное и математическое моделирование в естественных и технических науках.- Вып. 7. (2-я Всероссийская научная интернет-конференция).- Тамбов: ТГУ, 2001.- С. 70-72 (соавторы В. А. Усольцев, В. И. Марковский, А. И. Антропов).
4. Таблицы биопродуктивности осинников Евразии // Новые технологии и устойчивое управление в лесах Северной Европы (Международная конференция, посвященная 50-летию ЛИФа ПетрГУ).- Петрозаводск, 2001.- С. 124-125 (соавтор Усольцев В. А.).
5. Возрастная динамика фитомассы рода *Populus* Северной Евразии // Химико-лесной комплекс – проблемы и решения: Сб. статей по материалам Всероссийской научно-практич. конфер.- Т. 1.- Красноярск: СибГТУ, 2001.- С. 162-166 (соавтор Усольцев В. А.).
6. Биологическая продуктивность рода *Populus* в связи с континентальностью климата и природной зональностью Евразии // Леса Урала и хозяйство в них.- Вып. 21.- Екатеринбург: УГЛТУ, 2001.- С. 171- 186 (соавтор В. А. Усольцев).
7. Биопродуктивность осинников по подзонам и провинциям Евразии // Биологические ресурсы и устойчивое развитие (Международная научная конференция).- Пушино: Ин-т фундаментальных проблем биологии, 2001.- С. 229-230 (соавтор В. А. Усольцев).

Структура и географические закономерности распределения
фитомассы некоторых видов *Populus*
(на примере Северной Евразии)

Специальность 06. 03. 03. - лесоведение, лесоводство;
лесные пожары и борьба с ними

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Отдел оперативной полиграфии УГЛТУ. Заказ № 1249 Тираж 100.

Екатеринбург 2002

В. А. Усольцев

Работа выполнена в Уральском государственном лесотехническом университете

Научные руководители - доктор сельскохозяйственных наук, профессор В. А. Усольцев;
кандидат технических наук, доцент В. А. Азаренок

Официальные оппоненты - доктор биологических наук, профессор А. К. Махнев;
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент Л. А. Лысов

Ведущая организация - Омская лесоустроительная экспедиция

Защита состоится 24 января 2002 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.281.01 при Уральском государственном лесотехническом университете по адресу: 620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского государственного лесотехнического университета.

Автореферат разослан 21 декабря 2001 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор сельскохозяйственных наук, доцент С. В. Залесов

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Известно, что основой функционирования биосферы является ее первичная продуктивность и что жизнь человека и всех гетеротрофных организмов зависит от первичной продукции биосферы, но лишь в последние десятилетия представление о продукционной способности биосферы вышло за рамки "просвещенных догадок" и получило некоторое количественное подтверждение (Whittaker et al., 1975).

Нынешний ажиотаж вокруг проблемы нарушенного глобального углеродного баланса биосферы и надежд на его восстановление путем тотального облесения планеты переходит в русло общей парадигмы устойчивого развития (sustainable development), когда на первый план выступает биосферостабилизирующая функция лесов, а ресурсное лесопользование рассматривается как подчиненная задача (Уткин, 1995; Нильссон, 1999).

Для обеспечения коэволюции человека и биосферы необходим переход к качественно новой и более эффективной стратегии потребления природных ресурсов, реализуемой в рамках международных национальных лабораторий, работающих по единой программе и формирующих единую базу экологических данных (Моисеев, 1988).

Для обоснования актуальности постановки проблемы исследования представляется ключевой констатация Д. М. Вудвеллом и Р. Э. Хафтоном (1997) следующего факта: «Самая большая неопределенность существует в отношении запасов углерода на суше, особенно в северных лесах и их почвах» (с. 40). Сегодня данных о запасах углерода в фитомассе основного «держателя» углерода – лесного покрова накоплено уже достаточно, чтобы попытаться свести их, хотя бы на примере Северной Евразии, в единую базу и дать географический анализ фитомассы лесов.

Исследования автора проводились в 2000-2002 гг. в рамках проекта «Региональные закономерности депонирования углерода экосистемами основных лесных формаций России», грант РФФИ № 00-05-64532 (руководитель проекта – проф. Усольцев В. А.) и ФЦП «Интеграция» на 1997-2001 гг., тема № 32/99 (руководитель проекта – доцент Азаренок В. А.).

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы явилось изучение структуры надземной фитомассы осинников омской лесостепи, а также - географических особенностей распределения фитомассы рода *Populus* по регионам Северной Евразии и описание их посредством многофакторных моделей, совмещенных со средними и предельными возрастными траекториями массообразующих показателей древостоев пробных площадей, с традиционными таблицами хода роста (ТХР) видов *Populus* и с базой данных государственного учета лесного фонда (ГУЛФ).

В связи с поставленной целью конкретными задачами исследования были:

- изучить особенности структуры надземной фитомассы осины в колках омской лесостепи;

- на основе собственных и привлеченных экспериментальных данных о фитомассе древостоев выявить зональные и провинциальные закономерности распределения фитомассы насаждений *Populus* для фоновых групп типов леса;
- составить таблицы биологической продуктивности насаждений *Populus* для разных регионов и установить зональные и провинциальные закономерности ее изменения;
- выявить зональные и провинциальные закономерности изменения предельных показателей фитомассы насаждений *Populus*;
- экстраполировать разработанные модели динамики фитомассы на лесопокрытую площадь осинников с использованием базы поведельных данных ГУЛФ одного из лесхозов.

Научная новизна. Впервые изучены особенности структуры фитомассы осины в колочной лесостепи Омской области. Собрана наиболее полная коллекция экспериментальных данных о фитомассе насаждений *Populus* в Северной Евразии, значительно превышающая объем всех известных сводок подобных данных. Это позволило впервые для рода *Populus* разработать систему региональных моделей динамики фитомассы и проанализировать на их основе географические закономерности распределения ее показателей: а) полученных непосредственно по материалам пробных площадей, б) взятых из составленных таблиц биопродуктивности и в) рассчитанных по предельным густотным траекториям. Впервые для осинников поведельная база данных ГУЛФ дополнена показателями фитомассы и на основе этой базы выполнена экстраполяция экспериментальных данных фитомассы на занимаемую осиной площадь.

Практическая значимость работы состоит в разработке нормативных материалов, необходимых при реализации систем лесохозяйственных мероприятий, направленных на повышение продуктивности и комплексного освоения осинников и тополельников Северной Евразии. Результаты исследования могут быть использованы при разработке лесного кадастра, осуществлении лесного мониторинга и экологических программ разного уровня, а также при расчетах углеродного бюджета лесных экосистем Северной Евразии и оптимизации систем экологизированных рубок.

Разработанные нормативы используются Омской лесохозяйственной экспедицией Западно-Сибирского лесохозяйственного предприятия при устройстве осиновых лесов и для расчета ресурсов древесной зелени и технологической щепы, получаемых при лесопильничестве, а также – Комитетом природных ресурсов по Омской области и Саргатским лесхозом в производственной деятельности.

Обоснованность выводов и предложений. Использование обширного экспериментального материала и современных методов автоматизированного статистического анализа, системный подход при содержательном анализе объектов исследования и интерпретации полученных резуль-

татов, реализация поставленных задач на уровне многофакторных регрессионных моделей, использование современной вычислительной техники и адекватных компьютерных программ определяют обоснованность приведенных в диссертации выводов и предложений.

Личное участие автора. Все виды работ по теме диссертации от сбора экспериментального материала до анализа и обработки полученных результатов осуществлены автором или при его непосредственном участии.

Апробация работы. Основные результаты исследований апробированы на Второй Всероссийской научной интернет-конференции, Тамбов, ТГУ, 2001; Международной научной конференции "Биологические ресурсы и устойчивое развитие", Пущино, 2001; Международной конференции, посвященной 50-летию ЛИФа ПетрГУ, Петрозаводск, 2001; научной конференции "Таксация леса на рубеже XXI века: Достижения и перспективы развития", С.-Петербург, 2001; Всероссийской научно-практической конференции "Химико-лесной комплекс: Проблемы и решения", Красноярск, 2001.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в семи печатных работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает в себя 119 страниц машинописного текста, состоит из введения, 6 глав, заключения и 5 приложений. Список использованной литературы включает 125 наименований, в том числе 60 иностранных. Текст иллюстрирован 33 таблицами и 36 рисунками.

1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Род *Populus* является древнейшим из покрытосеменных растений. Все его представители относятся к наиболее быстрорастущим древесным видам умеренной зоны и называются иногда «эвкалиптами севера» (Вехов, 1932), однако на сегодня род *Populus* являет собой пример чрезвычайно выраженной диспропорции между потенциальными возможностями продуцирования органического вещества и фактической их реализацией на лесопокрытых площадях.

В главе описаны ареал, экология и некоторые географические аспекты продуктивности рода *Populus* в Северной Евразии. Этот краткий анализ будет полезен для более корректной экстраполяции данных о биопродуктивности некоторых видов *Populus* на регионы, по которым таких данных пока нет, а также для формирования некоторого предварительного "информационного фона".

В период развернутых исследований лесов по Международной биологической программе часто имело место локальное сопоставление их биопродуктивности по двум, реже - трем регионам (Поздняков, 1967; Про-

тополов, Грибов, 1971). При ограниченном материале и недостаточно полном учете "экологических фонов" сопоставляемых насаждений достоверность различий их биопродуктивности не оценивалась, но в последнее время подобные попытки предпринимаются (Шевелев, 2001).

Уровень ФАР по зональному градиенту и континентальность климата – по провинциальному являются основными характеристиками последнего, определяющими биопродукционный потенциал растительного покрова (Григорьев, Будыко, 1956; Базилевич, Родин, 1967; Курнаев, 1973; Назимова, 1994, 1995, 1998). Известно более 20 способов количественной оценки степени континентальности климата. Предложенные индексы включают в себя величину годовой амплитуды температуры в абсолютном или относительном выражении и имеют общую тенденцию нарастания в направлении от океанических побережий внутрь евразийского континента с полюсом континентальности в районе Верхоянска и Якутска (Gorczynski, 1920; Congrad, 1946; Иванов, 1953; Полозова, 1954; Хромов, 1957, и др.). Если по зональному градиенту наличие профиля продуктивности лесного покрова подтверждено с различных позиций исследователями из разных научных отраслей (Лавренко с соавт., 1955, и др.), то в изменении продуктивности лесного покрова по провинциальному градиенту имеется пока полная неопределенность, а иногда предлагаются и взаимоисключающие закономерности (Будыко, Ефимова, 1968; Тябера, 1988).

Показано (Усольцев, 1988, 1998), что чем больше основных массообразующих показателей привлекается в качестве статистически значимых независимых переменных в уравнениях, тем точнее оценка фитомассы для региона. Была предложена структурная форма регрессионной модели для переводных коэффициентов фитомассы

$$\ln(P_i/M) = f(\ln A, \ln H, \ln D, \ln N), \quad (1)$$

в которой P_i – фитомасса в абсолютно сухом состоянии i -й фракции: P_S , P_K , P_B , P_F , P_R и P_U – соответственно стволов с корой, коры стволов, скелета ветвей, хвои, корней и нижних ярусов растительности (напочвенный покров, подлесок и подрост в совокупности), т/га; M – запас стволовой древесины, м³/га; A – возраст, лет; H – средняя высота, м, а в качестве характеристики плотности ценоза вместо показателя относительной полноты включается совокупность двух таксационных признаков – среднего диаметра (D , см) и числа стволов (N , тыс.экз/га). От использования интегрального показателя полноты, обычно применяемого при оценке запасов стволовой древесины, в нашем исследовании пришлось отказаться, поскольку при одной и той же полноте, но диаметрально противоположных сочетаниях густоты и среднего диаметра ствола, фитомасса полога древостоя может различаться в два-три раза (Усольцев, 1998).

Поскольку оценки связываемого лесной растительностью углерода различаются на порядок и более, необходимо иметь придержки о предель-

но возможной биопродуктивности лесных экосистем. Только за счет повышения густоты насаждений при прочих равных условиях можно удвоить производительность наших лесов по сравнению с нынешним наличным запасом (Бузыкин, 2001). Предельные показатели фитомассы в лесных экосистемах связаны с уровнем ФАР, режимами температуры и влаги воздуха и почв и, следовательно, имеют региональные особенности. В пределах же региона эти показатели определяются морфоструктурой древостоя и могут быть описаны совокупностью массообразующих таксационных показателей. Показано, что оптимальная траектория фитомассы древостоя не тождественна предельной: первой из них соответствует запас фитомассы, максимальный для данного возрастного диапазона в статике при соответствующих (оптимальных) густотах, а вторая при тех же густотах сдвинута в сторону больших запасов и больших классов возраста, характеризуя тем самым положение кривой (или полосы) самоизреживания и соответственно – верхний предел продуктивности (Усольцев, 1985, 1988, 1998; Кофман, Гуревич, 2001).

При составлении таблиц биологической продуктивности древостоев используют различные методы, из которых наиболее перспективным является рекуррентно-регрессионное моделирование переводных коэффициентов фитомассы древостоев и совмещение их с традиционными ТХР. В применяемых в настоящее время методах совмещения переводных коэффициентов фитомассы с лесоустроительными данными основные массообразующие показатели древостоев либо игнорируются вовсе, либо учитываются лишь частично. Необходимо совершенствование методики на основе совмещения многофакторных моделей фитомассы с ТХР и повыделными банками данных ГУЛФ.

2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНОВ И ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование биологической продуктивности осины выполнено в колочных лесах Саргатского лесхоза Омской области в подзоне лесостепи (55° 30' с. ш., 73° 30' в. д.). Приведена краткая природная характеристика района исследования, описаны климат, рельеф и почвы, характеристика лесного фонда. Осина занимает около 15% лесопокрываемой площади лесхоза при средней полноте 0,7-0,8, или третье место после березы и сосны.

Изучены осинники разнотравные одного возрастного ряда. Заложены шесть пробных площадей (табл. 1). На каждой пробной площади по ступеням толщины стволов взято от 5 до 9 модельных деревьев, всего – 37.

Поскольку в задачу исследования входило не только изучение биопродуктивности осины в условиях омской лесостепи, но и анализ географических закономерностей распределения фитомассы рода *Populus* в целом по регионам Северной Евразии, в работе предпринята попытка сделать

Таблица 1

Характеристика пробных площадей, заложенных в осинниках
разнотравных Омской области

Состав	Возраст, лет	Бо-ни-тет	Густота, 1000 /га	Ср. диаметр, см	Ср. высота, м	Полнота	Запас м ³ /га	Фитомасса, т/га				
								Стволы		Ветви	Листва	Итого
								Всего	Кора			
10Ос	8	II	22,8	2,6	4,9	0,7	37	15,9	3,50	4,61	2,84	23,3
9Ос1Б	16	II	9,27	4,5	7,2	0,7	56	23,7	3,80	6,91	2,82	33,4
6Ос4Б	28	I	1,41	12,6	16,6	0,6	128	54,4	6,60	6,40	1,61	62,4
5Ос5Б	46	II	1,35	15,2	18,1	0,7	188	80,3	10,4	13,9	2,18	96,4
8Ос2Б	53	II	1,11	19,1	20,3	0,8	276	117,6	14,5	15,4	2,66	135,7
6Ос4Б	58	II	0,813	21,8	22,6	0,7	278	118,6	16,3	18,3	2,09	139,0

общедоступной всю (или почти всю) накопленную в многочисленных литературных и других источниках информацию о фактических запасах фитомассы и сформировать для этого соответствующую базу данных для рода *Populus*, широко представленного в Северной Евразии.

Исходный массив данных включает в себя экспериментальные показатели фитомассы по фракциям и запаса столовой древесины, а также – основные массообразующие показатели и состоит из 216 определений, в том числе: 150 – для *P. tremula* (провинции Скандинавско-Русская, подзоны хвойно-широколиственных лесов, лесостепи и степи; Восток Русской равнины, подзоны северной и южной тайги; Западно-Сибирская, подзоны южной тайги, лесостепи и степи; Средне-Сибирская, подзона южной тайги; Дальний Восток, северная тайга; Забайкалье, южная тайга; Алтае-Саянская, подзоны южной тайги и лесостепи; Причерноморская провинция, горный Крым); 24 – для культур *P. trichocarpa* и *P. bachelieri* (Средне-Европейская провинция, широколиственные леса); 10 – для культур тополя майского (*P. euramericana*) (Скандинавско-Русская провинция, подзона широколиственных лесов); 10 – для *P. alba* (Восток Русской равнины, подзона степи, пойма р. Урал и прилегающие плакоры); 12 – для *P. laurifolia* (Алтае-Саянская горная провинция, южная тайга); 9 – для *P. davidiana* и неуставленных гибридов (Япония) и 1 – для *P. pruinosa* (Памиро-Тяньшанская провинция). Подзона южной тайги в Алтае-Саянской провинции представлена, таким образом, двумя видами – *P. tremula* и *P. laurifolia*. Большая часть (70 %) данных о фитомассе *Populus* приходится на *P. tremula*. Остальные виды рода *Populus* характеризуют отдельно тот или иной регион и имеют локальное представительство.

Для территории России разработано множество схем ландшафтного, геоботанического, лесохозяйственного, лесотаксационного, лесоэкономического, лесосеменного, лесопирологического районирования. Исходя из целевой ориентации нашего исследования, зональное расчленение терри-

тории выполнено по Н.И. Базилевич (Базилевич, Родин, 1967), а провинциальное – согласно лесорастительному и лесохозяйственному районированию (Курнаев, 1973; Смагин и др., 1978). Экспериментальные данные после нанесения на схему зонально-провинциального деления территории распределились по 20 регионам.

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

На основе маршрутного обследования района исследований подобраны участки насаждений, на которых закладывали пробные площади согласно ОСТ 56-69-83 «Пробные площади лесостроительные». На пробных площадях выполняли сплошной пересчет деревьев по элементам леса и ступеням толщины с замером высот у 15-20 растущих деревьев. В августе взяты модельные деревья по ступеням толщины. После рубки измерялись длина дерева, протяженность бессучковой части, диаметр ствола у основания кроны. Ствол делили на 10 секций равной длины. На середине секций и на высоте груди определяли диаметры ствола в коре и без коры. Возраст определялся по годичным слоям на пне.

После обрубки крону взвешивали с точностью 50 г на весах грузоподъемностью 10-20 кг. Затем секаторами отделяли древесную зелень – облиственные побеги толщиной 0,4-0,8 см и оставшийся скелет кроны вновь взвешивали. Доля листы в древесной зелени определялась по навескам, взятым в средней части кроны, и по ней рассчитывалась масса листы всего дерева. Путем обмера диаметров в коре и без коры по 10 сечениям ствола рассчитаны объемы древесины и коры ствола и по базисной плотности – их масса. Базисная плотность древесины и коры – соответственно 421 и 470 кг/м³ взята по данным В. А. Усольцева (1985), полученным для осины в лесостепи соседней Северо-Казахстанской области. Содержание сухого вещества в листьях и ветвях осины по данным В. Н. Габеева для лесостепи прилегающей с востока Новосибирской области составляет соответственно 0,376 и 0,549, а по данным В. А. Усольцева (1985) для Северо-Казахстанской – соответственно 0,380 и 0,546. Поскольку упомянутые показатели, полученные на обширном материале, различаются в двух регионах лишь в третьем знаке, для исследуемого района, расположенного между ними в той же подзоне, приняты средние значения – соответственно 0,378 и 0,548. Регрессионным методом рассчитана фитомасса в абсолютно сухом состоянии на 1 га (см. табл. 1).

4. ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФИТОМАССЫ *POPULUS* ПО РЕГИОНАМ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

Структура надземной фитомассы осинников в омской лесостепи и ее особенности. В уравнениях для оценки фитомассы деревьев и древо-

ствоев в качестве регрессоров используются легко измеряемые массообразующие показатели соответственно деревьев либо древостоев. Нами применена двухфакторная линеаризованная зависимость

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln D + a_3 \ln H \ln D \quad (2)$$

где P_i - масса фракции дерева (ствол, листва, ветви) в абсолютно сухом состоянии, кг; H и D - соответственно его высота (м) и диаметр на высоте груди (см). Результаты расчета (2) показаны в таблице 2.

Таблица 2

Характеристика уравнений (2)

Зависимая переменная $\ln P_i$ для:	Константы и независимые переменные				R^2	SE^*
	a_0	$a_1 \ln H$	$a_2 \ln D$	$a_3 \ln H \ln D$		
стволов в коре	-3,4098	0,9394	1,3703	0,1356	0,999	0,069
стволов без коры	-3,8980	1,0419	1,5036	0,0960	0,999	0,083
листвы	-1,3620	-2,6556	3,4262	-	0,978	0,242
ветвей	-1,4387	-3,0056	4,4240	-	0,991	0,227

* SE - стандартная ошибка уравнения

На основе уравнений табл. 2 составлены таблицы фитомассы деревьев осины в двух вариантах: по схеме баварских объемных таблиц (табл. 3) и путем совмещения уравнений со шкалой разрядов высот. Данные табл. 3 подтверждают установленную ранее (Усольцев, 1985) закономерность, согласно которой у деревьев одного и того же диаметра по мере снижения высоты дерева масса ствола уменьшается, а масса кроны - возрастает. Это свидетельствует о различиях в формировании фитомассы ствола и кроны у деревьев различных размеров.

При анализе структуры фитомассы осинников на уровне древостоя, числовые значения которой приведены в табл. 1, установлена положительная связь надземной фитомассы осины (т/га) с возрастом (A , лет): для массы стволов и ветвей коэффициент корреляции r равен соответственно 0,99 и 0,97. Для массы листвы названная связь в исследуемом возрастном диапазоне отрицательная и менее тесная ($r = -0,38$). Однако масса листвы, выраженная в процентах к массе кроны ($\%FC$) и к надземной массе ($\%FA$), связана с возрастом в логарифмических координатах очень тесно ($r = -0,97$ в обоих случаях) и описывается уравнениями соответственно

$$\ln(\%FC) = 5,000 - 0,618 \ln A \quad (3)$$

$$\text{и } \ln(\%FA) = 4,796 - 1,063 \ln A, \quad (4)$$

с помощью которых известную массу стволов в осинниках можно дополнить показателями массы листвы и ветвей.

Результаты табулирования уравнений (3) и (4) показывают (табл. 4), что с увеличением возраста осинников с 5 до 65 лет доля кроны и в том числе листвы в надземной фитомассе снижается соответственно с 55 до

Таблица 3
Фитомасса (в абсолютно сухом состоянии, кг) деревьев осины в омской лесостепи по высоте и диаметру ствола

Диаметр D , см	Высота дерева, м											
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
	Ствол в коре											
8	3,1	5,1	7,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	22,8	30,5	38,8	47,5	56,6	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	77,5	95,7	114,9	135,1	156,1	-	-	-
32	-	-	-	-	-	-	-	224,3	260,2	297,6	336,4	376,6
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	502,8	564,2
Листва												
8	8,0	2,7	1,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	13,7	7,6	4,7	3,1	2,2	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	18,7	12,4	8,7	6,4	4,8	-	-	-
32	-	-	-	-	-	-	-	17,1	12,9	10,0	7,9	6,4
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,1	13,8
Ветви												
8	36,4	10,8	4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	97,2	49,7	28,7	18,1	12,1	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	172,8	108,8	72,8	51,1	37,2	-	-	-
32	-	-	-	-	-	-	-	182,4	132,9	99,8	76,8	60,4
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	206,2	162,1

11% и с 22 до 1 %. Средняя доля кроны и листвы в надземной фитомассе составляет соответственно 16,0 и 2,9 %.

Таблица 4

Изменение процента кроны (FC) и листвы (FA) в надземной фитомассе осинников омской лесостепи с возрастом древостоя

Возраст древостоя, лет	5	15	25	35	45	55	65
FC, %	55	28	20	16	14	12	11
FA, %	22	7	4	3	2	2	1

Фактические значения фитомассы осинников разнотравных Саргатского лесхоза в количестве шести пробных площадей (см. табл. 1) включены в базу данных о фитомассе в качестве биопродукционной характеристики подзоны лесостепи Западно-Сибирской провинции.

Модели распределения фитомассы насаждений *Populus* по регионам Северной Евразии. Все 20 регионов закодированы блоковыми фиктивными переменными X_0, \dots, X_{19} (Дрейпер, Смит, 1973). За исходный принят наивысший уровень продуктивности, соответствующий культурам *P. trichocarpa* и *P. bachelieri* подзоны широколиственных лесов Центральной Европы. Этот уровень закодирован нулями для всех регионов. Каждый из остальных 19 регионов имеет в блоке одну единицу. При расчете уравнения, включающего в себя блоковые переменные, устанавливается степень «дистанцирования», или отличия показателей фитомассы каждого региона от исходного, характеризуемая константой при блоковой переменной для того или иного региона.

Поскольку показатели фитомассы в пределах региона сильно варьируют в связи с различиями возраста, добротности произрастания и морфологии полога, сопоставляются не обезличенные совокупности наблюдений, а многофакторные уравнения вида (1), объясняющие изменчивость фитомассы или ее переводных коэффициентов в пределах региона посредством включенных в них переменных

$$\ln(P_i/M) \text{ или } \ln P_i = f(X_0, \dots, X_{19}, \ln A, \ln H, \ln D, \ln N, \ln M). \quad (5)$$

Включенные в уравнение (5) переменные объясняют 78-99 % изменчивости фитомассы и ее переводных коэффициентов. Система уравнений (5) работает по принципу “Что будет, если...?” и для получения запасов фитомассы в том или ином регионе необходимо задать набор массопределяющих показателей A, H, D, N и запасов M , характерный для региона или его части.

Известно, что продуктивность насаждения определяется по соотношению его возраста и высоты. Поэтому в качестве базовой нами принята зависимость *высота ~ возраст*. Используемый рекурсивный принцип регрессионного моделирования обеспечивает последовательное накопление

региональных различий в возрастной динамике массообразующих показателей и запасов стволовой древесины по цепочке взаимозависимых уравнений:

$$\begin{aligned} \ln H = f(X_0, \dots, X_{19}, \ln A) \rightarrow \ln D = f(X_0, \dots, X_{19}, \ln A, \ln H) \rightarrow \\ \rightarrow \ln N = f(X_0, \dots, X_{19}, \ln A, \ln H, \ln D) \rightarrow \ln M = f(X_0, \dots, X_{19}, \ln H, \ln D, \ln N). \quad (6) \end{aligned}$$

Независимые переменные уравнений (6) объясняют 91-96 % изменчивости массообразующих показателей и запаса стволов. Если с помощью системы уравнений (5) оценивается достоверность региональных различий в структуре фитомассы при условии равенства массообразующих показателей, то система (6) обуславливает достоверность региональных различий самих массообразующих показателей, накапливая вклад каждого из них в конечный результат – запас стволов.

Последовательным табулированием рекурсивных систем уравнений (6) и (5) по задаваемым значениям возраста получены возрастные тренды всех массообразующих показателей и запасов фитомассы по фракциям (стволы, ветви, хвоя, корни, нижние ярусы) для каждого региона. Накопление запасов фитомассы в насаждениях рода *Populus* происходит на всем исследованном возрастном интервале вплоть до 145 лет; в 15 лет запасы фитомассы составляют 26-29 %, в 25 лет – 48-49 %, в 35 лет – 67-68 % и в 145 лет – 180-185 % к запасам в возрасте 55 лет. Наибольшие запасы массы листвы приходится на возраст 55 лет во всех регионах независимо от степени жесткости климатических условий. В работе приведены таблицы возрастных трендов фитомассы осины и тополей по регионам Северной Евразии, которые можно рассматривать в качестве специфичных характеристик видов *Populus* и использовать для сопоставления их биопродуктивности.

География фитомассы спелых насаждений *Populus*, взятой из возрастных ее трендов. Поскольку в широком экологическом и географическом диапазонах (от европейской России до Забайкалья) в базе данных представлен лишь вид *P. tremula*, а остальные распределены локально в сравнительно узких ареалах, география фитомассы проанализирована для рода в целом. Из упомянутых возрастных трендов взяты показатели надземной и общей фитомассы для возраста 55 лет и проанализированы в связи с природной зональностью и континентальностью климата (зональный и провинциальный градиенты). Запасы фитомассы в общих чертах соответствуют общей схеме профиля продуктивности (Лавренко и др., 1955). По широтному градиенту профиль продуктивности фитомассы рода *Populus* наиболее отчетливо выражен в Скандинавско-Русской провинции, где общая фитомасса в подзонах хвойно-широколиственных лесов, широколиственных лесов, лесостепи, степи и в Причерноморье (горный Крым) составляет соответственно 191, 380, 242, 264 и 210 т/га. Эта закономерность повторяется на Востоке Русской равнины: в подзонах северной тайги, южной тайги и степи названный показатель равен соответственно 155, 212 и 107

т/га. На Дальнем Востоке северная тайга представлена общим запасом фитомассы *P. tremula* 103 т/га, а широколиственные леса Японии (*P. davidiana*) – почти вчетверо большим (490 т/га). Наименьшая фитомасса *P. tremula* выявлена в южнотаежной подзоне Средне-Сибирской провинции (71 т/га), непосредственно примыкающей к полосе континентальности.

Из тополей наибольшей фитомассой в приведенном возрасте характеризуются *P. trichocarpa* и *P. bachelieri* в Средне-Европейской провинции, подзоне широколиственных лесов (763 т/га), несколько меньшей – *P. euramericana* в Скандинавско-Русской провинции, той же подзоне (380 т/га), а наименьшей – *P. alba* в степной подзоне (пойма р. Урал) Восточной Русской равнины (107 т/га), *P. pruinosa* в тугаях р. Вахш Памиро-Тяньшанской горной провинции (124 т/га) и *P. laurifolia* в поймах р. Хемчик и Тес-Хем Алтае-Саянской горной провинции в Туве (118 т/га). Последний показатель почти вдвое меньше аналогичного показателя для *P. tremula* в той же провинции (207 т/га).

Примечательно, что согласно картосхеме М. И. Будыко и Н. А. Ефимовой (1968), построенной расчетным путем по индексу сухости и радиационному балансу, подзона южной тайги в Западной Сибири выделяется повышенной продуктивностью фитомассы по сравнению с прилегающими регионами Урала и Средней Сибири. Подобная схема прослеживается и по нашим данным для осинового экосистем: если в Западной Сибири общая фитомасса *P. tremula* составляет 288 т/га, то в той же подзоне Востока Русской равнины – 212 т/га, а в Средней и Восточной Сибири – от 71 до 129 т/га.

Упомянутые показатели фитомассы из возрастных трендов сопоставлены с индексами континентальности, снятыми со схемы ее изолиний (Хромов, 1957). Связь надземной фитомассы *Populus* (P_{abo} , т/га) с индексом континентальности IC описывается уравнением

$$\ln P_{abo} = 5,5355 + 1,0632 (\ln IC) - 0,2938 (\ln IC)^2; R^2 = 0,683 \quad (7)$$

и общей фитомассы (P_{tot} , т/га)

$$\ln P_{tot} = 5,1799 + 1,3909 (\ln IC) - 0,3381 (\ln IC)^2; R^2 = 0,612, \quad (8)$$

которые действительны при $IC > 35-40$. Таким образом, индекс континентальности климата объясняет изменчивость надземной и общей (надземной и подземной) фитомассы *Populus* соответственно на 68 и 61 %.

Результаты табулирования (7) и (8) показывают (табл. 5), что по мере возрастания индекса континентальности от 30 до 100 % происходит последовательное снижение надземной и подземной фитомассы соответственно с 315 до 67 т/га и с 88 до 16 т/га, а изменение отношения подземной фитомассы к надземной (от 0,24 до 0,28) в исследованном диапазоне индекса континентальности статистически не достоверно.

Связь фитомассы рода *Populus*, взятой из расчетных возрастных трендов при $A = 55$ лет, с индексом континентальности климата

Фракции фитомассы	Индекс континентальности							
	30	40	50	60	70	80	90	100
Надземная <i>Pabo</i> , т/га	315	235	181	143	116	95	79	67
Подземная <i>Proot</i> , т/га	88	67	51	39	31	25	20	16
Отношение <i>Proot</i> : <i>Pabo</i>	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,26	0,25	0,24

География фитомассы спелых насаждений *Populus*, взятой из региональных таблиц биопродуктивности. Если выше упомянутые усредненные возрастные тренды фитомассы согласованы между регионами благодаря кодированию последних блоковыми фиктивными переменными, то таблицы биопродуктивности, совмещенные с региональными ТХР, отражают локальные особенности возрастной динамики насаждений.

В основе таблиц биопродуктивности использованы ТХР нормальных и модальных насаждений *Populus*: для Скандинавско-Русской провинции в подзоне хвойно-широколиственных лесов – *P. tremula* (Тюрин и др., 1945; Арещенко, 1958; Михайлов, 1972; Багинский, Моисеенко, 1984; Багинский, 1984; Чернявский, 1993); там же, в подзоне широколиственных лесов – *P. tremula* (Козловский, Павлов, 1967; Лищук, 1987); там же, в подзоне широколиственных лесов и лесостепи – *P. euramericana* (Порицкий, 1987); там же, в подзоне степи – *P. tremula* (Козловский, Павлов, 1967; Смирнов, 1970); для провинции Восток Русской равнины в подзоне степи – *P. alba* (Лозовой, 1978); для Уральской провинции в подзоне южной тайги – *P. tremula* (Лесотаксационный справочник..., 1991; для Западно-Сибирской провинции в подзоне южной тайги – *P. tremula* (Фалалеев, Поляков, 1975; Данилин, 1988); там же, в подзонах лесостепи и степи – *P. tremula* (Кричун, 1987); для Средне-Сибирской провинции в подзоне южной тайги – *P. tremula* (Фалалеев, Поляков, 1975; Данилин, 1975); для Алтае-Саянской провинции в подзоне южной тайги – *P. tremula* (Фалалеев, 1985); там же для *P. laurifolia* (Фалалеев, Поляков, 1975; Немич, 1991б); там же, в подзоне лесостепи – *P. tremula* (Козловский, Павлов, 1967; Фалалеев, Поляков, 1975).

Взяты местные ТХР, отражающие весь спектр лесорастительных условий (все классы бонитета) регионов. Регрессионные модели (5) при соответствующих значениях блоковых фиктивных переменных (X_0, \dots, X_{19}) протабулированы по значениям A, N, H, D и M упомянутых ТХР и в результате получено около 40 таблиц биопродуктивности нормальных и модальных насаждений рода *Populus* для лесной зоны Северной Евразии, которые могут быть использованы при лесоустройстве, а также при оценке приходной части углеродного баланса территорий, в том числе при обосновании «падающих» технологий лесозаготовок (Азаренок, 1998).

При изложенном способе составления таблиц биопродуктивности региональные различия запасов фитомассы раскладываются на две составляющие: с помощью уравнений (5) оценивается степень региональных различий в структуре фитомассы при условии равенства таксационных (массообразующих) показателей, а ТХР в свою очередь характеризуют региональные особенности возрастной динамики последних.

Данные составленных таблиц биопродуктивности свидетельствуют о существенном различии запасов фитомассы *Populus* по провинциальному градиенту в связи с индексом континентальности климата. Показатели как надземной, так и общей фитомассы *Populus*, взятые из составленных таблиц биопродуктивности при значении возраста 55 лет, скоррелированы с индексом континентальности климата (по Хромову, 1957), и эта связь описывается уравнениями

для надземной фитомассы (P_{abo} , т/га)

$$\ln P_{abo} = 4,7370 + 1,1861 (\ln IC) - 0,2803 (\ln IC)^2; \quad R^2 = 0,455 \quad (9)$$

и для общей фитомассы (P_{tot} , т/га)

$$\ln P_{tot} = 5,0881 + 1,0950 (\ln IC) - 0,2651 (\ln IC)^2; \quad R^2 = 0,418. \quad (10)$$

Более низкие значения коэффициентов детерминации R^2 в уравнениях (9) и (10) по сравнению с (7) и (8) обусловлены тем, что в первом случае были включены в анализ расчетные показатели усредненных возрастных трендов для “фоновых” условий произрастания в каждом регионе, тогда как во втором взят весь диапазон лесорастительных условий (классов бонитета), отраженный во всех ТХР данного региона.

Результаты табулирования (9) и (10) показывают (табл. 6), что по мере возрастания индекса континентальности от 30 до 100 %, как и в преды-

Таблица 6

Связь фитомассы рода *Populus*, взятой из таблиц биопродуктивности при $A = 55$ лет, с индексом континентальности климата

Фракции фитомассы	Индекс континентальности							
	30	40	50	60	70	80	90	100
Надземная P_{abo} , т/га	252	200	162	134	112	95	81	70
Подземная P_{root} , т/га	61	50	41	35	30	26	23	21
Отношение $P_{root} : P_{abo}$	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27	0,27	0,28	0,30

дущем варианте, происходит последовательное снижение надземной и подземной фитомассы соответственно с 252 до 70 т/га и с 61 до 21 т/га, а изменение отношения подземной фитомассы к надземной (от 0,24 до 0,30) в исследованном диапазоне индекса континентальности не достоверно.

В целом установлено, что закономерности изменения соотношений надземной и подземной фитомассы *Populus* по зональному и провинциальному градиентам примерно одинаковые как при расчете фитомассы только по данным пробных площадей, так и с использованием ТХР.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФИТОМАССЫ *POPULUS* ПО РЕГИОНАМ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

Исследование региональных закономерностей изменения предельных показателей фитомассы выполнено с использованием последовательной «цепочки» взаимосвязанных многофакторных уравнений. Она состоит из четырех звеньев, каждое из которых представляет отдельный этап статистико-регрессионного анализа региональных различий: сначала верхних пределов высоты среднего дерева, затем - верхних пределов диаметра среднего дерева, далее - предельного запаса стволовой древесины и, наконец, - предельных показателей фитомассы:

$$H_{max} = f(X_0, \dots, X_{19}, A, N) \rightarrow D_{max} = f(X_0, \dots, X_{19}, A, N, H_{max}) \rightarrow \\ \rightarrow M_{max} = f(X_0, \dots, X_{19}, N, H_{max}, D_{max}) \rightarrow \quad (11)$$

$$\rightarrow P_{(i)max}/M_{max} \text{ или } P_{(i)max} = f(X_0, \dots, X_{19}, A, N, H_{max}, D_{max}, M_{max}),$$

где H_{max} - максимальные значения высоты (м) среднего дерева древостоя пробной площади, отобранные в количестве 2-4 значений в древостоях разной густоты, но одного класса возраста и аппроксимированные по A и N с $R^2 = 0,860$. Следующее уравнение в цепочке - для диаметра среднего дерева D (см) рассчитано по всему массиву 216 определений:

$$D = f(X_0, \dots, X_{19}, A, N, H), \quad (12)$$

но поскольку оно табулируется по предельным значениям высоты среднего дерева H_{max} , в системе (11) D заменено на D_{max} . Остальные два уравнения для M_{max} и $P_{(i)max}/M_{max}$ или $P_{(i)max}$ в системе (11) аналогичны соответственно уравнениям для M в системе (6) и для P_i/M или P_i в (5).

В результате последовательного табулирования рекурсивной системы уравнений (11) различия регионов по запасам фитомассы P_i (при условии равенства массообразующих показателей) наложились на различия по запасам стволовой древесины M_{max} , последние наложились на различия H_{max} и D_{max} по регионам и была получена соответствующая иерархия результирующих кривых запасов фитомассы $P_{(i)max}$. В результате каждый класс возраста A характеризуется в логарифмических координатах колоколообразной кривой, их правые ветви пересекаются и точки пересечения при $\Delta A \rightarrow 0$ образуют огибающую кривую, которая является предельной для данного густотного диапазона по условию самоизреживания и дифференцирована по регионам. Установлено, что предельные показатели фитомассы повышаются по мере снижения густоты и соответствующего увеличения возраста насаждения и достигают максимума при числе деревьев 100-300 на 1 га как по надземной, так и по общей фитомассе в возрасте около 100 лет, а по массе листьев - в возрасте 40-50 лет при густоте 2000 деревьев на 1 га.

Сопоставление предельных траекторий (линий самоизреживания) массообразующих показателей и показателей фитомассы с соответствующими траекториями, взятыми из таблиц биопродуктивности «нормальных» древостоев *Populus*, показало, что последние проходят существенно ниже траекторий самоизреживания. Если «нормальная» траектория проходит через значения густоты, близкие к оптимальным, т.е. соответствует чаще всего максимальным значениям продуктивности в каждом возрасте, то предельная при тех же густотах соответствует возрасту, обычно большему на 3-5 классов, и в этом состоит принципиальное различие траекторий фитомассы по предельным и оптимальным густотам.

Предельные значения фитомассы разных фракций, снятые с региональных графиков и нанесенные на схему зонального и провинциального деления территории Северной Евразии показывают те же закономерности распределения фитомассы, что и средние значения, снятые с густотных трендов и взятые из таблиц биопродуктивности для возраста 55 лет: как и в предыдущих случаях, предельные показатели фитомассы снижаются по мере ужесточения климатических условий как в направлении с юга на север, так и в направлении к полюсу континентальности.

Связь предельных значений надземной и общей фитомассы с индексом континентальности климата в пределах всего ареала рода *Populus* в Северной Евразии аппроксимирована уравнениями:

$$\ln P_{abo} = 6,9054 + 0,8621 (\ln I/C) - 0,2994 (\ln I/C)^2; R^2 = 0,728 \quad (13)$$

и по общей фитомассе (P_{tot} , т/га)

$$\ln P_{tot} = 7,6550 + 0,5772 (\ln I/C) - 0,2627 (\ln I/C)^2; R^2 = 0,733. \quad (14)$$

Результаты табулирования уравнений (13)-(14) показывают (табл. 7), что предельные показатели надземной и подземной фитомассы существенно изменяются по провинциальному градиенту, но их соотношение остается, как и в предыдущих вариантах, стабильным.

Таблица 7

Соотношения предельных показателей фракций фитомассы в связи с индексом континентальности климата

Фракции фитомассы	Индекс континентальности							
	30	40	50	60	70	80	90	100
Надземная P_{abo} , т/га	586	408	298	225	175	139	112	92
Подземная P_{root} , т/га	203	129	85	57	39	27	18	12
Отношение $P_{root} : P_{abo}$	0,23	0,22	0,21	0,22	0,22	0,23	0,24	0,25

6. ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ О ФИТОМАССЕ ОСИННИКОВ НА ЛЕСОПОКРЫТУЮ ПЛОЩАДЬ РЕГИОНА (на примере Невьянского лесхоза Свердловской области)

Регрессионные модели фитомассы (5) совмещены с данными ГУЛФ с целью расчета запасов фитомассы осины на лесопокрытой площади. Использовали алгоритм В. А. Усольцева (1998) и программу А. А. Сальникова (Сальников, Усольцев, 1999) для экстраполяции уравнений фитомассы на площадь, занимаемую осиной в Невьянском лесхозе Свердловской области – 7073 га, при общем запасе 46,6 тыс. м³ и средней площади выдела 2,2 га. Установлено, что в общей фитомассе осинников Невьянского лесхоза (403 тыс. т) на долю стволов, корней, ветвей, хвои и нижних ярусов приходится соответственно 54, 35, 8, 2 и 1% (с учетом доли осины в составе). По классам бонитета (I, II, III и IV) общая фитомасса распределена в соотношении соответственно 3, 77, 19 и 1%, по группам полнот (0,4; 0,7 и 1,0) – соответственно 3, 81 и 16%, по классам возраста (II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X) – соответственно 2, 3, 32, 20, 33, 3, 5, 1, 1%.

ВЫВОДЫ

1. В осинниках омской лесостепи у деревьев одинакового диаметра по мере снижения высоты дерева масса ствола уменьшается, а масса кроны – возрастает, что свидетельствует о различиях в формировании фитомассы ствола и кроны у деревьев различных размеров. С увеличением возраста осиновых насаждений с 5 до 65 лет доля кроны и листвы в надземной фитомассе снижается соответственно с 55 до 11% и с 22 до 1% при средних показателях соответственно 16,0 и 2,9%.
2. Сформированная база данных о фитомассе *Populus*, включающая в себя 216 определений на территории Евразии, позволила рассчитать многофакторные регрессионные модели фитомассы и совместить их: а) с возрастными трендами массообразующих показателей, полученными только по материалам сформированной базы данных пробных площадей, с целью выявления региональных различий фитомассы древостоев; 2) с основными региональными ТХР для инвентаризации фитомассы насаждений; 3) с предельными траекториями массообразующих показателей насаждений с целью оценки потенциальных возможностей депонирования углерода лесными экосистемами и 4) с повидельным банком данных ГУЛФ.
3. Фитомасса видов *Populus* снижается по мере ужесточения климатических условий как по зональному, так и по провинциальному градиентам, при этом отношение подземной фитомассы к надземной остается практически неизменным.
4. Впервые для ареалов основных видов *Populus* составлен комплект нормативов, включающий в себя около 40 таблиц биологической продуктив-