



На правах рукописи

Бараковских Евгений Владимирович

Распределение запасов и годичного депонирования  
углерода в фитомассе лесов Пермского края

Специальности 06.03.02. - Лесоустройство и лесная таксация;  
06.03.03. – Лесоведение и лесоводство,  
лесные пожары и борьба с ними

- 1 ОКТ 2009

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата сельскохозяйственных наук

Екатеринбург - 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Уральский государственный  
лесотехнический университет»

Научные руководители: доктор сельскохозяйственных наук,  
профессор Владимир Андреевич Усольцев;  
кандидат технических наук  
Михаил Петрович Воронов

Официальные оппоненты: доктор биологических наук,  
профессор Станислав Николаевич Санников;  
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент  
Надежда Аркадьевна Кряжевских

Ведущая организация – Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН

Защита состоится 22 октября 2009 г. в 10.00 часов на заседании дис-  
сертационного совета Д 212.281.01 при Уральском государственном лесо-  
техническом университете по адресу: 620100, г. Екатеринбург, Сибирский  
тракт, 36, ауд. 320.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского госу-  
дарственного лесотехнического университета.

Автореферат разослан 18 сентября 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат сельскохозяйственных наук,  
доцент



А.Г. Магасумова

## ВВЕДЕНИЕ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Проблема глобального изменения климата в настоящее время относится к числу наиболее актуальных для мирового сообщества. Это связано с нарастанием выбросов углеродосодержащих газов в атмосферу и с вызванным им парниковым эффектом. Небывалое по интенсивности антропогенное изменение химического состава воздуха, этот своеобразный «химический удар по атмосфере» (Кокорин и др., 2004), в геологическом масштабе является краткосрочным явлением и ограничивается периодом в несколько сотен лет, пока не исчерпаются ископаемые источники энергии. Но это не исключает возможных необратимых изменений в биосфере Земли в течение данного периода.

В 2008 г. стартовал первый период действия Киотского протокола. В его рамках Россия обязалась не превышать уровень выбросов  $\text{CO}_2$  1990 г. За период с 1990 по 2005 гг. значения бюджета углерода в управляемых лесах РФ варьировали от -27 до 178 млн т углерода в год. Чистые потери углерода управляемыми лесами в основном объясняются усыханием лесных насаждений, поврежденных масштабными пожарами 1998 г. Среднее годовичное поглощение углерода лесами составило 73 млн т углерода. Эта величина более чем в 2 раза превышает лимит, установленный климатическими соглашениями. Тем не менее, в 2005 г. уровень эмиссий парниковых газов в России составлял около 71% от значения 1990 г. (Замолодчиков, 2008).

Точность имеющихся оценок ежегодно депонируемого в лесной фитомассе углерода совершенно неприемлема для целей глобального прогнозирования. Для лесов России оценки по данным разных исследователей варьируют по углеродному пулу от 28 до 50 Гт (Kirilov, 2000), и по годовичному стоку углерода в лесные экосистемы от 58 до 429 Мт (Залиханов и др., 2006).

Настоящая работа посвящена оценке углерододепонирующей способности лесных насаждений на лесопокрытых площадях Пермского края с принятием в качестве исходной (базовой) единицы расчетов территории отдельного лесхоза. Использовано старое название исходных единиц лесоинвентаризации (лесхоз, а не нынешнее лесничество), действующее на момент последнего (2007 г.) лесоустройства.

Исследования автора проводились в 2007-2009 гг. в рамках проектов «Картирование углерододепонирующей емкости лесных экосистем уральского региона», «Разработка системы пространственного анализа депонирования углерода лесными экосистемами Уральского региона» и «Первичная биологическая продуктивность лесных экосистем в градиенте промышленного загрязнения», гранты РФФИ №№ 04-05-96083, 07-07-96010 и 09-05-00508.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационной работы была оценка распределения запасов углерода и его годичного депонирования в фитомассе насаждений на лесопокрытых площадях Пермского края с использованием фактических данных о фитомассе и первичной продукции насаждений и материалов Государственного учета лесного фонда (ГУЛФ) и с построением соответствующих карт-схем за период с 1988 по 2007 гг.

В связи с поставленной целью конкретные задачи исследования:

- сформировать базу данных о фитомассе и ее годичной продукции лесообразующих пород Уральского региона и на ее основе разработать систему эмпирических регрессионных моделей фитомассы и ее годичной продукции для лесообразующих пород;
- выполнить сравнительный анализ точности эмпирических уравнений годичной продукции для основных лесообразующих пород РФ, рассчитанных по предлагаемому методу и методу, используемому другими исследователями;
- совместить эмпирические модели фитомассы и ее годичной продукции с данными ГУЛФ Пермского края (форма 2) по учетам 1988 и 2007 гг. и проанализировать изменение названных показателей за данный период;
- построить карты-схемы распределения запасов и годичного депонирования углерода на лесопокрытых площадях Пермского края;
- разработать автоматизированный вариант совмещения баз данных фитомассы и ГУЛФ на основе системы управления базой данных (СУБД) ADABAS с редактором приложений Natural.

На защиту выносятся следующие положения:

- таблицы распределения запаса фитомассы и ее годичного прироста в насаждениях лесопокрытых площадей на территории 35 лесхозов Пермского края по состоянию на 1988 и 2007 гг.;
- карты-схемы распределения углеродного пула и годичного депонирования углерода, отнесенных на 1 га насаждений лесопокрытых площадей Пермского края, по состоянию на 1988 и 2007 гг.;
- метод оценки и картографирования годичного депонирования углерода в фитомассе насаждений лесопокрытых площадей на основе его рекурсивного совмещения с результатами оценки и картографирования соответствующих запасов углерода;
- автоматизированный вариант совмещения баз данных фитомассы и ГУЛФ на основе СУБД ADABAS.

**Научная новизна.** Впервые проанализирована динамика лесного фонда Пермского края за последние два десятилетия, сформирована база данных о фитомассе и ее годичной продукции лесообразующих пород и рассчитаны соответствующие эмпирические модели, экстраполированные по материалам ГУЛФ на лесопокрытые площади 35 лесхозов Пермского края. Впервые с использованием материалов ГУЛФ выполнено картогра-

фирование запасов и годичного депонирования углерода на лесопокрытых площадях Пермского края по состоянию на 1988 и 2007 гг., предложен и апробирован новый метод оценки годичного депонирования углерода фитомассы. Впервые разработана автоматизированная система совмещения баз данных фитомассы и ГУЛФ на основе СУБД ADABAS.

**Практическая значимость работы** состоит в разработке исходной базы для расчета углеродного бюджета лесных экосистем, для реализации систем лесохозяйственных мероприятий, направленных на повышение продуктивности и комплексное освоение лесов Пермского края. Результаты работы могут быть полезны при осуществлении экологического мониторинга и экологических программ разного уровня и используются Агентством по природопользованию Пермского края и Пермской экспедицией филиала ФГУП «Рослесинфорг» «Поволжский леспроект» в их практической деятельности (имеются справки).

**Обоснованность выводов и предложений.** Использование обширного экспериментального материала и современных методов статистического анализа, системный подход при анализе фактических материалов и интерпретации полученных результатов, реализация поставленных задач на уровне рекурсивных регрессионных моделей, использование современной вычислительной техники и адекватных компьютерных программ определяют обоснованность приведенных в диссертации выводов.

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

**Апробация работы.** Основные результаты исследований изложены на международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы лесного комплекса» (Брянск, 2007, 2008); международной научно-технической конференции «Лесной комплекс: состояние и перспективы развития» (Брянск, 2008); всероссийской конференции с международным участием «Пожары в лесных экосистемах Сибири» (Красноярск, 2008); всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России» (Екатеринбург, 2008, 2009); региональной научно-практической конференции «Региональные проблемы природопользования и охраны окружающей среды» (Курган, 2008); 10-й международной научно-практической интернет-конференции «Лес-2009» (Брянск, 2009); всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 100-летию со дня рождения Б.П. Колесникова (Екатеринбург, 2009).

**Публикации.** Основное содержание диссертации изложено в 22 печатных работах, в том числе 3 в журналах, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 123 страницах, состоит из введения, 6 глав и 7 приложений. Список использо-

ванной литературы включает 100 наименований, в том числе 26 иностранных. Текст иллюстрирован 23 таблицами и 24 рисунками.

## ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В связи с обязательствами России по Киотскому протоколу перво-степенное значение имеет корректная оценка углеродного бюджета лесного покрова страны. В отличие от первых оценок депонирования углерода в лесном покрове (Базилевич, Родин, 1967), в настоящее время они выполняются с учетом материалов ГУЛФ. Тем не менее, полученные результаты для лесов России неоднозначны: 41,2 (Исаев и др., 1993), 30 (Алексеев, Бердси, 1994) и 33 Гт (Швиденко и др., 2000). Гораздо более актуально знание годичного прироста фитомассы, или чистой первичной продукции (NPP), которая является важнейшей экосистемной характеристикой с точки зрения продукционного процесса. При его оценке для лесов России получены значения 212 (Исаев и др., 1993), 262 (Исаев, Коровин, 1997), 285 (Гитарский и др., 2006), 1130 (Замолодчиков, Уткин, 2000) и 1707 млн. т углерода (Швиденко и др., 2001). Таким образом, величины годичного депонирования углерода в фитомассе лесов России, оцениваемые разными авторами по разным методикам, существенно различаются. Нет определенных закономерностей распределения углерода в фитомассе лесов России по меридиональному градиенту.

Для Пермского края имеется оценка углерода в фитомассе лесов лишь в целом, без детализации по лесхозам (Алексеев, Бердси, 1994), а какие-либо определения его годичного депонирования в лесном покрове региона полностью отсутствуют.

Информационные потоки сегодня на шесть порядков превышают естественные возможности человечества усваивать информацию (Кондратьев и др., 2003). Традиционная «бумажная» информатика полностью исчерпала себя, и будущее – за безбумажной информатикой (Глушков, 1987). Накопленный опыт совмещения регрессионных моделей фитомассы насаждений с матрицами данных ГУЛФ (Алексеев, Бердси, 1994; Исаев, Коровин, 1997; Усольцев, 1998, 2007; Швиденко и др., 2000) создает предпосылку для создания автоматизированных и актуализируемых систем пространственного анализа депонирования углерода в формате системы управления базой данных (СУБД). Нетривиальными возможностями, позволяющими строить как традиционные иерархические, сетевые и реляционные SQL базы данных, так и сложные текстовые информационно-поисковые и интегрированные системы, обладает одна из наиболее быстроразвивающихся в мире СУБД ADABAS (<http://www.softwareag.com/ru>), с редактором приложений Natural (Часовских и др., 2006). Однако эти возможности в задачах пространственного анализа депонирования углерода в лесном покрове в настоящее время совершенно не реализованы.

## ГЛАВА 2. ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ И ЛЕСНОЙ ФОНД ПЕРМСКОГО КРАЯ

Пермский край расположен на границе Европы и Азии, на стыке Русской равнины с Уральскими горами. Территория края вытянута с севера на юг почти на 600 км и 400 км с запада на восток. Общая площадь составляет 160 тыс. кв. км. Климат края континентальный с характерными для него продолжительной холодной зимой и коротким теплым летом. Практически все почвы края отличаются от почв сопредельных областей (Светлова, Градусова, 1985), что связано с присутствием богатых основаниями и легко выветриваемых минералов и обломков среднеосновных эффузивов. Территория края разделяется на две части, резко отличающиеся по строению поверхности и происхождению форм рельефа. Западная часть (4/5 территории) расположена на восточной окраине Русской равнины, восточная (1/5 территории) – в западных предгорьях и горах Урала. На равнинной части выделяются несколько плоско-холмистых возвышенностей тектонического происхождения.

Пермский край относится к многолесным территориям. Общая площадь лесного фонда составляет 12,2 млн га, в том числе покрытая лесом 9,2 млн га с общим запасом древесины 1180 млн м<sup>3</sup>. Лесистость территории 65%. В общей площади на долю елово-пихтовых насаждений приходится 49, сосновых 14 и мелколиственных 37 % (Малеев и др., 2005).

## ГЛАВА 3. МЕТОДИКА РАБОТЫ

Методика определения и картирования запасов и годичного депонирования углерода в лесной фитомассе подразделена по следующим направлениям:

- структуризация баз данных ГУЛФ по Пермскому краю;
- структуризация данных о фитомассе и ее годичном приросте в насаждениях Уральского региона;
- методические подходы к моделированию фитомассы и ее годичного прироста с последующим совмещением их с базой данных ГУЛФ;
- принципы разработки системы пространственного анализа депонирования углерода в лесном покрове.

Структуризации нами подвергнуты сводные данные ГУЛФ по каждому лесхозу. При этом данные формы 2 структурированы к виду, позволяющему стыковать эти данные с регрессионными моделями фитомассы и ее годичного прироста. По данным ГУЛФ для каждого лесхоза составлены двухходовые таблицы распределения покрытой лесом площади и запаса стволовой древесины по лесообразующим породам и группам возраста. С учетом возраста главной рубки, назначенного лесоустройством по каждой породе, группы возраста переведены в классы возраста.

Сформированная база данных о запасах фитомассы в насаждениях основных лесобразующих древесных пород Урала и прилегающих к нему регионов включает в себя 1400 определений, в том числе: сосна – 326, ель – 71, пихта – 52, лиственница – 176, кедр – 73, дуб – 127, береза – 172, осина и тополь – 81, ольха серая – 34, ольха черная – 30, липа – 215, ясень – 37; клен – 6 определений фитомассы, т/га. Наряду с базой данных о фитомассе насаждений, для расчетов приходной части углеродного баланса и углерододепонирующей способности лесов необходимы сводные данные о NPP насаждений. Вследствие значительно более трудоемкой процедуры определения NPP насаждений по сравнению с получением данных по их фитомассе объем информации о NPP в несколько раз меньше, чем о запасах наличной фитомассы. Сформированная база данных о фитомассе и ее годичном приросте насаждений Уральского региона включает в себя 265 определений, в том числе: сосна – 101, ель – 50, лиственница – 18, береза – 31, осина и тополь – 23, ольха – 5, липа – 16, дуб – 15, ясень – 3 и клен – 3 определений годичной продукции, совмещенных с данными о фитомассе на тех же пробных площадях, т/га.

Значения фитомассы, приведенные в базе данных (1400 определений), проанализированы в связи с возрастом и запасом древостоев как основными определяющими массообразующими показателями, входящими в сводки ГУЛФ. При расчете годичного депонирования углерода в фитомассе, т.е. приходной части углеродного цикла насаждений, разными исследователями применяются различные методы экстраполяции фактических данных депонирования углерода с пробных площадей на покрытую лесом площадь. Нами предпринято сравнительное исследование двух методов эмпирического моделирования первичной продукции и картирования годичного депонирования углерода в насаждениях лесопокрытых площадей в двух вариантах: (1) по величине смещения оценок на примере Пермского края с использованием выше упомянутых эмпирических данных 265 пробных площадей и (2) по величине стандартной ошибки, вычисленной на основе всей базы данных о NPP для лесов Северной Евразии (1040 пробных площадей).

Все полученные значения фитомассы и ее годичного прироста при их картировании пересчитаны на углерод по переводному коэффициенту 0,5 (Кобак, 1988; Matthews, 1993).

В нашей работе предпринята первая попытка перевести реализованный «бумажный» алгоритм совмещения регрессионных моделей фитомассы насаждений с матрицами данных ГУЛФ в формат СУБД ADABAS. В основу системы пространственного анализа фитомассы лесов положены следующие принципы: (1) гибкость системы (возможность изменения в соответствии с изменяющимися условиями); (2) актуализация состояния данных (возможность постоянного обновления фактических данных пробных площадей и данных ГУЛФ); (3) оперативность получения информа-



ции (возможность просмотра состояния БД и каждой записи в наглядной форме) и (4) наличие расчетного инструментария для эмпирических моделей (возможность автоматизированного их расчета). Эти принципы реализованы в трех приложениях системы, выполненных в среде Natural: (1) приложение поиска данных; (2) приложение актуализации данных, их проверки и предварительного расчета величин и (3) приложение редактирования внесенных данных.

## ГЛАВА 4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСА УГЛЕРОДА В ФИТОМАССЕ НАСАЖДЕНИЙ ЛЕСОПОКРЫТЫХ ПЛОЩАДЕЙ ПЕРМСКОГО КРАЯ

### 4.1. Результат совмещения регрессионных моделей фитомассы насаждений с базой данных ГУЛФ Пермского края и его анализ за период с 1988 по 2007 гг.

Зависимость фитомассы в абсолютно сухом состоянии ( $P_i$ , т/га) каждой фракции (стволы, ветви, хвоя, корни, нижние ярусы, соответственно  $P_{st}$ ,  $P_{br}$ ,  $P_f$ ,  $P_r$ ,  $P_u$ , т/га) от возраста ( $A$ , лет) и запаса ( $M$ , м<sup>3</sup>/га) насаждения, рассчитана для каждой древесной породы отдельно согласно модели:

$$\ln P_i \text{ или } \ln(P_i/M) = f[\ln A, (\ln A)^2, \ln M, P_f/M, P_{st}]. \quad (1)$$

Уравнения (1) вполне адекватны эмпирическим данным и их константы статистически значимы на уровне  $t_{05}$ . Путем табулирования моделей (1) по запасу стволов ( $M$ , м<sup>3</sup>/га) и возрасту ( $A$ , лет) насаждений каждой ячейки таблицы данных ГУЛФ вначале получены запасы фитомассы на 1 га, затем умножением их на лесопокрытую площадь, соответствующую каждой ячейке, получены запасы фитомассы на всей площади. После сложения результатов по классам возраста получены итоговые запасы фитомассы по каждой фракции отдельно для каждой породы и путем сложения последних по фракциям и породам получены итоговые запасы фитомассы на всей покрытой лесом площади лесхоза. Подобная процедура по совокупности лесобразующих древесных пород осуществлена по всем 35 лесхозам Пермского края за 19-летний период, т.е. согласно данным ГУЛФ по состоянию на 1988 и 2007 гг. В результате получен показатель фитомассы, взвешенный по классам возраста, запасам стволовой древесины и долевого участию каждой породы.

Полученные показатели фитомассы за период с 1988 по 2007 гг. свидетельствуют о ее закономерном увеличении с 917 до 958 млн. т, или примерно на 5%. Это соответствует 5-процентному увеличению лесопокрытой площади и 7-процентному увеличению древесных запасов (с 1177 до 1261 млн. м<sup>3</sup>) в Пермском крае за тот же период.

В табл. 1 сопоставлены результаты оценок фитомассы на покрытых лесом площадях, полученных для разных регионов путем: 1) совмещения данных фитомассы и ГУЛФ и 2) простой экстраполяции данных фитомас-

сы пробных площадей на природные зоны и подзоны. Очевидно, что карта-схема Н.И. Базилевич и Л.Е. Родина (1967) для северной и центральной частей бореальной зоны завышает оценки фитомассы примерно втрое, а для лесостепной и степной, напротив, занижает в 4-6 раз. Наши данные и значения фитомассы, по Н.И. Базилевич и Л.Е. Родину (1967), для Пермского края находятся в соотношении 3:1, что совпадает с ранее полученным для таежной зоны УрФО.

Таблица 1 - Соотношение оценок запаса фитомассы (т/га) на покрытых лесом площадях, полученных двумя разными методами

Регион	Источник информации	Фитомасса на 1 га покрытой лесом площади, полученная:		Отношение 2:1
		путем совмещения данных о фитомассе с ГУЛФ (метод 1)	по данным карт-схем (Базилевич, Родин, 1967) (метод 2)	
Территория УрФО в том числе:	Усольцев, 2007			
- лесотундра		<20	25-50	2,5
-северная тайга		20-50	50-150	2,7
-средняя тайга		50-80	150-300	3,5
-южная тайга		80-200	300-400	2,5
<b>Пермский край</b>	<b>Наши данные</b>	<b>102</b>	<b>300</b>	<b>3,0</b>
Архангельская обл.	Цветков, Сурина, 2003	44	50-150	2,3
Литва	Бумблаускис, 1996	133	300-400	2,6
Башкирия	Канунникова, 2007	111	13-25	0,17
Бурятия	Тулохонов и др., 2006	77	13-25	0,25
Оренбургская область	Усольцев и др., 2007	80-100	5-13	0,10

#### 4.2. Карты-схемы распределения углерода в фитомассе лесов на лесопокрытых площадях Пермского края и их анализ

Общий углеродный пул фитомассы лесов Пермского края составил в 1988 и 2007 гг. соответственно 458 и 479 млн. т, т.е. возрос на 5%. Его величина, отнесенная на 1 га лесопокрытой площади (соответственно 50 и 51 т/га), оказалась несколько выше результатов, полученных В.А. Алексеевым и Р.А. Бердси (1994) (43 т/га), а также А.С. Исаевым и Г.Н. Корови-

ным (1997) (49 т/га). Согласно составленным картам-схемам распределения углерода в насаждениях (рис. 1, I) наибольшие его запасы (51-70 т углерода /га) в фитомассе лесов приходится на Центрально-Уральскую ландшафтную область (горный Урал) и на Высокое Заволжье Русской равнины. Наименьшими значениями характеризуются Северные Увалы (27-40), а промежуточные значения (41-50 т углерода /га) приходится на Западно-Уральскую ландшафтную область (по состоянию на 2007 г.).

## ГЛАВА 5. ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ И КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ГОДИЧНОГО ДЕПОНИРОВАНИЯ УГЛЕРОДА В ФИТОМАССЕ НАСАЖДЕНИЙ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ НА ЛЕСОПОКРЫТЫХ ПЛОЩАДЯХ ПЕРМСКОГО КРАЯ

### 5.1. Исследование смещений величины годичного депонирования углерода на лесопокрытой площади, рассчитанного по двум методам

Известную в лесной таксации обратно пропорциональную зависимость процента текущего прироста стволов от возраста распространяют (Замолодчиков, Уткин, 2000; Уткин и др., 2003) на определение так называемого конверсионного коэффициента - показателя, представляющего собой частное от деления годичного прироста той или иной фракции фитомассы  $Z_i$  (т/га) на запас стволовой древесины ( $M$ , м<sup>3</sup>/га), как функцию величины, обратной возрасту древостоя ( $1/A$ ):

$$Z_i/M = a_0 + a_1(1/A), \quad (2)$$

где  $Z_i$  - годичный прирост массы  $i$ -й фракции ( $Z_f$ ,  $Z_{br}$ ,  $Z_{st}$ ,  $Z_r$  и  $Z_u$  - соответственно хвоя, ветвей, стволов, корней и нижних ярусов) в абсолютно сухом состоянии, т/га.

Однако, начиная с XIX века, была известна взаимосвязь величины депонируемого в фитомассе прироста с массой ассимиляционного аппарата (Hartig, 1896; Busse, 1930; Яблоков, 1934; Burger, 1929-1953; Kittredge, 1944; Георгиевский, 1948; Полякова, 1954; Ovington, 1957), которая имеет биологическое обоснование, и ее можно выразить зависимостью (Усольцев, 1997):

$$\ln Z_i = f(\ln Pf). \quad (3)$$

Зависимость (3) положена в основу нашего методического подхода при определении годичного прироста фитомассы и углерода насаждений территориального комплекса. Однако она нами корректируется путем включения дополнительных переменных - возраста насаждения и некоторых показателей фракционной структуры фитомассы и рассчитывается в виде системы связанных (рекурсивных) уравнений (Усольцев, 1998). Ее общий вид:

$$\ln Z_i = f(\ln A, \ln M, \ln Pf, \ln Pr, \ln Pu). \quad (4)$$

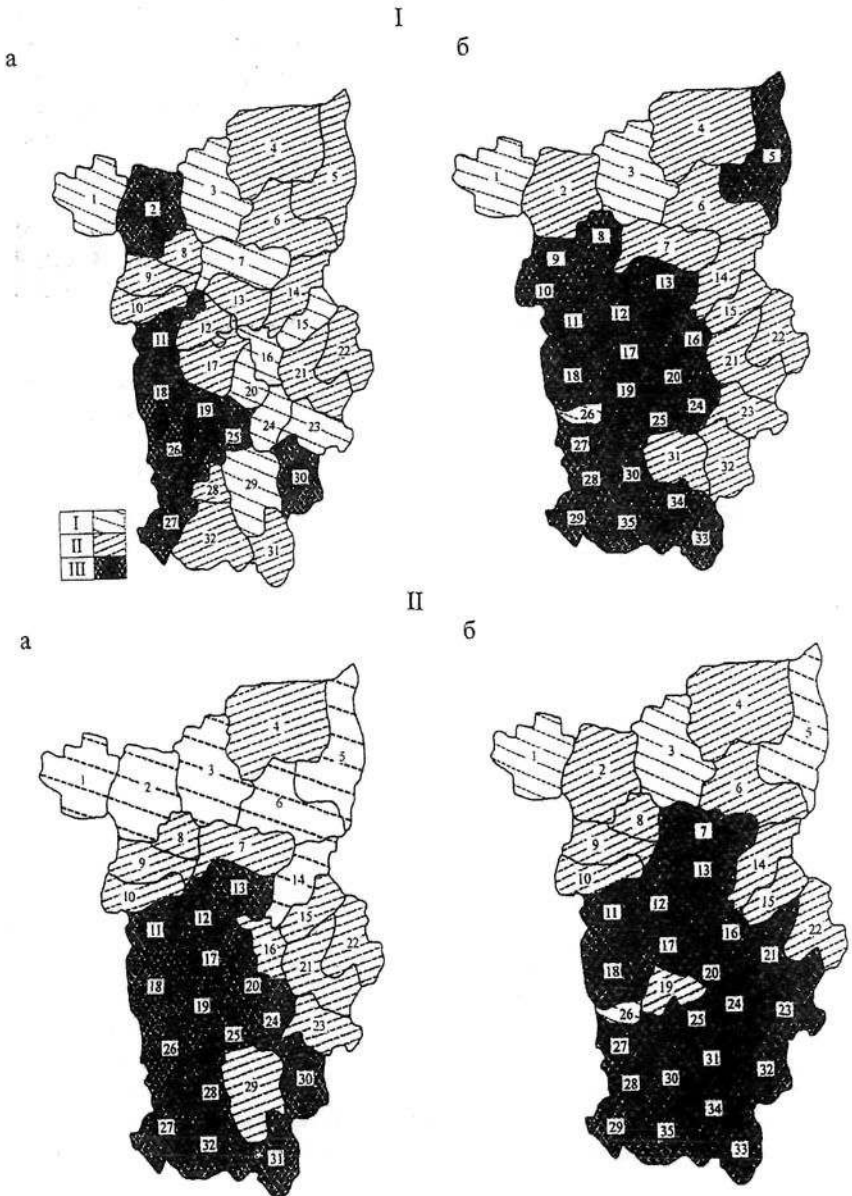


Рис. 1. Распределение запасов углерода (I) и годовичного депонирования углерода (II) в фитомассе насаждений по состоянию на 1988 (а) и 2007 гг. (б); градации запаса углерода: I - 27-40; II - 41-50; III - 51-70 т/га, то же, годовичного депонирования углерода: I - 1,7-2,4; II - 2,4-3,2; III - 3,2-4,1 т/га

Уравнения (2) и (4) вполне адекватны эмпирическим данным и их константы статистически значимы на уровне  $t_{05}$ . Коэффициенты  $R^2$ , средние по 10 породам для фракций фитомассы в их перечисленной выше последовательности, составили по уравнениям (2) соответственно 0,69; 0,62; 0,54; 0,49; 0,25 и по уравнениям (4) соответственно 0,77; 0,78; 0,75; 0,76; 0,70. Следовательно, зависимости (2) в среднем - на 62% менее детерминированы по сравнению с (4).

Рассмотрим далее, как соотносятся между собой результаты совмещения по методам 1 и 2, или соответственно по уравнениям (2) и (4), с данными ГУЛФ по всем лесхозам Пермского края.

Если расчеты по методу 1 выполнены путем прямого табулирования уравнений (2) по данным структурированных матриц, то расчеты по методу 2 выполнены в два этапа. Первый этап – это расчет уравнений наличного запаса фитомассы на пробных площадях в количестве 1400 определений. Уравнения запаса фитомассы (2) протабулированы по данным структурированных таблиц и получены таблицы распределения фитомассы по группам возраста и породам, которые используются далее при табулировании уравнений (4) по рекурсивному принципу, т.е. не только по данным  $A$  и  $M$ , но и по данным фитомассы листьев, корней и нижних ярусов, полученным на первом этапе расчетов. Путем деления полученных годовичных приростов фитомассы на лесопокрытую и общую площади каждого лесхоза получены распределения годовичного прироста фитомассы, отнесенного к 1 га соответственно лесопокрытой и общей площадей.

Итоговые результаты расчетов по двум методам для лесов Пермского края по состоянию на 1988 и 2007 гг. (табл. 2) показывают, что оценки прироста фитомассы, выполненные по методу 1, превышают результаты оценок, выполненных по методу 2, в среднем в 3,5 раза. Наибольшее превышение (в 8 раз) – для нижних ярусов и наименьшее (в 2 раза) для хвои (листвы). Поскольку оценки по методу 2 выполнены по более адекватным уравнениям с привлечением не только данных возраста и запаса древостоев, но и результатов оценки фитомассы, исходные данные которой впятеро превышают данные годовичного прироста, есть основания считать их более корректными по сравнению с данными, полученными по методу 1.

## **5.2. Исследование случайных ошибок при определении годовичного депонирования углерода на лесопокрытой площади двумя расчетными методами**

Сравнение двух методов оценки годовичного прироста фитомассы лишь по коэффициентам детерминации уравнений недостаточно для объяснения 2-8 кратного расхождения в результатах. Для более корректного сравнения необходим анализ ошибок расчетных данных годовичного прироста по фракционному составу, полученных по уравнениям, по отношению к фак-

тическим исходным значениям названного прироста (данным пробных площадей). В качестве основы, на которой выполняется сравнение, взята база данных по годичному приросту фитомассы насаждений Северной Евразии (Усольцев, 2007, приложение 16) в количестве 1040 определений для основных 8 лесообразующих пород, в том числе: естественные сосняки – 370, культуры сосны – 210, ельники – 180, лиственничники – 60, березняки – 90, дубняки – 60, букняки – 50 и липняки – 20.

Таблица 2 - Сравнение оценок годичного прироста фитомассы насаждений на лесопокрытых площадях Пермского края, выполненных по двум методам по материалам лесоустройства по состоянию на 1988 и 2007 гг.

Сравниваемые методы	Общий годичный прирост фитомассы на лесопокрытых площадях Пермского края, тыс. т					
	Ство- лы	Вет- ви	Лис- тва	Кор- ни	Ниж- ние ярусы	Ито- го
1988 г.						
Метод 1 (уравнение 2)	41027	40835	41197	40830	40735	204624
Метод 2 (уравнение 4)	15515	7095	20591	8844	5002	57048
Отношение результатов, полученных по двум методам (1:2)	2,6	5,8	2,0	4,6	8,1	3,6
2007 г.						
Метод 1 (уравнение 2)	44017	43855	44169	44267	43715	220022
Метод 2 (уравнение 4)	18878	6990	23664	10213	5846	65592
Отношение результатов, полученных по двум методам (1:2)	2,3	6,3	1,9	4,3	7,5	3,4

Расчетная процедура состояла из двух этапов. На первом из них рассчитывались уравнения (2) (первый метод) и уравнения (4) (второй метод) по фактическим данным годичного прироста фитомассы по полному фракционному составу для каждой породы, приведенным в названном приложении. На втором этапе уравнения табулировали по тем же значениям прироста, по которым рассчитывали эти уравнения, и затем сопоставляли расчетные значения с фактическими, принимая последние за истинные. Для сравнения двух методов по точности оценки годичного прироста фитомассы рассчитаны значения величины ошибки (для всех случаев), средние по восьми породам (табл. 3).

Таким образом, установлено, что при оценке годичного прироста общей фитомассы насаждения (включая нижние ярусы) методы 1 и 2 равноценны по точности. Но при оценке прироста фитомассы по отдельным

фракциям ошибка определения по методу 1 существенно выше, чем по методу 2: для массы стволов, ветвей и корней – в 8-10 раз и для массы хвои (листвы) – в 2 раза. Отношение ошибки при оценке годичного прироста фитомассы насаждения по предложенному методу 2 к аналогичной ошибке, полученной по методу 1, снижается в последовательности: надземная фитомасса древостоя → общая фитомасса древостоя → общая фитомасса насаждения (соответственно 3,4; 2,6 и 1,0). Это снижение различий в точности методов при оценке прироста происходит вследствие компенсации ошибок оценки отдельных фракций при суммировании последних. Наше картирование годичного депонирования углерода в фитомассе лесов Пермского края выполнено на основе соответствующих показателей, полученных по методу 2.

Таблица 3 - Сравнение ошибок (для всех случаев) при оценке годичного прироста фитомассы насаждений, выполненной по двум методам

Сравниваемые методы	Ошибка оценки годичного прироста фитомассы насаждений						
	Стволы	Ветви	Листья (хвоя)	Корни	Надземная древостоя	Общая древостоя	Общая насаждения
Метод 1 (уравнение 2)	54,3	266,3	47,4	132,9	15,6	14,8	5,8
Метод 2 (уравнение 4)	6,7	29,3	22,5	13,4	4,6	5,7	5,8
Отношение ошибок, полученных по двум методам (1:2)	8,1	9,1	2,1	9,9	3,4	2,6	1,0

### 5.3. Карты-схемы распределения годичного депонирования углерода в фитомассе лесопокрытых площадей Пермского края и их анализ

После перевода значений годичного прироста фитомассы в показатели углерода на 1 га общей площади лесхозов и разнесения последних по трем градациям составлены карты-схемы его распределения на территории Пермского края по состоянию на 1988 и 2007 гг. (см. рис. 1, II). Если запасы углерода в фитомассе лесов Пермского края за период с 1988 по 2007 гг. возросли на 5%, то годичное депонирование его в фитомассе увеличилось за тот же период с 28524 до 32796 тыс. т, или на 15%. Названные три уровня годичного депонирования углерода на единице площади распределились на территории края с увеличением в направлении с северо-востока на юго-запад.

## ГЛАВА 6. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ И КАРТИРОВАНИЯ УГЛЕРОДА, ДЕПОНИРУЕМОГО ЛЕСНЫМИ ЭКОСИСТЕМАМИ, В СРЕДЕ ADABAS И Natural

Общий расчетный алгоритм, согласно которому в главе 4 выполнена оценка запаса углерода в фитомассе насаждений на лесопокрытых площадях территориального комплекса (рис. 2), переведен в формат СУБД ADABAS. При этом были реализованы следующие основные задачи:

- создание расчетного блока для расчета коэффициентов регрессионных уравнений (КРУ) по исходной базе данных фитомассы;
- синхронизация КРУ с итоговыми значениями запаса углерода на исходном уровне лесхоза;
- полная автоматизация расчетных блоков и автоматическая актуализация итоговых значений при изменении исходных данных как фитомассы (определенной на пробных площадях), так и данных ГУЛФ;
- реализация вывода итоговых значений для отображения на интерактивной карте.

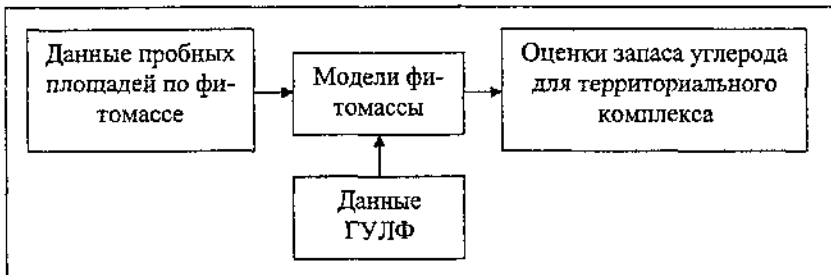


Рис. 2. Блок-схема общего расчетного алгоритма автоматизированной системы пространственного анализа запаса углерода в территориальном комплексе

### 6.1. Поисковое исследование

В соответствии с поставленными задачами выполнено поисковое исследование по реализации аналитического блока системы пространственного анализа депонирования углерода лесными экосистемами. Проанализированы четыре варианта названной реализации: средствами пакета STATGRAPHICS Plus; при помощи инструмента «Регрессия» «Пакета анализа MS EXCEL»; то же, т.е. при помощи «Пакета анализа MS EXCEL» с транспортом результатов ADABAS и Natural и, наконец, в среде ADABAS с автоматическим расчетом и актуализацией коэффициентов КРУ.

Разработан алгоритм расчета КРУ в среде ADABAS и Natural в виде специального программного кода, рассчитанного для 5-6 независимых пе-



ременных. Время осуществления расчета КРУ в среде ADABAS и Natural составляет не более 0,6 сек.

Для изменения файла хранения исходных данных создано специализированное управляющее приложение. Элемент управления «Редактирование исходных данных» запускает приложение выбора переменных, которые будут включены в регрессионный анализ. В рамках этого приложения пользователь может редактировать имеющиеся исходные данные, добавлять новые данные (элемент управления «Добавить строку»), или удалять данные (элемент управления «Удалить строку»). Элемент «Сохранить» запускает алгоритм расчета КРУ. После сохранения результатов расчета КРУ запускается алгоритм актуализации всех ранее сохраненных итоговых значений.

### 6.2. Предлагаемый вариант автоматизированной системы оценки и картирования углерода, депонируемого лесными экосистемами

Преимущества варианта 4 по реализации расчетного блока системы перед предыдущими состоят в возможности: (1) автоматической актуализации итоговых значений при изменении КРУ; (2) автоматического отброса незначимых переменных по t-критерию; (3) функционирования СУБД ADABAS в условиях распределенной среды; (4) полностью автоматической актуализации КРУ при изменении исходных данных, а также автоматического пересчета всех ранее сохраненных итоговых значений; (5) вывода итоговых значений в последовательный текстовый файл для отображения на интерактивной карте.

Вариант 4 принят в качестве базового (рис. 3), поскольку только он позволяет полностью автоматизировать весь расчетный алгоритм и актуализировать результаты. Оператор участвует лишь при корректировке двух исходных баз данных (фитомассы и ГУЛФ).

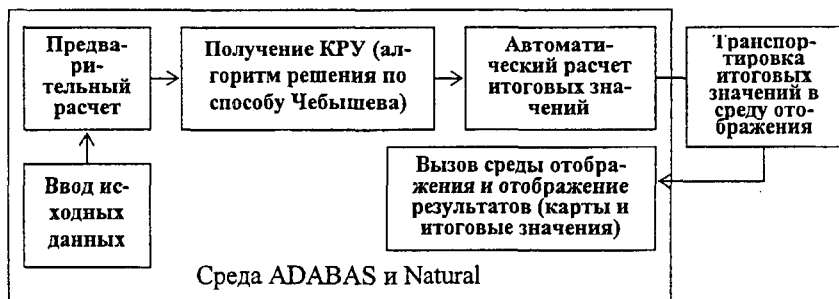


Рис. 3. Схема базового варианта реализации аналитического блока системы пространственного анализа депонирования углерода лесными экосистемами территориального комплекса

Таким образом, возможности СУБД ADABAS впервые использованы применительно к проблеме депонирования углерода лесным покровом. В результате разработан аналитический блок системы пространственного анализа депонирования углерода лесами Урала. Такая система может быть реструктурирована в виде иерархии нескольких уровней сложности и информативности, т.е. быть не только информационной, но и обучающей. Она динамична, и ее можно непрерывно пополнять новыми данными, избавляясь от ошибок.

## ВЫВОДЫ

1. На основе сформированной базы данных о фитомассе и ее годовом приросте для лесобразующих пород Пермского края разработана система связанных (рекурсивных) уравнений двух уровней. На первом из них структура фитомассы сопряжена со структурой данных ГУЛФ, в результате чего составлена карта-схема распределения углеродного пула по 35 лесхозам. На втором уровне структура годовичного прироста фитомассы совмещена по рекурсивному принципу не только со структурой данных ГУЛФ, но и со структурой фитомассы, т.е. с результатами первого уровня, и составлена карта-схема годовичного депонирования углерода, совмещенная с первой.

2. Установлены запасы углерода в общей (надземной и подземной) фитомассе насаждений в лесном фонде Пермского края, составившие по состоянию на 1988 и 2007 гг. соответственно 458 и 479 млн. т. Это 5-процентное увеличение произошло как за счет увеличения лесопокрытой площади, так и за счет повышения продуктивности лесов вследствие снижения объемов рубок и, возможно, - изменения климата.

3. Годичное депонирование углерода в фитомассе на 1 га лесопокрытой площади, взвешенное по доле участия пород в лесном фонде, запасу стволовой древесины и по величине занимаемой лесопокрытой площади, варьирует по лесхозам в довольно широком диапазоне - от 2,1 до 5,0 т/га в 1988 г. и от 2,3 до 6,0 т/га в 2007 г. Итоговое годовичное депонирование углерода в фитомассе на всей лесопокрытой площади в лесах Пермского края составило по состоянию на 1988 и 2007 гг. соответственно 28,5 и 32,8 млн. т, т.е. увеличение за этот период составило 15%.

4. При оценке годовичного прироста общей фитомассы насаждения методы 1 (обычно применяемый) и 2 (предложенный нами) равноценны по точности. Но при оценке прироста фитомассы по отдельным фракциям ошибка определения по методу 1 существенно выше, чем по методу 2: для массы стволов, ветвей и корней - в 8-10 раз и для массы хвои (листья) - в 2 раза. Снижение различий в точности методов при оценке прироста в последовательности: надземная фитомасса древостоя → общая фитомасса древостоя → общая фитомасса насаждения (соответственно 3,4; 2,6 и 1,0)

происходит вследствие компенсации ошибок оценки отдельных фракций при суммировании последних.

5. Возможности СУБД ADABAS впервые использованы применительно к проблеме депонирования углерода лесным покровом. В результате разработан аналитический блок системы пространственного анализа депонирования углерода лесами Урала, позволяющий в автоматическом режиме актуализировать карту-схему распределения углерода в фитомассе лесов.

### **ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ:**

1. Усольцев В.А., Канунникова О.В., Норицина Ю.В., Накай Н.В., Баракловских Е.В., Кузьмин Н.И. Распределение запасов и годичного депонирования углерода в фитомассе лесов на юго-западе Уральского региона // Актуальные проблемы лесного комплекса. Вып. 19. Брянск: БГИТА, 2007. С. 69-72.

2. Усольцев В.А., Терехов Г.Г., Норицина Ю.В., Кузьмин Н.И., Семьшев М.М., Воронов М.П., Богословская О.А., Сопига В.А., Ненашев Н.С., Терентьев В.В., Касаткин А.С., Ударцева В.В., Баракловских Е.В. Картирование углерододепонирующей емкости лесных экосистем уральского региона. Аннотационный отчет по гранту РФФИ «Урал» № 04-05-96083 // Региональный конкурс РФФИ «Урал», Свердловская область. Аннотационные отчеты. Екатеринбург: Региональный научно-технический центр, 2007. С. 405-409.

3. Усольцев В.А., Терехов Г.Г., Бирюкова А.М., Канунникова О.В., Семьшев М.М., Баракловских Е.В. Фракционное распределение углерода в фитомассе культур на Урале в связи со способами их создания и ухода // Актуальные проблемы лесного комплекса. Вып. 19. Брянск: БГИТА, 2007. С. 72-75.

4. Усольцев В.А., Часовских В.П., Воронов М.П., Корец М.А., Черкашин В.П., Кофман Г.Б., Баракловских Е.В., Семьшев М.М., Касаткин А.С., Накай Н.В. Оценка углерододепонирующей способности лесов: от пробной площади – к автоматизированной системе пространственного анализа // Лесная таксация и лесоустройство. 2008. № 1(39). С. 183-190.

5. Баракловских Е.В., Касаткин А.С., Семьшев М.М., Накай Н.В., Кузьмин Н.И., Усольцев В.А. Основные этапы в исследованиях структуры фитомассы лесов // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: Матер. IV всерос. научно-техн. конф. студентов и аспирантов. Екатеринбург: УГЛТУ, 2008. С. 101-102.

6. Азаренок В.А., Усольцев В.А., Норицина Ю.В., Накай Н.В., Баракловских Е.В. Депонирование углерода в фитомассе лесопокрытых площа-

дей уральского региона // Актуальные проблемы лесного комплекса. Вып. 21. Брянск: БГИТА, 2008. С. 3-6.

7. Усольцев В.А., **Бараковских Е.В.**, Малеев К.И. Депонирование углерода в фитомассе лесного покрова Пермского края // Актуальные проблемы лесного комплекса. Вып. 21. Брянск: БГИТА, 2008. С. 136-139.

8. Усольцев В.А., Воронов М.П., Часовских В.П., **Бараковских Е.В.**, Накай Н.В., Кузьмин Н.И. Разработка системы пространственного анализа депонирования углерода лесными экосистемами уральского региона. Аннотационный отчет по гранту РФФИ «Урал» № 07-07-96010 // Региональный конкурс РФФИ «Урал», Свердловская область. Результаты научных работ, полученные за 2007 г. Екатеринбург: Региональный научно-технический центр, 2008. С. 223-226.

9. Усольцев В.А., **Бараковских Е.В.**, Кузьмин Н.И., Норицина Ю.В., Накай Н.В. Увеличение фитомассы лесного покрова в регионе и попытка выяснения его причин // Актуальные проблемы лесного комплекса. Вып. 21. Брянск: БГИТА, 2008. С. 140-143.

10. Усольцев В.А., Часовских В.П., **Бараковских Е.В.**, Накай Н.В., Воронов М.П. Картирование лесных горючих материалов путем совмещения баз данных ГУЛФ и фитомассы насаждений // Пожары в лесных экосистемах Сибири: Матер. всерос. конф. с международным участием. Красноярск: Ин-т леса СО РАН, 2008. С. 81-83.

11. Усольцев В.А., Терехов Г.Г., Бирюкова А.М., **Бараковских Е.В.**, Накай Н.В., Канунникова О.В. Фитомасса 35-летних культур ели на Урале в связи со способами их создания и ухода // Леса России и хозяйство в них. Вып. 1(30). 2008. С. 27-43.

12. Усольцев В.А., **Бараковских Е.В.**, Маленко А.А. Изменение запаса углерода за последние десятилетия в лесном покрове таежной и степной зон // Вестник Алтайского гос. аграрного ун-та. 2008. № 12(50). С. 33-36.

13. Усольцев В.А., Кузьмин Н.И., Норицина Ю.В., **Бараковских Е.В.**, Накай Н.В. Депонирование атмосферного углерода лесами Курганской области // Региональные проблемы природопользования и охраны окружающей среды. Матер. конфер. Курган, 2008. С. 95-101.

14. Усольцев В.А., **Бараковских Е.В.**, Накай Н.В., Малеев К.И. Изменение углеродного пула и годичного депонирования углерода в фитомассе лесов Пермского края за 20 лет // Актуальные проблемы лесного комплекса. Сб. научн. тр. Часть 1. Брянск: БГИТА, 2008. С. 64-66.

15. **Бараковских Е.В.**, Сопига В.А. Об увеличении фитомассы лесного покрова Пермского края // Естественные и технические науки. 2008. № 6. С. 135-136.

16. Усольцев В.А., Азаренок В.А., **Бараковских Е.В.**, Накай Н.В. Депонирование и динамика углерода в фитомассе лесов уральского региона // Лесная таксация и лесоустройство. 2009. № 1(41). С. 108-115.

17. Воронов М.П., Усольцев В.А., Часовских В.П., Баракловских Е.В. Система пространственного анализа депонирования углерода лесами в среде СУБД ADABAS // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. Вып. 186. 2009. С. 188-195.

18. Баракловских Е.В., Накай Н.В., Усольцев В.А. Карта распределения углерода, депонируемого лесным покровом уральского региона // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: Матер. V всерос. научно-техн. конф. студентов и аспирантов, Екатеринбург, 2009. С. 69-70.

19. Мехренцев А.В., Баракловских Е.В. Возможности и перспективы реализации Киотского протокола на примере Уральского лесного технопарка // Актуальные проблемы лесного комплекса. Вып. 22. Брянск: БГИТА, 2009. С. 131-133.

20. Усольцев В.А., Мехренцев А.В., Баракловских Е.В., Накай Н.В. Сравнительный анализ двух методов оценки годичного прироста фитомассы в насаждениях лесопокрываемых площадей Пермского края // Актуальные проблемы лесного комплекса. Вып. 22. Брянск: БГИТА, 2009. С. 46-50.

21. Усольцев В.А., Мехренцев А.В., Баракловских Е.В., Залесов С.В., Норицина Ю.В. Исследование ошибок при оценке годичной продукции фитомассы насаждений двумя расчетными методами // Актуальные проблемы лесного комплекса. Вып. 22. Брянск: БГИТА, 2009. С. 43-46.

22. Усольцев В.А., Баракловских Е.В., Накай Н.В. Региональные особенности картографирования углерода, депонируемого лесным покровом // Генетическая типология, динамика и география лесов России: Матер. всерос. конф., посвященной 100-летию со дня рождения Б.П. Колесникова. Екатеринбург: БС УрО РАН, 2009. С. 188-191.

Отзывы на автореферат просим направлять в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37, Ученому секретарю диссертационного совета А.Г. Магасумовой.  
Факс: (343)254-62-25 E-mail: aspir\_USFEU@rambler.ru

Подписано в печать 09.09.2009. Объем 1,0 п. л. Заказ № 392. Тираж 100.  
620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37.

Уральский государственный лесотехнический университет.  
Отдел оперативной полиграфии.