

A  
Электронный архив УГЛТУ

На правах рукописи

Ольга -

Петелина Ольга Александровна

Запасы углерода в фитомассе естественных сосновых  
Сибирий Евразии и их географический анализ

Специальность 06.03.03. - лесоведение, лесоводство;  
лесные пожары и борьба с ними

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата сельскохозяйственных наук

Екатеринбург - 2004

Работа выполнена в Уральском государственном лесотехническом университете.

Научные руководители -

доктор сельскохозяйственных наук  
профессор В. А. Усольцев;  
доктор сельскохозяйственных наук  
профессор Л. И. Аткина

Официальные оппоненты -

доктор биологических наук профессор  
С. Г. Шиятов,  
кандидат сельскохозяйственных наук  
В. В. Кириллова

Ведущая организация -

Свердловская лесоустроительная экспедиция

Защита состоится 30 сентября 2004 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 25 августа 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор сельскохозяйственных наук профессор *Аткина* Л. И. Аткина

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Последние 12-15 тысяч лет были эпохой преобразования человеком природы, и результативность его творческой деятельности всегда оценивалась по эффективному вкладу в ее покорение и преобразование. В итоге развитие цивилизации и состояние биосфера вошли в глубочайшее противоречие, и сегодня нет более широко обсуждаемого понятия, чем «устойчивое развитие». Перспектива антропогенной потери устойчивости биосфера сегодня наиболее реальна и по своей опасности для человеческой истории превалирует над последствиями глобального потепления, антропогенный характер которого пока не доказан (Сун и др., 2001; Тарко, 2001; Яншин, 2001; Котляков, 2001; Иноземцев, 2002; Кондратьев, 2002; Демирчян и др., 2002).

Известно, что основой функционирования биосферы является ее биологическая продуктивность, и от последней зависит жизнь человека и всех гетеротрофных организмов. Сегодня фитомасса лесов рассматривается как их основная характеристика, определяющая ход процессов в лесных экосистемах и используемая в целях экологического мониторинга, устойчивого ведения лесного хозяйства, моделирования продуктивности лесов с учетом глобальных изменений, изучения структуры и биоразнообразия лесного покрова, оценки углерододепонирующей емкости лесов (Fowler et al., 2002). Необходимость разработки новых методов оценки запасов углерода, поглощаемого лесами из атмосферы и депонированного в лесных экосистемах, признана в 1997 г. XI Всемирным лесным конгрессом в г. Анталья в Турции. Реализации этой задачи на примере естественных сосновых Северной Евразии посвящена настоящая работа.

Исследования автора проводились в 2002-2004 гг. в рамках проектов «Региональные закономерности депонирования углерода экосистемами основных лесных формаций России» и «Оценка запасов углерода и углеродно-кислородного бюджета в лесных экосистемах Уральского региона», гранты РФФИ №№ 00-05-64532 и 01-04-96424 (руководитель проектов – профессор Усольцев В. А.).

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы - изучение структуры органического углерода, депонируемого в фитомассе естественных сосновых, на двух уровнях – локальном и глобальном. В первом случае ставилась цель оценки распределения углерода в фитомассе естественных сосновых Южного Урала в сравнении с лесными культурами, а во втором – анализировались географические особенности распределения по регионам Северной Евразии запасов углерода в фитомассе естественных сосновых, полученных: (а) по материалам сформированной базы данных, (б) по предельным (по условию самоизреживания) густотным траекториям и (в) по таблицам хода роста сосновых по запасу углероду.

Наименование диссертации  
Учебное заведение  
г. Екатеринбург

В связи с поставленной целью конкретными задачами исследования были:

- изучить особенности структуры органического углерода, депонируемого в фитомассе сосняков естественного и искусственного происхождений в условиях Южного Урала;
- на основе привлеченных и собственных экспериментальных данных о фитомассе естественных сосновых древостоев выявить зональные и провинциальные закономерности распределения запаса углерода в них;
- выявить зональные и провинциальные закономерности изменения предельных запасов углерода в фитомассе естественных сосняков;
- составить таблицы хода роста естественных сосняков по содержанию углерода в их фитомассе по регионам Северной Евразии и установить географические закономерности его распределения.

Перечисленные положения выносятся на защиту.

**Научная новизна.** Впервые выполнена сравнительная оценка естественных и искусственных сосняков по содержанию углерода в их фитомассе в условиях Южного Урала. Собрана наиболее полная коллекция экспериментальных данных о фитомассе естественных сосновых насаждений Северной Евразии, существенно превышающая объем всех известных сводок подобных данных. Это позволило впервые для сосняков разработать систему универсальных региональных моделей динамики фитомассы и проанализировать на их основе географические закономерности распределения запасов углерода: а) полученных непосредственно по материалам пробных площадей, б) рассчитанных по предельным густотным траекториям и в) взятых из составленных таблиц хода роста естественных сосняков по содержанию углерода в их фитомассе.

**Практическая значимость работы** состоит в разработке нормативных материалов, необходимых при расчетах углеродного бюджета лесных экосистем Северной Евразии, при реализации систем лесохозяйственных мероприятий, направленных на повышение продуктивности и комплексного освоения сосновых насаждений Северной Евразии. Результаты работы могут быть полезны при разработке лесного кадастра, осуществлении лесного мониторинга и экологических программ разного уровня.

Разработанные нормативы используются Московским, Северным, Поволжским, Западно-Сибирским и Восточно-Сибирским государственными лесоустроительными предприятиями, а также Пермской, Ульяновской и Омской лесоустроительными экспедициями (имеются справки о внедрении) при устройстве сосновых лесов.

**Обоснованность выводов и предложений.** Использование обширного экспериментального материала и современных методов статистического анализа, системный подход при содержательном анализе фактических материалов и интерпретации полученных результатов, реализация поставленных задач на уровне многофакторных регрессионных моде-

лей, 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 изложены на научно-технической конференции студентов и аспирантов УГЛТУ, 2003; Международной научно-технической конференции «Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса», Екатеринбург, 2002; II Международной конференции молодых ученых «Леса Евразии в XXI веке: Восток-Запад», Москва, 2002; III Всероссийской научно-технической конференции «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях», Бийск, 2002; II Международной конференции «Биоразнообразие и биоресурсы Урала и сопредельных территорий», Оренбург, 2002; Международной научно-практической конференции «География и регион. Биогеография и биоразнообразие Прикамья», Пермь, 2002; Международной научно-практической конференции «Аэрокосмические методы в лесном комплексе», СПб, 2002; Международной научно-практической конференции «Лесной комплекс: состояние и перспективы развития», Брянск, 2002.

**Публикации.** Основное содержание диссертации изложено в 14 печатных работах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 103 страницах машинописного текста, состоит из введения, 7 глав, заключения и 4 приложений. Список использованной литературы включает 286 наименований, в том числе 72 иностранных. Текст иллюстрирован 21 таблицей и 26 рисунками.

## СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Распределение растений на земной поверхности, или их ареал, по В. Н. Сукачеву (1938), есть следствие двух определяющих факторов: биологических свойств самих растений и влияния на них физико-географических условий. По А. И. Толмачеву (1962), они интерпретируются соответственно как приспособляемость того или иного вида к различным условиям и изменяемость этих условий в пространстве и времени. В последнем случае предполагается связь расселения растений с климатом и почвами, с одной стороны, и с геологической историей – с другой, что составляет предмет соответственно экологической и исторической географии (Алексин и др., 1961).

Сосна обыкновенная - *Pinus sylvestris* L. в Северной Евразии обладает наиболее обширным ареалом и максимальной экологической амплитудой. В процессе филогенеза сосна приспособилась к предельно жестким

условиям произрастания как на северном, так и на южном пределах ареала. Пониженную требовательность к теплу в притундровой зоне объясняют проявлением адаптационной компенсации недостатка тепла повышенным световым довольствием, а также – высокой поглотительной активностью корневым довольствием. На южном пределе сосна компенсирует недостаток влаги и элементов питания экстремально интенсивным развитием всасывающих корней, составляющих по массе 65-82 % от всей корневой системы (Усольцев, 1988). Соответственно на северном и южном пределах ареала сосна характеризуется наименьшей производительностью, достигая максимальных значений последней в подзонах южной тайги и лесостепи. Однако в отношении производительности сосны по меридиональному градиенту имеющиеся данные носят противоречивый характер.

Факторы, определяющие продуктивность лесных экосистем, зависят от того, на каком уровне она изучается. Первый иерархический уровень – климатический, представлен в пределах ареала вида или континента, и рассмотрена потенциальная продуктивность лесных экосистем в зависимости от гидротермических условий климата. Второй уровень – эдафический, проанализирован в пределах региона в связи с эдафическими факторами. Третий уровень – ценотический, рассмотрен в пределах экотопа. Поскольку предельная продуктивность оценивается в связи с самоизреживанием древостоев, а ход самоизреживания – в связи с густотой, то последняя является наиболее информативной переменной при расчете предельной продуктивности.

Фитомасса и углерод являются по существу синонимами и количественно связаны соотношением 2:1. Разработанная В. А. Усольцевым (1998) методика позволяет по данным оценки фракционного состава фитомассы древостоев лесообразующих пород на временных пробных площадях разработать специальную систему рекурсивных регрессионных моделей и результаты их табулирования экстраполировать на ту или иную лесопокрытую площадь с выявлением соответствующих географических закономерностей.

Поскольку сетку географических координат нельзя применять для адекватного математического описания географических закономерностей продуктивности лесного покрова (Герасимов, 1945; Григорьев, Будыко, 1956; Герасимов, Зимина, 1986), в этих целях используются косвенные географические характеристики, определяющие структуру и продуктивность растительного покрова, а именно – гидротермические показатели климата.

При первых оценках биологической продуктивности лесов и депонирования углерода, выполненных на евразийском континенте, использовались экспериментальные данные небольшого числа пробных площадей, которые экстраполировались на достаточно обширные площади (Базилевич, Родин, 1967). Их репрезентативность была неизвестна, критерий вос-

производимости оценки фитомассы и связываемого ею углерода отсутствовал. Отказавшись от прямой экстраполяции данных об углероде в фитомассе, полученных на пробных площадях, завышающей среднерегиональные оценки в 2-3 раза, М. Ф. Макаревский (1991) впервые в России на примере Карелии совместил данные фитомассы с данными государственного учета лесного фонда. Подобный подход применительно ко всей территории страны получил затем наибольшее распространение (Исаев и др. 1993; Алексеев, Бердси, 1994; Швиденко и др., 2000).

В реализации концепции устойчивого развития значительное внимание уделяется снижению антропогенных выбросов наиболее обильного биогена – углерода и связыванию атмосферной углекислоты лесным покровом. Предполагают, что путем интенсивного лесоразведения можно скомпенсировать 11-15% антропогенных выбросов CO<sub>2</sub> (Brown, 1996). Лесные культуры, особенно молодые, связывают атмосферный углерод более интенсивно в сравнении с естественными насаждениями, однако их биологическая продуктивность изучена слабо, в частности, в сравнении с естественными насаждениями..

В значительно большей степени изучены лесные культуры и естественные насаждения в аспекте их формирования и роста. Особенности формирования искусственных сосновок получили отражение в работах: по европейской части РФ – В.И. Рубцова (1964, 1969); И.М. Науменко (1939, 1960, 1979), В.П. Тимофеева (1965), А.С. Царькова (1967, 1969, 1970), А.Д. Дударева и В.В. Успенского (1969), В.В. Успенского и В.К. Попова (1974), в пределах восточноевропейской равнины - А.Н. Полякова, П.Ф. Ипатова, В.В. Успенского (1986); на Европейском Севере - Л.Ф. Ипатова (1974); в Белоруссии - Ф.М. Золотухина (1966), В.С. Мирошникова (1971, 1974), В.А. Никитина (1981); на Украине – Д.И. Вуевского (1940), В.П. Старostenко (1967); в Литве – И. Григалюнаса (1967); на Урале - в работах М.Н. Прокопьева (1975а,б, 1976, 1977, 1978а,б, 1981, 1983), А.В. Поповой (1972), А.М. Никитина (1967), Р.П. Исаевой и Н.А. Луганского (1972), М.Н. Егорова (1972, 1996), И.Ф. Коростелёва (1975, 1988), В.А. Макарова (1986), И.Ф. Коростелёва и В.А. Злоказова (1988).

Исследования, выполненные С. В. Залесовым с соавторами (2002) на Среднем Урале, показали, что в целом сосновые древостои искусственного происхождения имеют более высокие темпы роста по сравнению с естественными. Произрастающая в одинаковых лесорастительных условиях, искусственные сосновые древостои имеют более высокие запасы по сравнению с сосновками естественного происхождения. К возрасту спелости искусственные сосновки имеют на 36% более высокую производительность по сравнению с сосновыми древостоями естественного происхождения.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНОВ И ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сравнительные исследования структуры органического углерода в составе фитомассы естественных и искусственных сосновых проводены в Катав-Ивановском лесхозе Челябинской области. Лесхоз расположен в западной части области на территории Катав-Ивановского административного района и относится к горнотаежному лесохозяйственному району. Приведена краткая природная характеристика района исследования, описаны климат, рельеф и почвы, дана характеристика лесного фонда.

В ходе выполнения программы исследования для оценки запасов углерода в надземной фитомассе в чистых естественных и искусственных молодняках сосны заложены 10 пробных площадей (табл. 1). Подобраны наиболее характерные, типичные для лесхоза участки как естественных насаждений, так и культур (соответственно 5 и 5 пробных площадей). Модельные деревья взяты в количестве 5 (в естественных сосновых) или 3 экз. (в культурах) на каждой пробе, в пределах всего диапазона ступеней толщины. Получены данные о структуре надземной фитомассы 25 и 15 (всего 40) модельных деревьев соответственно в естественных молодняках и культурах в возрасте от 10 до 40 лет.

Таблица 1

Таксационная характеристика пробных площадей, заложенных в естественных и искусственных сосновых Катав-Ивановского лесхоза

№ про- бы	Воз- раст, лет	Средние		Гус- тота, экз./га	Сумма площадей сечений, м <sup>2</sup> /га	Запас, м <sup>3</sup> /га	Класс бони- тета
		Диаметр, см	Высота, м				
<b>Естественные молодняки</b>							
1е	10	3,2	1,8	9750	7,84	10,5	III
2е	15	7,7	5,7	2345	10,9	76,6	II
3е	20	7,4	8,6	3100	13,3	89,2	II
4е	30	14,3	16,3	1024	16,5	128	II
5е	40	14,4	17,8	792	12,9	109	III
<b>Культуры</b>							
1к	10	3,3	2,5	2260	1,93	6,3	II
2к	15	4,5	3,8	3100	4,93	9,1	II
3к	20	7,3	13,6	1415	5,92	30,9	III
4к	30	12,6	15,2	1524	19,0	87,1	II
5к	40	15,7	17,6	1040	20,1	202	II

В нашей работе предпринят поиск всей накопленной в литературных источниках информации о фактических запасах углерода в фитомассе и сформирована соответствующая база данных для естественных сосновых,

широко представленных в Северной Евразии. Она включает в себя 1223 определения, которые позаимствованы из 182 литературных источников и сопровождаются полной таксационной и частично лесотипологической характеристиками пробных площадей.

В базу данных входят: 1202 определения для сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. (провинции Средне-Европейская, Скандинавско-Русская, Восток Русской равнины, Уральская, Западно-Сибирская, Средне-Сибирская, Восточно-Сибирская, Забайкальская, Алтае-Саянская), 11 – для сосны черной *P. nigra* Ait. (Средне-Европейская провинция), 2 – для сосны приморской *P. pinaster* (Sol.) Ait. (Средне-Европейская провинция); 5 – для сосны крючковатой *P. hamata* D. Sosn. (Причерноморская провинция) и 3 – для сосны густоцветной *P. densiflora* S. et Z. (Япония). Экспериментальные данные после нанесения на схему зонально-провинциального деления территории (Базилевич, Родин, 1967; Курнаев, 1973; Смагин и др., 1978) распределились по 31 региону.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Пробные площади закладывались с учетом теоретических положений лесной таксации согласно ОСТ 56-69-83 «Пробные площади лесоустройствительные». Размеры пробных площадей устанавливали в соответствии с требованиями, предъявляемыми при изучении хода роста древостоеv.

На пробных площадях выполняли сплошной перечет деревьев по ступеням толщины без выделения подчиненной части. После перечета у 15-20 растущих деревьев при помощи высотомера измеряли высоты, а также диаметры с точностью до одного миллиметра. По этим данным строили графики высот деревьев в зависимости от диаметров, которые использовались для определения средней высоты древостоя элемента леса.

Систематическую выборку модельных деревьев формировали в соответствии с рядом распределения деревьев по диаметру. Модельные деревья отбирались средними по диаметру, высоте и размерам кроны для ступени толщины в пределах всего диапазона варьирования их диаметров на плошади.

Модельные деревья брали в августе месяце после полного формирования хвои. 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 устанавливался по числу годичных слоев на пне.

После обрубки кроны взвешивали с точностью 50 г на весах грузоподъемностью 10-20 кг. Затем секаторами отделяли древесную зелень – охвоенные побеги толщиной 0,4-0,8 см и оставшийся скелет кроны вновь взвешивали.

Доля хвои в древесной зелени определялась по навескам, взятым в средней части кроны, и по ней рассчитывалась масса хвои всего дерева. Масса хвои и скелета кроны переводилась на абсолютно сухое состояние термо-весовым методом по взятым навескам. Путем обмера диаметров в коре и без коры по 10 сечениям ствола рассчитаны объемы древесины и коры ствола и по базисной плотности – их масса.

Показатели фитомассы в абсолютно сухом состоянии пересчитывались на углерод по известным, достаточно стабильным конверсионным коэффициентам: 0,45 для хвои и 0,5 для остальных компонентов (Кобак, 1988).

Экспериментальные значения запаса углерода в фитомассе на пробных площадях в расчете на 1 га ( $C_b$ , т/га) определены по соотношению площадей сечений:  $C_b = (\Sigma c_i / \Sigma g_i) G$ , где  $G$  – сумма площадей сечений древостоя на пробной площади, м<sup>2</sup>/га;  $\Sigma c_i$  и  $\Sigma g_i$  – соответственно суммарный запас углерода в данной фракции фитомассы и суммарная площадь сечений всех моделей на пробе. Метод по точности не уступает регрессионному (Madgwick, 1982).

## УГЛЕРОД НАДЗЕМНОЙ ФИТОМАССЫ ЕСТЕСТВЕННЫХ СОСНЯКОВ В СРАВНЕНИИ С КУЛЬТУРАМИ В КАТАВ-ИВАНОВСКОМ ЛЕСХОЗЕ

При оценке фитомассы деревьев и древостоев используются в качестве регрессоров легко измеряемые массообразующие показатели соответственно деревьев либо древостоев. При расчетах углерододепонирующей емкости лесных экосистем часто необходимы упрощенные регрессионные уравнения и составленные на их основе таблицы по образцу традиционных объемных или сортиментных таблиц с двумя входами - диаметром и высотой дерева. За рубежом подобные уравнения используют также при лесоинвентаризации запасов фитомассы и углерода на лесопокрытых площадях (Bonnor, 1985; Penner, 1997) и составлении таблиц хода роста фитомассы древостоев (Лакида, 2002).

Обычно используется двухфакторная зависимость

$$P_i = f(H, D), \quad (1)$$

которая в форме линеаризованного уравнения множественной статической аллометрии (Усольцев, 1988) имеет вид

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

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);  $\ln$  – обозначение натурального логарифма.

С целью выяснить возможности оценки фракционного состава фитомассы дерева по двум наиболее легко определяемым его показателям,

а также выявить степень достоверности различий в названном составе у естественных молодняков и культур при одних и тех же значениях названных показателей, по совокупности 40 определений фитомассы рассчитаны регрессионные уравнения:

$$\ln P_s = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln D + X, \quad (3)$$

$$\ln P_f = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln D + X, \quad (4)$$

$$\ln P_b = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln P_f + X, \quad (5)$$

где  $P_s$ ,  $P_f$  и  $P_b$  – масса в свежесрубленном состоянии соответственно ствола, хвои и ветвей, кг;  $X$  – бинарная переменная, равная 0 для естественных сосновок и 1 – для культур.

При расчете уравнений константа при  $X$  оказалась со знаком минус в (3), со знаком плюс в (4) и со знаком минус в (5). Это означает, что при одних и тех же размерах ствола его масса в культурах несколько ниже, чем в естественных сосновках (вследствие меньшей полнодревесности), масса хвои при тех же условиях выше, а масса ветвей при одних и тех же диаметре и массе хвои – ниже, что согласуется с меньшей густотой культур в I классе возраста (пробные площади 1-3). Однако во II классе возраста соотношение густот меняется на обратное (пробные площади 4-5).

В итоге в уравнениях (3), (4) и (5) значимость констант при  $X$  по Стюденту оказалась равной соответственно  $-0,59$ ,  $+1,51$  и  $-0,65$ , что ниже стандартного значения, равного 2,0 и свидетельствует о недостоверности различий в структуре надземной фитомассы деревьев в естественных сосновках и культурах при одних и тех же линейных размерах ствола. Это явилось основанием рассчитать следующие уравнения, общие для естественных сосновок и культур:

$$\ln P_s = -2,6918 + 1,1024 \ln H + 1,5848 \ln D; \quad R^2 = 0,961, \quad (6)$$

$$\ln P_f = -2,5492 - 0,6305 \ln H + 2,2244 \ln D; \quad R^2 = 0,793, \quad (7)$$

$$\ln P_b = -1,2069 + 0,7753 \ln H + 0,8880 \ln P_f; \quad R^2 = 0,967, \quad (8)$$

Путем последовательного табулирования уравнений (6), (7) и (8) получена таблица для оценки структуры фитомассы деревьев в сосновых молодняках по двум входам – диаметру и высоте ствола. По конверсионным коэффициентам (Кобак, 1988), значения фитомассы переведены на показатели углерода (табл. 2).

Экспериментальные значения запасов углерода на пробных площадях в расчете на 1 га (табл. 3) определены, как уже упоминалось выше, по соотношению площадей сечений. Оказалось, что в возрасте с 10 до 30 лет содержание углерода в фитомассе культур сосны существенно ниже, чем в естественных сосновках, и лишь в возрасте 40 лет ситуация меняется на противоположную. Для того, чтобы можно было судить в целом о запасах углерода в насаждениях в зависимости от их происхождения в условиях Катав-Ивановского лесхоза, данные таблицы 3

были подвергнуты статистическому анализу с использованием бинарной переменной.

Таблица 2

Общая таблица для оценки запаса углерода в надземной фитомассе деревьев в естественных молодняках и культурах сосны в зависимости от высоты и диаметра ствола, кг на 1 дерево

Высота дерева, м	Диаметр ствола на высоте груди, см							
	2	6	10	14	18	22	26	30
<b>Ствол</b>								
2	0,22	1,25	2,80	-	-	-	-	-
6	0,74	4,18	9,40	16,0	23,8	32,7	-	-
10	1,29	7,35	16,5	28,1	41,8	57,5	75,0	-
14	-	10,6	23,9	40,7	60,5	83,3	108	136
18	-	-	31,5	53,5	80,0	110	143	180
22	-	-	39,3	67,0	99,8	137	179	224
26	-	-	-	80,5	120	165	215	270
<b>Хвоя</b>								
2	0,11	0,05	0,04	-	-	-	-	-
6	1,22	0,61	0,44	0,36	0,31	0,27	-	-
10	3,81	1,90	1,38	1,12	0,95	0,84	0,76	-
14	-	4,03	2,92	2,36	2,02	1,77	1,60	1,46
18	-	-	5,09	4,13	3,52	3,11	2,79	2,55
22	-	-	7,97	6,44	5,49	4,86	4,37	3,99
26	-	-	-	9,36	7,97	7,02	6,35	5,81
<b>Ветви</b>								
2	0,06	0,04	0,03	-	-	-	-	-
6	1,31	0,71	0,53	0,44	0,38	0,34	-	-
10	5,36	2,89	2,17	1,80	1,56	1,40	1,27	-
14	-	7,29	5,49	4,55	3,94	3,52	3,21	2,96
18	-	-	10,9	9,05	7,88	7,02	6,39	5,90
22	-	-	19,0	15,7	13,7	12,2	11,1	10,3
26	-	-	-	24,9	21,6	19,3	17,6	16,2

Регрессионный анализ достоверности различий естественных сосняков и культур на уровне древостоя по связи таксационных показателей и запасов углерода фитомассы с возрастом  $A$  показал, что достоверность констант при бинарной переменной по Стьюденту для среднего диаметра, средней высоты, густоты, суммы площадей сечений, запаса стволов, запаса углерода в массе стволов, массе хвои и общей надземной определяется значениями соответственно  $-0,81; 0,32; 1,1; -0,74; -0,64; -0,80; -1,59$  и  $-1,17$ . Иными словами, углерододепонирующая

емкость надземной фитомассы в культурах несколько ниже, чем в естественных молодняках того же возраста, однако это различие статистически не достоверно.

Таблица 3

Фракционная структура органического углерода в надземной фитомассе естественных молодняков и культур сосны на пробных площадях

№ пробы	Возраст, лет	Средние		Сумма площадей сечений, м <sup>2</sup> /га	Запас, м <sup>3</sup> /га	Запас углерода, т/га		
		Диаметр, см	Высота, м			Стволы	Ветви	Хвоя
<b>Естественные молодняки</b>								
1е	10	3,2	1,8	7,84	10,5	2,01	0,92	0,86
2е	15	7,7	5,7	10,9	76,6	15,3	2,07	1,48
3е	20	7,4	8,6	13,3	89,2	17,85	5,65	2,57
4е	30	14,3	16,3	16,5	128	27,25	4,00	1,32
5е	40	14,4	17,8	12,9	109	23,1	3,45	0,85
<b>Культуры</b>								
1к	10	3,3	2,5	1,93	6,3	1,25	0,63	0,80
2к	15	4,5	3,8	4,93	9,1	1,83	0,52	0,53
3к	20	7,3	13,6	5,92	30,9	6,20	1,50	0,97
4к	30	12,6	15,2	19,0	93,5	18,55	1,32	0,85
5к	40	15,7	17,6	20,1	202	40,5	3,23	1,13

Таким образом, вывод о более высокой производительности лесных культур по сравнению с естественными молодняками на Среднем Урале в условиях Южного Урала на уровне отдельных деревьев не подтвердился, а на уровне древостоя подтвержден частично: культуры превосходят естественные сосняки по общей углерододепонирующей емкости лишь к возрасту 40 лет.

### МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ФИТОМАССЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ СОСНЯКОВ И ИХ ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

В качестве предпосылки корректного анализа и унифицированного описания географических закономерностей распределения углерода фитомассы лесных экосистем принято условие, обеспечивающее взаимную сопоставимость ее показателей по экорегионам. Сопоставимость обеспечивается специальными математико-статистическими приемами.

Совокупность показателей биопродуктивности в пределах региона сильно варьирует в связи с различиями показателей морфоструктуры. Поэтому для обеспечения корректности сопоставлений, во-первых, сравни-

ваются не региональные совокупности фактических данных, а многофакторные регрессионные модели фитомассы (9), объясняющие изменчивость фитомассы ( $P_i$ ) или ее переводных коэффициентов ( $P_i/M$ ) в пределах региона посредством включенных в них переменных, в частности, возраста ( $A$ , лет) и основных показателей морфоструктуры древостоев – запаса стволовой древесины ( $M$ ,  $m^3/га$ ), густоты ( $N$ , тыс. экз/га), средних высоты ( $H$ , м) и диаметра стволов ( $D$ , см):

$$\ln(P_i/M) \text{ или } \ln P_i = f(\ln A, \ln H, \ln D, \ln N, \ln M), \quad (9)$$

где  $P_i$  – фитомасса  $i$ -й фракции ( $P_S, P_{SB}, P_F, P_B, P_R$  и  $P_U$  – соответственно стволов с корой, коры стволов, хвои, ветвей, корней и нижних ярусов растительности) в абсолютно сухом состоянии, т/га.

Во-вторых, используется прием, обеспечивающий внутреннюю согласованность уравнений, описывающих фракционную структуру фитомассы насаждений, которые связываются между собой по рекурсивному принципу. В частности, масса одной фракции (например, стволовой древесины), выступающая в качестве зависимой переменной в первом уравнении системы, в следующем уравнении выполняет роль одного из предикторов при оценке массы листвы. Последняя далее вводится в качестве одного из предикторов при оценке массы скелета кроны и т.д.

Система уравнений (9) предназначена для оценки фракционной структуры фитомассы лесных экосистем в пределах экорегиона при известных показателях их морфоструктуры. Поскольку последняя у одной и той же древесной породы в разных экорегионах различается, то для приведения названных систем уравнений к сопоставимому по экорегионам виду применен третий математико-статистический прием – введение в упомянутые уравнения блоковых фиктивных переменных (Дрейпер, Смит, 1973), характеризующих принадлежность локального массива данных к тому или иному экорегиону. Константа при блоковой фиктивной переменной характеризует степень относительного «дистанцирования», или смещения показателей фитомассы разных экорегионов, и представляет собой своеобразную поправку на межрегиональные различия морфоструктуры насаждений, опосредующей климатические особенности данного экорегиона.

Распределение фактических данных о запасах фитомассы сосняков закодировано блоковыми фиктивными переменными  $X_0, …, X_{30}$ , которые включены в уравнения (9) с целью установления степени отличия показателей фитомассы каждого региона от базового, соответствующего естественным соснякам подзонам широколиственных лесов Западной Европы:

$$\ln(P_i/M) \text{ или } \ln P_i = f(X_0, …, X_{30}, \ln A, \ln H, \ln D, \ln N, \ln M). \quad (10)$$

Характеристика уравнений (10) подтверждает их достаточную адекватность фактическим данным ( $R^2 = 63\text{-}98\%$ ).

Уравнения (10) работают по принципу “Что будет, если...?” и обеспечивают сопоставимость фракционного состава фитомассы разных экорегионов, если в эти уравнения подставить какие-то средние цифровые значения  $A, H, D, N$  и  $M$ . Но значения названных морфометрических (массообразующих) показателей древостоев не являются общими для всех экорегионов, а изменяются при переходе от одного к другому. Поэтому вначале выявляются различия экорегионов по каждому из массообразующих показателей, объединенных в систему рекурсивных (взаимозависимых) уравнений:

$$\begin{aligned} \ln H &= f(X_0, …, X_{30}, \ln A) \rightarrow \ln D = f(X_0, …, X_{30}, \ln A, \ln H) \rightarrow \\ &\rightarrow \ln N = f(X_0, …, X_{30}, \ln A, \ln H, \ln D) \rightarrow \\ &\rightarrow \ln M = f(X_0, …, X_{30}, \ln A, \ln H, \ln D, \ln N). \end{aligned} \quad (11)$$

Независимые переменные в уравнениях (11) объясняют 79-95 % изменчивости массообразующих показателей и запаса древостоев.

Если с помощью системы уравнений (10) оценивается степень региональных различий в структуре фитомассы при условии равенства массообразующих показателей, то система (11) определяет степень региональных различий самих массообразующих показателей, накапливая вклад каждого из них в конечный результат – запас стволов. Таким образом, региональные различия запасов фитомассы раскладываются на две составляющие, которым соответствуют две рекурсивные системы уравнений.

Последовательным табулированием рекурсивных систем уравнений (11) и (10) по задаваемым значениям возраста получены возрастные тренды всех массообразующих показателей, запасов фитомассы и (с использованием конверсионных коэффициентов) углерода по каждому региону.

Анализ показателей углерода в возрасте 100 лет, снятых с возрастных трендов, подтверждает наличие профиля продуктивности по широтному градиенту. В Скандинавско-Русской провинции запасы углерода в общей фитомассе сосны обыкновенной закономерно возрастают от таежной до степной зон, составляя в тайге, хвойно-широколиственных лесах, широколиственных лесах и степи соответственно 80, 109, 105 и 118 т/га, а далее к югу, в субтропиках Причерноморской провинции возрастают до 158 т/га, вдвое превышая аналогичный показатель таежной зоны. По Уральскому меридиану происходит нарастание запасов углерода в фитомассе сосны северной, средней и южной тайги соответственно составляя 42, 73 и 89 т/га и затем несколько снижается в казахстанских степях (83 т/га). Закономерно увеличивается названный показатель в сосняках Западно-Сибирской провинции от 42 т/га в средней тайге до 122 т/га – в лесостепи, снижаясь далее к югу до 83 т/га. Характерная закономерность профиля продуктивности имеет место и в Средне-Сибирской провинции: нарастание запасов углерода в подзонах северной, средней и южной тайги

(соответственно 42, 45 и 78 т/га) с некоторым снижением (до 74 т/га) в более жестких климатических условиях Забайкалья.

Наибольшими запасами углерода в фитомассе характеризуются сосна густоцветная в субтропиках Японии (196 т/га) и сосна приморская в подзоне широколиственных лесов Западной Европы (207 т/га).

При аналитическом описании географических закономерностей распределения продуктивности фитомассы лесного покрова, необходимо определиться с выбором географических характеристик территории Северной Евразии, которые можно было бы выразить числом и мерой. Определяющее влияние на характер и продуктивность лесной растительности оказывает одна из основных характеристик географического ландшафта – климат, в частности, нами принятые основные две климатические характеристики – сумма эффективных температур (Tuukkanen, 1984) по широтному градиенту и индекс континентальности климата Ценкера (Борисов, 1967) по меридиональному.

Для аналитического (на количественном уровне) описания географии распределения запасов углерода в надземной и общей фитомассе естественных сосновых лесов (*Pinus sylvestris*, *P. pinaster*, *P. nigra*, *P. densiflora* и *P. sosnowskii*) в возрасте 100 лет, рассчитана их зависимость от индекса континентальности по Ценкеру и от суммы эффективных температур, снятых с соответствующих карт-схем (Борисов, 1967; Tuukkanen, 1984):

$$\ln C_{abs} = -13,19 + 1,74(\ln IC) - 0,29(\ln IC)^2 + 7,25(\ln T) - 0,85(\ln T)^2, R^2 = 0,70; \quad (12)$$

$$\ln C_{abo} = -10,16 + 1,67(\ln IC) - 0,29(\ln IC)^2 + 5,87(\ln T) - 0,67(\ln T)^2, R^2=0,70; \quad (13)$$

где  $C_{abo}$  и  $C_{tot}$  – средние значения запасов углерода соответственно в надземной и общей фитомассе естественных сосновых насаждений в возрасте 100 лет, т/га;  $IC$  – индекс континентальности климата (%), по Ценкеру;  $T$  – средняя месячная сумма эффективных температур выше  $+5^{\circ}\text{C}$  за вегетационный период в Северной Евразии. Числовые значения зависимостей (12) и (13) даны в табл. 4.

Таким образом, на статистически достоверном уровне установлено, что средние запасы углерода в фитомассе естественных сосняков снижаются в направлении с юга на север и от атлантического и тихоокеанского побережий – к полюсу континентальности.

## ПРЕДЕЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ЕСТЕСТВЕННЫХ СОСНЯКАХ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ ИХ ГЕОГРАФИЯ

Исследование региональных закономерностей изменения предельных показателей запасов углерода в фитомассе выполнено с использованием рекурсивно-регрессионного принципа, т.е. последовательной «цепочки»

Таблица 4

Изменение средних запасов углерода в надземной ( $C_{abo}$ , т/га) и общей ( $C_{tot}$ , т/га) фитомассе 100-летних естественных сосняков (*Pinus sylvestris*, *P. pinaster*, *P. densiflora*, *P. sosnowskii*) Северной Евразии в связи с индексом континентальности ( $IC$ , %) и суммой эффективных температур ( $T$ ,  $^{\circ}\text{C}$ )

T	IC				
	30	40	50	70	90
$C_{abo}$					
20	32	29	26	21	17
40	95	86	78	63	52
60	123	112	101	82	67
80	124	113	102	83	68
$C_{tot}$					
20	42	38	33	26	21
40	110	99	87	69	56
60	144	129	114	90	73
80	152	136	121	95	77

взаимосвязанных многофакторных уравнений (Усольцев, 1998). В данном случае «цепочка» (14) состояла из четырех звеньев, каждое из которых представляло 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, - показателей фитомассы согласно уравнений (10):

$$H_{lim} = f(X_0, \dots, X_{30}, A, N) \rightarrow D_{lim} = f(X_0, \dots, X_{30}, A, N, H_{lim}) \rightarrow \\ \rightarrow M_{lim} = f(X_0, \dots, X_{30}, A, N, H_{lim}, D_{lim}) \rightarrow \\ \rightarrow (P_{(i)}{}_{lim}/M_{lim}) \text{ или } P_{(i)}{}_{lim} = f(X_0, \dots, X_{30}, A, N, H_{lim}, D_{lim}, M_{lim}). \quad (14)$$

Вначале рассчитывались траектории изменения высоты среднего дерева ( $H_{lim}$ , м), максимальной для каждого класса возраста, и в пределах последнего - максимальной для каждой градации густоты. Для получения исходных данных к расчету таких траекторий все значения  $H$  распределены по каждому региону в двухвходовые (по возрасту и густоте) матрицы, из каждой ячейки которых в формате программы EXCEL отобраны 330 максимальных значений  $H_{lim}$ . Остальные уравнения в системе (14) рассчитаны по всему исходному массиву фактических данных (1223 наблюдения). Показатели  $R^2$  для первых трех уравнений варьируют в пределах 0, 952-0,973.

Графики, построенные по уравнениям (14), показывают, что каждый класс возраста  $A$  характеризуется в логарифмических координатах специфичной параболической кривой, их правые ветви пересекаются и точки пересечения при  $\Delta A \rightarrow 0$  образуют характерную кривую, которая является

пределной для задаваемых густот  $N$  по условию самоизреживания. Характеристики предельных линий в координатах *пределенный показатель древостоя - густота* рассчитаны в формате программы EXCEL, и по конверсионным коэффициентам (Кобак, 1988) значения фитомассы пересчитана на показатели углерода.

Предельные значения углерода в фитомассе разных фракций, снятые с предельных линий и соответствующие спелым древостоям в диапазоне густот 500-1000 экз/га, показывают те же закономерности распределения в связи с климатическими характеристиками, что и средние значения, снятые с возрастных трендов для возраста 100 лет. Предельные показатели углерода в фитомассе естественных сосняков имеют тенденцию снижения по мере ужесточения климатических условий как в направлении с юга на север, так и в направлении к полюсу континентальности, и описываются уравнениями:

$$\ln C_{alim} = -12,164 + 4,018(\ln IC) - 0,582(\ln IC)^2 + 4,570(\ln T) - 0,494(\ln T)^2, R^2 = 0,72, \quad (15)$$

$$\ln C_{lim} = -9,932 + 3,712(\ln IC) - 0,546(\ln IC)^2 + 3,811(\ln T) - 0,391(\ln T)^2, R^2 = 0,71, \quad (16)$$

где  $C_{alim}$  и  $C_{lim}$  – предельные значения запасов углерода соответственно в надземной и общей фитомассе естественных сосняков, т/га. Числовые значения зависимостей (15) и (16) даны в табл. 5.

Сопоставление данных табл. 4 и 5 показывает, что закономерности изменения запасов углерода в надземной и подземной фитомассе по зональному и провинциальному градиентам примерно одинаковые как по предельным показателям, рассчитанным по условию самоизреживания, так и при расчете средних показателей только по данным пробных площадей.

Таблица 5

Изменение предельных запасов углерода в надземной ( $C_{alim}$ , т/га) и общей ( $C_{lim}$ , т/га) фитомассе естественных сосняков (*Pinus sylvestris*, *P. pinaster*, *P. densiflora*, *P. sosnowskii*) Северной Евразии в связи с индексом континентальности ( $IC$ , %) и суммой эффективных температур ( $T$ ,  $^{\circ}\text{C}$ )

$T$	IC				
	30	40	50	70	90
$C_{alim}$					
20	56	54	50	39	30
40	135	131	120	94	72
60	182	176	161	126	96
80	203	197	180	141	107
$C_{lim}$					
20	73	70	63	49	38
40	168	160	145	113	87
60	229	219	199	155	118
80	264	253	229	179	137

Поскольку процедура расчета предельных траекторий продуктивности довольно трудоемкая, для расчета предельных значений запасов углерода по известным средним предлагается уравнение:

$$\ln(C_{lim}) = 0,6845 + 0,9536 \ln(C_{tot}), R^2 = 0,855, \quad (17)$$

графическое изображение которого дано на рисунке.

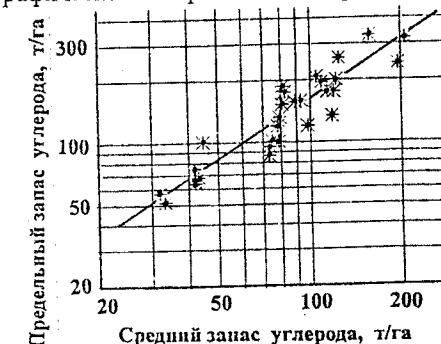


Рис. Взаимосвязь предельных запасов углерода, рассчитанных по условию самоизреживания древостое, и средних запасов углерода в 100-летних сосняках, рассчитанных по пробным площадям с предварительным приведением их к сопоставимой по регионам форме.

## ТАБЛИЦЫ ХОДА РОСТА ЕСТЕСТВЕННЫХ СОСНЯКОВ ПО СОДЕРЖАНИЮ УГЛЕРОДА В ИХ ФИТОМАССЕ ПО РЕГИОНАМ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

Учет всех фракций фитомассы лесных экосистем, как и углерода в ее составе, может быть осуществлен несколькими методами, в том числе с помощью таблиц их биологической продуктивности, которые для естественных сосняков всей территории Северной Евразии ранее не составлялись. За основу нами взяты традиционные таблицы хода роста (ТХР) нормальных и модальных древостое, дополненные показателями содержания углерода в фракционном составе фитомассы путем совмещения ТХР с моделями фитомассы (10). По конверсионным коэффициентам (Кобак, 1988) значения фитомассы переведены на показатели углерода. В результате получены 125 таблиц хода роста по запасам углерода (ТХРУ) в фитомассе естественных нормальных и модальных сосняков для всей лесной зоны Северной Евразии.

ТХРУ подразделены на две категории. В первую вошли ТХРУ нормальных, а во вторую – ТХРУ модальных древостое. В каждой из названных категорий таблиц выделяются два уровня: сравнительно лучших (I) и сравнительно худших (II) условий произрастания.

Названные показатели запаса углерода в надземной ( $C_{abo}$ , т/га) и общей ( $C_{tot}$ , т/га) фитомассе сосняков анализируются в связи с индексами континентальности климата ( $IC$ , в процентах) по уравнениям

$$\ln C_{abo} \text{ или } \ln C_{tot} = a_0 + a_1 (\ln IC) - a_2 (\ln IC)^2. \quad (18)$$

Если средние по пробным площадям и предельные по условию самоизреживания запасы углерода в фитомассе сосновок анализировались в связи с двумя климатическими характеристиками – индексом континентальности и суммой эффективных температур, то в данном случае анализ выполняется только в связи с одним из них – индексом континентальности. Причина этого – отсутствие ТХР сосновок по полному зональному градиенту, т.е. наличие ТХР только для основной лесной зоны.

Результаты табулирования уравнений (18) показали, что по мере возрастания индекса континентальности от 30 % (Западная Европа и Япония) до 90 % (Якутия) происходит последовательное снижение нормативных запасов углерода в надземной и подземной фитомассе. Для нормальных сосновок запасы углерода в надземной фитомассе снижаются в сравнении с лучшими условиями произрастания с 191 до 97 т/га, а в сравнительно худших – с 103 до 54 т/га, т.е. в 2 раза. Для модальных насаждений названные показатели снижаются при тех же условиях соответственно со 119 до 66 и с 80 до 36 т/га, т.е. тоже примерно в 2 раза. Запасы углерода в надземной фитомассе в сравнительно лучших условиях по сравнению со сравнительно худшими в 1,5-2,0 раза выше. Подобные соотношения характерны и для запасов углерода в подземной фитомассе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При сравнительном исследовании биопродуктивности надземной фитомассы естественных сосновок и культур в условиях Катав-Ивановского лесхоза Челябинской области достоверного различия при условии равенства размеров деревьев не выявлено. Рассчитанные двухфакторные (по высоте и диаметру ствола) регрессионные модели объясняют изменчивость массы хвои на 79, ветвей – на 97 и стволов – на 96 %. Для оценки запасов углерода на лесопокрытых площадях предложены двухходовые поддеревные таблицы с двумя входами – высота и диаметр ствола.
2. Сравнение запасов углерода в хвое, ветвях, ствалах сосны естественного и искусственного происхождений на уровне древостоя, а также сравнение их таксационных показателей, не выявили достоверных различий на всем возрастном исследованном интервале. Однако по отдельным возрастам различия существенные: надземная фитомасса в культурах в возрасте 10-30 лет ниже, чем в естественных сосновках, а в возрасте 40 лет, наоборот, выше.
3. Впервые выявлено статистически достоверное снижение приведенных в сопоставимое состояние фактических средних и расчетных предельных показателей запаса углерода в фитомассе естественных сосновок в направлении с юга на север и от атлантического и тихоокеанского побережий – к полюсу континентальности. Последняя закономерность подтверждена также для нормативных (табличных) запасов углерода.

4. Картирование потенциальной продуктивности лесных экосистем на региональном или планетарном уровнях на основе климатических показателей обычно выполнялось по обезличенному породному составу путем экстраполяции на ту или иную территорию эмпирических базовых зависимостей либо путем экстраполяции фактических данных пробных площадей на «восстановленный» лесной покров по биомам с последующим расчетом зависимости биопродуктивности от климатических характеристик. В отличие от упомянутых подходов, в нашей работе зависимость запасов углерода в фитомассе исследована не по обезличенному лесному покрову, а для отдельной лесообразующей породы – сосны.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Аткина Л.И., Петелина О.А. Структура надземной фитомассы естественных молодняков и культур сосны Челябинской области // Лесной комплекс: состояние и перспективы развития: Сб. научных тр. Вып. 3. Брянск, 2002. С.3-6.
2. Усольцев В. А., Петелина О. А., Аткина Л. И., Крапивина О. А. Фитомасса естественных сосновок Северной Евразии: база данных и география // Леса Урала и хоз-во в них. Вып. 22. Екатеринбург: УГЛТУ, 2002. С. 88-101.
3. Усольцев В. А., Марковский В. И., Максимов С. В., Петелина О. А., Крапивина О. А., Щукин А. В. О планировании пассивного эксперимента при оценке фитомассы лесов // Научные труды. Вып. 2. Екатеринбург: УГЛТУ, 2002. С. 15-22.
4. Усольцев В. А., Азаренок В. А., Марковский В. И., Максимов С. В., Крапивина О. А., Петелина О. А. Климатически обусловленные закономерности распределения фитомассы евразийских лесов // Аэрокосмические методы в лесном комплексе: Матер. Междунар. научно-практич. конф. СПб.: СПБЛТА, 2002. С. 64-66.
5. Усольцев В.А., Азаренок В.А., Марковский В.И., Максимов С.В., Крапивина О.А., Петелина О.А. География фитомассы лесов Северной Евразии в связи с континентальностью климата // Матер. Междунар. научно-практич. конфер. «География и регион. V. Биогеография и биоразнообразие Прикамья». Пермь: Пермский гос. ун-т, 2002. С. 250-252.
6. Усольцев В.А., Максимов С.В., Петелина О.А. Биомасса некоторых видов *Pinus* в географическом аспекте // Биоразнообразие и биоресурсы Урала и сопредельных территорий. Матер. II международной конфер. Оренбург: Изд-во ОГПУ, 2002. С. 141-142.
7. Усольцев В.А., Марковский В.И., Максимов С.В., Щукин А.В., Ефименко О.А., Петелина О.А. Моделирование распределения фитомассы лесов по географическому градиенту // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Межвузовский сб. Бийск: Бийский технол. ин-т, 2002. С. 7-11.

8. Усольцев В.А., Марковский В.И., Максимов С.В., Щукин А.В., Ефименко О.А., Петелина О.А. Фитомасса лесов Евразии и ее распределение по географическому градиенту // Матер. II Международной конференции молодых ученых «Леса Евразии в XXI веке: Восток-Запад». М.: МГУЛ, 2002. С. 75-76.
9. Усольцев В.А., Петелина О.А., Максимов С.В. Таблицы биопродуктивности естественных сосняков Северной Евразии и их география // Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса. Сб. матер. Междунар. Н.-т. конференции. Екатеринбург: УГЛТУ, 2003. С. 306-307.
10. Усольцев В. А., Марковский В. И., Максимов С. В., Ефименко О. А., Петелина О. А., Щукин А. В., Платонов И. В., Белоусов Е. В., Терентьев В.В. Распределение запасов органического углерода на территории Свердловской области // Леса Урала и хоз-во в них. Вып. 23. Екатеринбург: УГЛТУ, 2003. С. 104-115.
11. Усольцев В. А., Петелина О. А., Аткина Л. И., Платонов И. В., Белоусов Е. В., Терентьев В.В., Ненашев Н. С. Таблицы биопродуктивности естественных сосняков Северной Евразии и их географический анализ // Леса Урала и хоз-во в них. Вып. 23. Екатеринбург: УГЛТУ, 2003. С. 122-134.
12. Петелина О.А., Усольцев В.А. База данных о фитомассе сосняков Северной Евразии и ее характеристика // Материалы научно-технической конференции студентов и аспирантов. Екатеринбург: УГЛТУ, 2003. С. 8.
13. Усольцев В. А., Марковский В. И., Максимов С. В., Ефименко О. А., Петелина О. А., Щукин А. В. Оценка запасов углерода и углеродно-кислородного бюджета лесных экосистем Уральского региона // Региональный конкурс РФФИ “Урал”, Свердловская область: Результаты научных работ, полученные за 2002 г. Аннотационные отчеты. Екатеринбург: Региональный н.-т. центр УрО РАН, 2003. С. 370-377.
14. Усольцев В.А., Максимов С.В., Петелина О.А., Ненашев Н.С., Крапивина О.А., Белоусов Е.В., Терентьев В.В., Щукин А.В., Залесов С.В. Способ приведения фактических данных о фитомассе к сопоставимому по экорегионам виду и закономерности ее географии на примере культур со-сны // Леса Урала и хоз-во в них. Вып. 24. Екатеринбург: УГЛТУ, 2004. С. 124-137.