

УДК 551.583 + 581.584 + 581.526

## УГЛЕРОДНЫЙ БАЛАНС ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ВОЛЖСКОГО БАССЕЙНА В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ: ПРОГНОЗНОЕ ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Э. Г. Коломыц

*Институт экологии Волжского бассейна РАН  
445003, Самарская обл., Тольятти, ул. Комзина, 10*

E-mail: egk2000@mail.ru

*Поступила в редакцию 25.11.2020 г.*

На примере Волжского бассейна по материалам крупномасштабных ландшафтных съемок проведено прогнозное эмпирико-статистическое моделирование углеродного баланса бореальных и неморальных лесных биомов. Представлен один из типов прогнозных экологических моделей в рамках экспериментальной ландшафтной экологии. Описаны методы расчетов и картографирования объемов поглощения/эмиссии лесами парниковых газов при прогнозируемых изменениях климата. По глобальным климатическим моделям даны прогнозные оценки составляющих углеродного баланса лесных экосистем как целостных образований и их влияния на углеродный обмен земной поверхности с атмосферой. Для двух сценариев климатического прогноза: умеренного и экстремального, приведены количественные показатели адсорбции и эмиссии CO<sub>2</sub> в различных локальных и зонально-региональных условиях Восточно-Европейского субконтинента. Установлено, что бореальные лесные экосистемы осуществляют преимущественно накопительную регуляцию углеродного цикла, смягчающую потепление, а неморальные леса – регуляцию эмиссионную. Выявлено общее смягчающее воздействие лесного покрова Волжского бассейна на климатические изменения по мере усиления гидро-термического сигнала. Показано, что процесс термоаридной трансформации лесных экосистем приводит к общему уменьшению накопления углерода в большинстве групп лесных формаций. Представлены карты содержания углерода и прогнозируемого углеродного баланса основных лесных формаций Волжского бассейна для умеренного сценария глобального потепления, допускаемого Парижским соглашением по изменению климата (2015 г.).

**Ключевые слова:** *леса, регуляция углеродного цикла, изменения климата, прогнозные эмпирико-статистические модели.*

DOI: 10.15372/SJFS20210306

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема взаимодействия наземных экосистем и климатической системы через круговорот углерода, с оценкой парникового эффекта атмосферы, к настоящему времени освещена уже достаточно широко как в отечественной, так и зарубежной литературе (Кобак, 1988; Исаев, Коровин, 1999; Кондратьев, Демирчян, 2000; Швиденко и др., 2001; Shvidenko et al., 2001; Grace, 2004; Stinson et al., 2011; и др.). Основное внимание уделяется разработке методики определения углеродных пулов в различных компонентах флоры и в почве, а также созданию базы дан-

ных по современному содержанию углерода в лесных, болотных и других экосистемах. Так, в работе D. G. Schepaschenko и соавт. (2011) описана методика составления с помощью спутниковых и наземных данных гибридной карты для России, включающей как классы наземного покрова, так и некоторые преобладающие породы деревьев. На этой основе и с помощью наземных измерений запасов органического углерода в слое почвы 0–100 см построена карта запасов углерода для России с разрешением в 1 км (Щепаченко и др., 2013; Schepaschenko et al., 2013). В оценках запасов и баланса углерода как в региональном, так и в глобальном масштабе наи-

более эффективным признан разработанный в IASA (International Institute for Applied Systems Analysis) ландшафтно-экологический подход – LEA (Landscape-Ecological Approach), объединяющий внушительную информацию о растительности, почвах и гидрологии в ГИС (Nilsson et al., 2000; Shvidenko, Nilsson, 2003). Даны регрессионные оценки зависимости потоков углерода от абиотических факторов. Разработано несколько полуэмпирических моделей для оценки живой биомассы и NPP лесов, с учетом данных о породах, возрасте, относительной массе и индексе места произрастания.

Расчеты поглощения лесами парниковых газов проводятся обычно по лесотаксационным данным – по возрасту древостоя и его запасам (Уткин и др., 2006; Замолодчиков и др., 2008; и др.), что охватывает лишь часть многообразных процессов газообмена лесных экосистем с атмосферой. Подробно рассматриваются также процессы, определяющие «работу» углеродного цикла в различных природных условиях и под влиянием хозяйственной деятельности в лесной отрасли (Разнообразии..., 2012; Kurz et al., 2002). Такой подход полностью отражен в утвержденном Распоряжении Минприроды России «О методических указаниях по количественному определению объема поглощения парниковых газов» (2017). Относительно лесных природных комплексов эта методика, основанная на возрастных сменах основных лесобразующих пород, позволяет рассчитать весьма разносторонние, но вместе с тем *статичные показатели содержания углерода в лесных экосистемах в условиях стационарного климата*.

Существенные успехи достигнуты в изучении реакции глобального углеродного цикла на изменения климатической системы. Получена картина общих закономерностей глобального круговорота углерода и парникового эффекта атмосферы в голоцене и в современный период в связи с изменениями температуры (Кондратьев, Демирчян, 2000). Построен прогноз глобального содержания углерода в океане, атмосфере и растительности до 2100 г., а также дана оценка роста содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере и его влияния на температуру воздуха (Quegan et al., 2011).

Сочетание глобальной модели растительности DGVM (Dynamic Global Vegetation Model) и модели общей циркуляции атмосферы позволило рассчитать и картографировать на основе спутниковых данных запасы и баланс углерода в лесах и почвах Центральной Сибири (Quegan et al., 2011). Глобальные прогнозные оценки

роли лесного покрова в регуляции парникового эффекта атмосферы представлены в сценариях углеродного бюджета циркумполярных бореальных лесов Евразии и Северной Америки на основе корреляционных связей их биомов с ареалами температуры и осадков (Швиденко и др., 2001; Shvidenko et al., 2001; Gamon et al., 2004; Gauthier et al., 2015). Ожидаемые воздействия изменений климата на леса России и механизмы адаптации лесов рассматриваются для использования последних в качестве средств ослабления климатических сигналов. Это входит в развиваемую в работе А. З. Швиденко с соавт. (2017) концепцию перехода к устойчивому управлению лесами России.

Функционирование региональных и локальных лесных формаций в условиях меняющегося климата остается гораздо менее изученным, что затрудняет прогнозы биотической регуляции химического состава атмосферы и соответствующей роли лесов в смягчении процессов глобального потепления. Соответственно единичными оказываются работы по оценкам потенциала этого смягчения средствами лесного хозяйства (Швиденко, 2012; Швиденко и др., 2017). Какие-либо устоявшиеся методические разработки в данной области до сих пор отсутствуют.

Между тем решение этих вопросов крайне необходимо для выявления механизмов, обеспечивающих устойчивость различных зонально-региональных подразделений континентальной биосферы в условиях начавшегося глобального потепления. В Парижском соглашении по Рамочной конвенции ООН об изменении климата (Adoption..., 2015) указано, что к числу регулирующих мер по снижению углекислого газа в атмосфере, начиная с 2020 г., относятся осуществления действий по предотвращению изменений климата с использованием адсорбции CO<sub>2</sub> экосистемами (Adoption..., 2015). В основе известной концепции биотической регуляции экосистем суши и определяющих ее природных процессов (Кондратьев и др., 2003; Gorshkov, 1995) лежат идеи о *биогеоценозах как элементарных единицах биологического круговорота* (Тимофеев-Ресовский, 1970), *играющих ключевую регулирующую роль в механизмах газообмена земной поверхности с атмосферой на основе принципа Ле Шателье*.

Истоки этих механизмов следует искать прежде всего в метаболических режимах локальных экосистем, что и было предпринято в настоящем исследовании. Целью стала разработка *прогнозов климатогенной динамики углеродного цикла*

в локальных, а затем и в региональных ландшафтно-экологических системах для выявления тех из них, поведение которых способно обеспечить устойчивость рассматриваемых зонально-региональных подразделений континентальной биосферы в условиях глобального потепления. В этом состояла особенность решения проблем климатогенной динамики углеродного цикла методами ландшафтной экологии (Коломыц и др., 2009; Kolomyts et al., 2009).

Волжский бассейн послужил достаточно репрезентативным объектом для изучения биотической регуляции углеродного цикла и соответственно для разработки, как указано в Парижском соглашении (Adoption..., 2015), оценок долгосрочного реагирования экосистем на изменения климата.

Нами исследован один из типов прогнозных экологических моделей в рамках экспериментальной географической (ландшафтной) экологии. Обобщающие результаты многолетнего научно-методического поиска в этой области представлены в монографии Э. Г. Коломыца (2018) и частично использованы в данной работе.

#### **ОБЪЕКТЫ ЭМПИРИКО-СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Биотическая регуляция углеродного цикла в системе «земная поверхность – атмосфера» при глобальных изменениях климата определяется динамикой показателей внутреннего оборота и баланса растительного вещества в экосистемах. Нами рассмотрены следующие дискретные параметры малого биологического круговорота: общая скелетная масса древостоя, подроста и подлеска (*S*); общая зеленая массы всех ярусов лесного сообщества (*BV*); общая масса корней (*BR*): мертвая древесно-кустарниковая фитомасса (*WD*), масса лесной подстилки (опад + отпад + мор) (*ML*), масса лабильного гумуса (*HU*) в горизонте A1 (примерно в верхнем 20-сантиметровом слое почвы). Динамика указанных фитомасс (их положительные либо, наоборот, отрицательные изменения в прогнозируемом интервале времени) по существу и есть тот механизм, который осуществляет как абсорбцию парниковых газов, так и эмиссию газов в атмосферу.

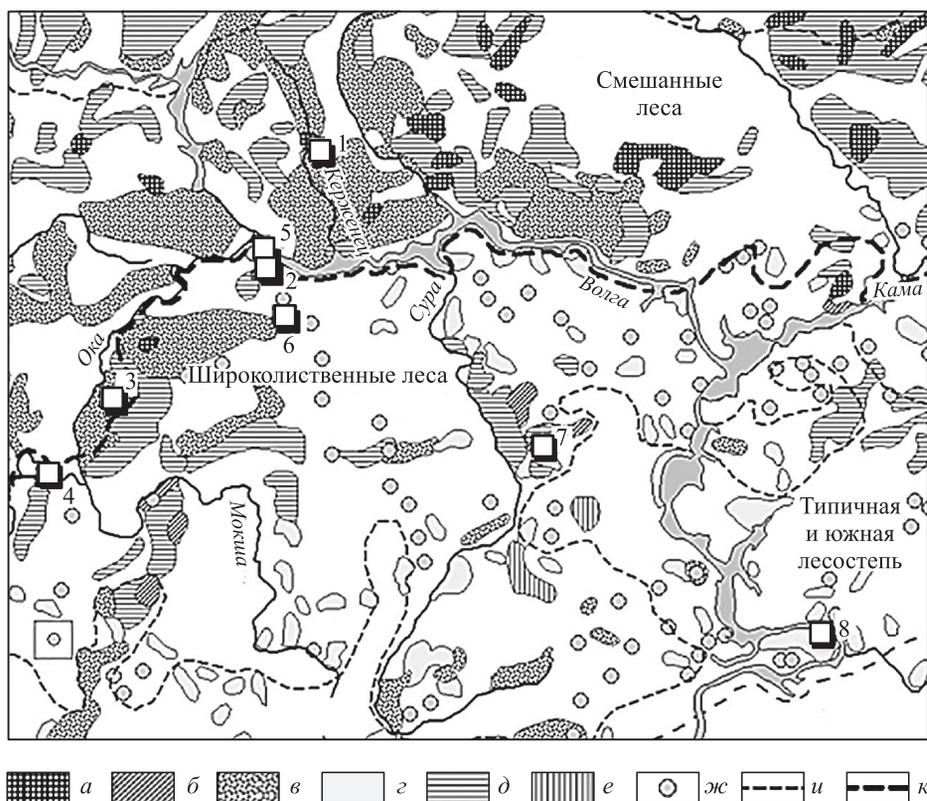
Описываемые ниже методы расчетов углеродного баланса лесных экосистем в меняющемся климате основаны на результатах прогнозного эмпирико-статистического моделирования, выполненного по материалам крупномасштаб-

ных ландшафтных съемок автора с сотрудниками в 1987–1998 гг. по специально разработанной методике (Коломыц, 2018) на экспериментальных полигонах Среднего и Верхнего Поволжья (рис. 1).

Каждый полигон характеризует *локальные пространственно сопряженные ансамбли (катенарные системы) лесных сообществ* в соответствующем экорегионе. В целом полигоны охватывают широкий спектр зональных экосистем Русской равнины – от южной тайги до южной лесостепи.

Материалы ландшафтных съемок на полигонах характеризуют локальный (топологический) уровень организации лесных экосистем. В основе этой организации лежат геоморфологические и гидроэдафические условия, которые выражены соответственно типами локальных местоположений (МП) и уровнем почвенно-грунтового увлажнения. Согласно концепции ландшафтно-геохимической организации гео(эко-)систем (Глазовская, 1988), выделяются шесть типов локальных местоположений, с доминирующим уровнем эдафического увлажнения (от ксероморфного до супергидроморфного). Местоположения, или геотопы, образуют *парагенетические ряды ландшафтных сопряжений (катен)*, которые включают следующие звенья (в общем направлении от водораздела к местному базису эрозии): элювиальное (Э), трансэлювиальное (ТЭ), транзитное (Т), трансаккумулятивное (ТА), аккумулятивное (А), супераккумулятивное (СА) и элювиально-аккумулятивное (ЭА). На Э геотопах формируются *плакорные лесные сообщества*, отображающие фоновые зонально-региональные биоклиматические условия данной территории. Остальные геотопы отнесены к категории *экстразональных*, имитирующих другие типы географической среды, нередко весьма удаленные.

Каждый экспериментальный полигон включал до 45–55 пробных площадей, образующих региональную систему локальных ландшафтных сопряжений (катен), и отображал достаточно крупное подразделение фитоценологической среды в пределах определенной климатической зоны, поэтому статистический ансамбль его фитоценологических групп служил субрегиональным представителем данного подразделения. В процессе исследования были подробно описаны сами полигоны, а также методы сбора и обработки данных по дискретным параметрам биологического круговорота (см. выше) и гидротермическим условиям их формирования



**Рис. 1.** Растительный покров Среднего Поволжья (по: Растительность..., 1987) и схема расположения экспериментальных полигонов.

Леса: *а* – еловые, пихтово-еловые и черноольховые с елью (*Picea A. Dietr.*); *б* – широколиственно-сосновые, местами с елью; *в* – сосновые (боры) и елово-сосновые (суборы); *г* – широколиственные; *д* – березово-осиновые и березово-липовые; *е* – березовые и сосново-березовые. Остальные обозначения: *ж* – внесматштабные ареалы широколиственных лесов; *и* – границы природных зон и подзон; *к* – главный ландшафтный рубеж Русской равнины. Экспериментальные полигоны: 1 – Керженец – ельники и сосняки в южной полосе зоны смешанных лесов, 2 – Зеленый Город – хвойные и смешанные леса денудационно-зандровой равнины, 3 – Выкса – сосняки низменно-зандрового Окско-Тешинского полейся, 4 – Приокско-Террасный биосферный заповедник (ПТЗ) – смешанные, хвойные и широколиственные леса низменной равнины, 5 – Щелоковский Хутор – дубравы и липняки останцового массива в Нижегородском Предволжье, 6 – Кудьма – дубово-липовые и сосновые (с елью) леса Приволжской возвышенности, 7 – Присурье – смешанные и широколиственные леса Национального природного парка «Чаваш Вармане», 8 – Жигули – дубравы и остепненные сосняки Жигулевского низкогорного массива.

(Коломыц, 2018). С помощью углеродных коэффициентов (Кобак, 1988; Исаев, Коровин, 1999; Уткин и др., 2006; и др.) значения фитомассы преобразовывались в содержание в них углерода. Некоторые из этих коэффициентов (например, по *BV*, *ML* и *HU*) дифференцировались по каждому экорегиону и по каждой группе лесных сообществ в зависимости от зональных и локальных условий местообитания.

Переход с локального уровня (биогеоценозов и их групп) на региональный (уровень лесных формаций) осуществлен с помощью метода индукционно-иерархической экстраполяции (Коломыц и др., 2009; Kolomyts et al., 2009), основанном на эмпирически установленном

явлении полизональности локальных гео(эко)систем как формы их реакции на глобальные изменения климата (Коломыц, 2018). Каждый тип/подтип растительной формации, представленный на мелкомасштабной геоботанической карте, идентифицирован определенной группой фитоценозов из их плакорно-экстразонального ряда, который характеризует региональную пространственно-упорядоченную (микроконтинентальную) систему локальной зональности. В результате были получены осредненные парциальные и суммарные значения содержания углерода в коренных и производных лесных формациях Волжского бассейна, в том числе в лесоболотных комплексах, а также в лесных угодьях.

Данные базовых запасов углерода разнесены по 52 группам растительных формаций, которые взяты из геоботанических карт масштаба 1 : 2000000 (Карта..., 1974; Растительность..., 1987). Эти карты были созданы примерно в те же годы, когда нами проводились ландшафтные съемки. По своему содержанию карты не потеряли актуальности до настоящего времени. Установлено (Разнообразие..., 2012), что за период с 1968 по 2008 г. лесистость Европейской части России изменились всего на 6–8 %. Несущественно изменилась также породная структура лесов: доля хвойных пород снизилась на 4 %, а доля мягколиственных пород увеличилась на 5 %. Незначительно изменилось также соотношение площадей с различной возрастной структурой лесов.

В течение 2000–2015 гг. площадь лесов России сократилась всего на 2.4 %, причем у темнохвойных, светлохвойных и лиственных пород это уменьшение составило соответственно 7.8; 1.9 и 5.8 % (Барталев и др., 2016).

Новейшая «Карта лесных экосистем Северной Евразии», составленная по спутниковым данным SPOT-Vegetation (Барталев и др., 2010; Разнообразие..., 2012) не могла быть использована. Выделенные на ней «типы растительности» (например, хвойные вечнозеленые леса, хвойные листопадные, лиственные леса вообще, смешанные с преобладанием хвойных, и т. п.) имеют скорее лесопромышленное, нежели лесозоологическое значение, что затрудняет интерпретацию этой карты в свете классических законов лесной биогеоценологии, согласно В. Н. Сукачеву (1972). Такие категории лесов совершенно не соответствуют принятому в традиционной геоботанике содержательному смыслу понятий «классы растительных формаций» и «типы растительности» (Сочава, 1979), на основе которых и построена классификация растительного покрова Волжского бассейна. Более того, в этой легенде не находят отражения важнейшие положения фито- и биогеоценологии, в том числе понятия коренных и производных ассоциаций, эндокогенетические и экзогенные динамические смены растительного покрова.

В процессе обобщения по каждой лесной формации, с одной стороны, интегрировались локальные геоморфологические и гидротермоэдафические условия ее формирования, а с другой – осреднялись возрастные показатели лесобразующих пород в каждом множестве пробных площадей, что «стирало» соответствующий разброс продуктивности и позволяло получить

некоторые средние для каждой группы формаций значения как базового содержания углерода в различных пулах, так и ее прогнозируемого углеродного баланса. Таким образом, каждая лесная формация описывалась *осредненными зонально-региональными ресурсами регуляции углеродного цикла*, которые складываются из топологического разнообразия абиотической среды и уровней функционирования биогеоценозов, входящих в данную формацию.

Для выявления регулирующей роли лесов в углеродном цикле необходим длительно устойчивый гидротермический отклик. Механизмы этой регуляции рассмотрены на основе прогнозируемых изменений биологического круговорота в лесных биогеоценозах при заданных сценариях климатического прогноза до 2100–2200 гг. по двум глобальным моделям: а) экстремальной HadCM3, версия A2 (Pope et al., 2000) и б) более умеренной E GISS (Hansen et al., 2007). Как и большинство известных моделей семейства AOGCMs (Climate change..., 1996), первая модель дает повышение среднеиюльской температуры в Среднем Поволжье на 5.5–7.0 °C к концу XXI в., т. е. ко времени удвоения концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере. Этот экстремальный климатический сценарий может оказаться реалистичным при сохранении текущей тенденции беспрецедентно высокого глобального потепления, которое приведет в указанный срок к повышению средней глобальной температуры на 4 °C (Le Quere et al., 2015), а на территории России – на 6–11 °C (Швиденко и др., 2017).

Вторая модель E GISS достаточно реалистично отображает столетнюю климатическую динамику в пределах Европейского континента. При термоаридном тренде, который прогнозируется данной моделью на 2020 г., повышение среднеиюльской температуры по всему Средневолжскому региону не превысит в целом 0.5–0.7 °C, что укладывается в пределы температурного роста, допустимого Парижским соглашением по изменению климата (Adoption..., 2015). Данный климатический сценарий можно считать оптимистичным, и он был использован при оценках углеродного баланса лесных формаций Волжского бассейна для сценария реализации Парижского соглашения (Adoption..., 2015).

Базовым считается период инструментальных метеонаблюдений 1881–1985 гг., с конца которого и началось современное глобальное антропогенное потепление (Climate change..., 1996).

## РАСЧЕТ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ БАЛАНСОВ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПРИ ПОТЕПЛЕНИИ

Известные математические (балансовые) модели лесных экосистем описывают процессы движения органического вещества между различными трофическими уровнями. Однако они характеризуют круговорот углерода с нераспределенными в пространстве параметрами – либо на глобальном уровне, либо для отдельных зональных типов биомов, когда необходимо учитывать существенную ограничивающую роль дискретных геоморфологических и гидроэдафических факторов.

Для оценок изменений содержания углерода в различных биотических компонентах нами применен известный лесоводственный метод, основанный на динамике живых и мертвых растительных масс, дающий наилучшие результаты при балансовых оценках составляющих углеродного цикла за большие промежутки времени. При этом реализуется кибернетический подход (Шмальгаузен, 1968; Ashby, 1956), когда сами растительные массы для каждого прогнозируемого срока рассматриваются как определенные функциональные характеристики на «выходе» системы, без детального анализа метаболических процессов «черного ящика» (они описываются известными континуальными имитационными моделями (Кудеяров и др., 2007; Schimel et al., 2001; и др.). Такое методическое ограничение неизбежно огрубляет получаемые прогнозные оценки, однако имеет свое преимущество – возможность представить функциональные состояния биогеоценозов как целостных образований в духе учения В. Н. Сукачева (1972) и тем самым получить пространственно-дифференцированный результат для всего комплекса биогеохимических процессов, участвующих в газообмене  $\text{CO}_2$ . Таковы особенности дискретного эмпирико-статистического моделирования биологического круговорота.

Изменение массы потока углерода ( $\Delta C$ ) в системе почва – растение – атмосфера можно представить в следующем виде (Кобак, 1988):

$$\Delta C(Fa) = \Delta R_m - \Delta(NPP), \quad (1)$$

где  $\Delta C(Fa)$  – поток  $\text{CO}_2$  над растительным покровом;  $R_m$  – выделение  $\text{CO}_2$  в результате жизнедеятельности почвенных и наземных сапротрофов (преимущественно бактерий и грибов), разлагающих гумус, лесную подстилку и скелетный детрит;  $NPP$  – чистая первичная продукция био-

геоценоза (надземная + корневая). Используя дискретные показатели малого биологического круговорота, приведенное выше уравнение запишем в развернутой форме:

$$\Delta C(Fa) = \Delta C(WD) + \Delta C(ML) + \Delta C(HU) - \Delta C(BS) - \Delta C(BV) - \Delta C(BR). \quad (2)$$

Здесь представлены углеродные пулы, соответствующие упомянутому выше растительным массам. По данному балансовому уравнению рассчитываются возможные изменения потоков углерода между почвенно-растительным покровом и атмосферой в различные прогнозируемые сроки (по глобальным климатическим моделям) для каждой группы лесных биогеоценозов во всех рассматриваемых региональных экосистемах. Каждый член правой части уравнения (2) может иметь как положительные, так и отрицательные значения. При положительных значениях первые три слагаемые дают прибавку эмиссии  $\text{CO}_2$  из почвенно-растительного покрова в атмосферу, а вторые – убыль этого потока. В данном случае пул мортмассы выступает в качестве дополнительного источника углерода, а живая фитомасса играет роль его стока (депонирования). При отрицательных параметрах картина обратная: в редуцированной ветви метаболизма поступление  $\text{CO}_2$  в атмосферу сокращается, а ослабевающий автотрофный биогенез потребляет меньше углекислого газа, компенсируя возникший его дефицит в атмосфере.

В итоге складывается *общий баланс изменений углеродного обмена между биогеоценозами и атмосферой* [ $\pm \Delta C(Fa)$ ], который должен показать, поглощает ли данная группа лесных экосистем *дополнительное количество  $\text{CO}_2$*  из атмосферы в результате климатогенных сдвигов в биологическом круговороте или, наоборот, становится источником его *дополнительных выбросов*. При термоаридном климатическом сигнале в первом случае осуществляется отрицательная обратная связь, направленная по принципу Ле Шателье на стабилизацию или даже ослабление первичного сигнала, а во втором – связь положительная, ведущая к усилению парникового эффекта атмосферы, а следовательно, и самого потепления.

Необходимо подчеркнуть, что рассчитываемые по уравнению (2) значения параметра  $\Delta C(Fa)$  характеризуют *динамический углеродный баланс лесных экосистем*, обусловленный изменениями баланса депозита и эмиссии углерода в почвенно-растительном покрове под воз-

действием устойчивой смены климатических условий. Можно его назвать «баланс балансов» – как соотношение прогнозных балансов и баланса конца базового периода. Динамический баланс коренным образом отличается от традиционного *статического углеродного баланса*, который рассчитывается для данных условий при стационарном климате (либо без учета каких-либо климатических изменений).

Для создания региональных прогнозных карт углеродного баланса по материалам локальных ландшафтно-экологических работ использован метод индукционно-иерархической экстраполяции. На территорию Волжского бассейна составлены карты базового суммарного содержания углерода, а также углеродного баланса лесных формаций для термоаридного климатических сценариев по модели E GISS. Карты строили на основе спутниковых данных НАСА о рельефе – матриц высот земной поверхности, полученных в ходе выполнения проекта SRTM30 (2000) национальными космическими агентствами США, Италии и Германии. Матрицы преобразовывались в равнопромежуточную проекцию Каврайского для Европейской России с шагом 900 м. Также проводился статистиче-

ский анализ параметра  $\Delta C(Fa)$  на прогнозные сроки для растительных формаций с помощью программы «Аналитическая ГИС Эко» (Шарый, 2001).

Ландшафтно-экологический прогноз основан на *эмпирической имитации изменений параметров биологического круговорота при термоаридном климатическом тренде* (с помощью векторных рядов аридизации локальных плакорно-экстразональных экосистем). Как было установлено ранее (Коломыц, 2018), основным каналом связи метаболических параметров с климатическими сигналами служит летнее влагосодержание почвы, динамика которой легла в основу прогнозных моделей углеродного баланса лесных экосистем. Термо- и гидроэдафическая ординация метаболических характеристик лесных экосистем в пределах каждого зонально-регионального биома проведена по двум геофизическим параметрам: температуре почвы на глубине 50 см ( $t_{50}$ ) и запасам летней продуктивной влаги в слое почвы 0–50 см ( $W-50$ ). С данными параметрами функциональные характеристики лесных сообществ обнаруживают наиболее высокую корреляцию. В табл. 1 приведен фрагмент расчетных формул.

**Таблица 1.** Расчетные модели, описывающие связи параметров биологического круговорота с температурой и влагосодержанием почвы в вегетационный период в лесных биогеоценозах экорегионов Среднего и Верхнего Поволжья

Вид модели (расчетная формула)	Экспериментальные полигоны	Параметры (см. в тексте)	Коэффициент			Статистическая характеристика			
			$b_0$	$b_1$	$b_2$	$R^2$	$P$	$S_y$	
$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$	Присурье	<i>BV</i>	21.93	-0.7415	<b>-0.7135</b>	0.441	0	3.09	
		<i>HU</i>	5.99	0	<b>55.75</b>	0.484	0	20.29	
	Зеленый Город	<i>BR</i>	8.712	5.838	<b>-0.0678</b>	0.339	$0.1 \cdot 10^{-3}$	17.92	
		<i>HU</i>	16.34	-0.2402	<b>0.07426</b>	0.508	0		
	$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_1^2$	Щелоковский Хутор	<i>WD</i>	642.1	-114.7	5.142	0.876	0	2.21
	$y = b_0 + b_1x_2 + b_2x_2^2$	Жигули	<i>ML</i>	44.08	-0.3611	0.00091	0.489	0	17.75
Щелоковский Хутор			<i>BS</i>	-34.93	0.9472	0.00403	0.591	0	90.49
		<i>HU</i>	12.5	0.1712	0	0.449	0	9.31	
Керженец		<i>WD</i>	22.85	-0.2588	0.00149	0.518	0	12.78	
		<i>HU</i>	8.84	0.0091	0.0006	0.724	0	8.03	
ПТЗ		<i>BS</i>	244.6	0.3956	-0.0031	0.310	$0.7 \cdot 10^{-3}$	71.4	
	<i>HU</i>	25.31	0.0159	0.00042	0.333	$0.4 \cdot 10^{-3}$	16.32		
$y = \exp(b_0 + b_1/x_1)$	Жигули	<i>BS</i>	3.706	15.42	–	0.373	0	39.3	
		<i>BR</i>	1.768	26.26	–	0.377	0	12.25	
	Зеленый Город	<i>ML</i>	0.0845	35.08	–	0.256	0	16.0	
		<i>WD</i>	-4.389	64.63	–	0.412	0	7.0	
	Выкса	<i>ML</i>	0.3274	46.81	–	0.637	0	0.34	

*Примечание.*  $x_1$  – температура почвы на глубине 50 см ( $t_{50}$ );  $x_2$  – запасы продуктивной влаги в слое почвы 0–50 см ( $W-50$ );  $R^2$  – коэффициент детерминации;  $P$  – уровень значимости (критерий Пирсона);  $S_y$  – стандартное отклонение. Полу жирным шрифтом выделены коэффициенты при значимых аргументах в уравнениях множественной регрессии.

По ним определялись все шесть метаболических параметров при прогнозируемых значениях температур воздуха и атмосферных осадков, которые трансформировались в гидротермические характеристики почвы.

Дадим пояснение к методическим основам прогнозного ландшафтно-экологического анализа. Как известно, при описании сложных многокомпонентных биологических систем неизбежны нарушения базовых принципов статистического анализа (Montgomery, Peck, 1982). В частности, не соблюдается принцип линейной независимости предикторов, а коэффициенты корреляции и детерминации не могут быть высокими. Диссимметризация и дробление гидротермических ниш, с преимущественно пуассоновским характером распределения биогеоценотических единиц, указывают на сложный, дифференцированный в пространстве процесс их климатогенных преобразований (Коломыц, 2018).

Далее «...численные предсказания прогнозных моделей ... должны рассматриваться ... скорее, как информация к размышлению о вероятных будущих траекториях лесов..., принимая во внимание значительную неопределенность прогнозов» (Швиденко, 2012, С. 55).

Предпринятое нами прогнозное моделирование носит вероятностный характер и в его основе лежат результаты *гидротермоздафической ординации* параметров биологического круговорота (табл. 1). Основная задача ординационного анализа в том, чтобы отделить изучаемый отклик от «шума» и оценить количественно этот отклик. Такой информационный «шум» создается не только межкомпонентными (вертикальными), но и межкомплесными (горизонтальными) связями, которые и формируют устойчивую ландшафтную структуру данной территории.

Изучаемый отклик нередко оказывался гораздо менее мощным, нежели множество «шумовых» воздействий (в наших исследованиях значения коэффициента детерминации  $R^2$  колебались от 65–75 до 25–35 %), однако важно то, что он постоянно действующий и однонаправленный и в этом его эффективность. Составляющие же информационного «шума» имеют, как правило, разнонаправленный характер и поэтому могут существенно погашать друг друга, особенно при переходе с биогеоценотического уровня на региональный. По этой причине вероятность экологического прогноза здесь должна быть заведомо выше, чем на локальном уровне.

## ПРОГНОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ И ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

**Лесные биогеоценозы.** Установлено, что детритная ветвь биологического круговорота в лесной экосистеме наиболее чувствительна к внешнему воздействию, однако за достаточно большие интервалы времени *максимальное по абсолютным значениям изменение испытывает не детритогенез, а автотрофный биогеоценоз*. При этом большую долю в сдвигах фитопродуктивности составляет скелетная древесно-кустарниковая фитомасса  $BS$  и главным образом масса древесины  $BW$  (табл. 2). Эта закономерность характерна для всех рассматриваемых лесных экосистем. При развитии резко выраженного термоаридного климатического тренда по модели HadCM3 за грядущий 100–150-летний период следует ожидать следующие сдвиги в углеродном цикле лесов Волжского бассейна.

1. Содержание углерода, законсервированного в скелетной фитомассе лесов, может измениться на  $\pm (20-40) \%$  от базовых значений, что указывает на весьма существенную регулируемую роль, которую должна сыграть продуктивность южно-таежных, смешанных и неморальных лесов региона в их углеродном обмене с атмосферой. Глобальное потепление вызовет в одних случаях резкое падение продуктивности, в других – столь же значительное ее увеличение, что создает весьма противоречивую картину биотической регуляции углеродного цикла. К 2100 г. изменения содержания углерода в  $BS$  составят от  $-25$  до  $40$  т/га в южной лесостепи до  $85-105$  т/га в хвойно-широколиственных лесах.

2. Наиболее сильно сократится продуктивность маргинальных лесных сообществ на зональном экотоне леса и степи (семигумидная экосистема Жигули), прежде всего в плакорных липняках и дубравах эрозионно-суглинистых возвышенностей, а также в лесах малых долин. Их роль как стока углерода из атмосферы резко снизится. Этот процесс будет сопровождаться ускоренным разложением скелетного дебриса  $WD$  и гумуса  $HU$ , хотя масса лесной подстилки  $ML$  увеличится. В целом детритная ветвь метаболизма совместно с сокращением  $BS$  вызовет *прогрессирующее нарушение принципа Ле Шателье на южной границе лесного пояса*.

3. В подзоне типичной лесостепи (семигумидный экорегион Присурье) плакорные дубово-липовые леса суглинистых возвышенных массивов до 2050 г. будут иметь отрицательный

**Таблица 2.** Удельное содержания углерода (т/га) в лесных биогеоценозах с различным местоположением и в их органических компонентах на особо охраняемых природных территориях Волжского бассейна для прогнозируемого сценария умеренного потепления (2200 г.) согласно климатической модели E GISS

Показатель	Характеристики	Полигон		
		«Жигули», национальный парк «Самарская Лука» (южная лесостепь)	«Присурье», национальный парк «Чаваш Вармане» (типичная лесостепь)	«Приокско-Террасный биосферный заповедник» (южная подтайга)
Группы биогеоценозов (типы местоположений, см. в тексте)	1 (ТЭ)	-12,23 [-]	90,29 [+]	29,46 [+]
	2 (ТЭ, Э)	-38,72 [-]	63,60 [+]	-0,44 [-]
	3 (Э, Т)	-27,76 [-]	<b>-32,51</b> [-]	<b>-27,82</b> [-]
	4 (Э-ТА)	<b>-58,88</b> [-]	31,82 [+]	29,01 [+]
	5 (ТА, А)	-65,03 [-]	27,24 [+]	11,35 [+]
	6 (СА, ЭА)	-35,79 [-]	63,65 [+]	11,82 [+]
	Среднее...	-39,74 [-]	40,68 [+]	8,90 [+]
Фитомасса (углеродные пулы, см. в тексте)	<i>BS</i>	-22,93 [-]	21,69 [+]	6,17 [+]
	<i>BV</i>	-1,14 [-]	0,12 [+]	-0,08 [-]
	<i>BR</i>	-5,11 [-]	5,23 [+]	2,19 [+]
	<i>ML</i>	1,38 [+]	-3,12 [-]	0,29 [+]
	<i>WD</i>	-5,36 [-]	28,62 [+]	0,74 [+]
	<i>HU</i>	-6,52 [-]	-11,85 [-]	-0,42 [-]
	Сумма...	-39,74 [-]	40,68 [+]	8,90 [+]

*Примечание.* Здесь и далее в таблицах: жирным шрифтом выделены плакорные биогеоценозы. Знак [+] означает смягчение регионального потепления (положительная регуляция углеродного цикла), [-] – его усиление (регуляция отрицательная).

показатель  $\Delta C(BS) = -6.2$  т/га, однако в последней четверти XXI в. они начнут дополнительно консервировать углерод в древесно-кустарниковой фитомассе, и к 2150 г.  $\Delta C(BS)$  здесь будет составлять 9.4 т/га.

4. В возвышенно-равнинных смешанных лесах неморально-лесной подзоны (семигумидный экорегион Зеленый Город) и на южной границе подтайги (гумидный экорегион ПТЗ) при потеплении, напротив, ожидается существенное повышение продуктивности, с накопительной биотической регуляцией углеродного цикла. Особенно значительно этот процесс проявится в ТЭ ксероморфных и СА гидроморфных борельных лесах, которые сыграют роль основного стока углерода. Одновременно произойдет активизация разложения мортмассы и гумуса, что несколько снизит значения  $\Delta C(Fa)$ .

5. В южной полосе смешанной лесной зоны Низменного Заволжья (экорегион Керженец) принцип Ле Шателье будет соблюдаться только за счет мезоксероморфных ТЭ сосняков. В определенной степени он проявится в переувлажненных хвойных лесах нижних звеньев катен, где улучшение гидротермических условий почвы вызовет значительный рост продуктивности. В то же время у плакорных елово-сосновых и

елово-дубово-липовых сообществ автотрофный биогенез станет ослабевать на фоне резкого усиления процессов разложения мортмассы и гумуса, что вызовет здесь общую тенденцию эмиссионной биотической регуляции.

Сопоставление углеродных балансов плакорных лесных экосистем, отображающих в своих функционально-структурных параметрах зонально-региональный фон данной территории и средневзвешенных для той же территории балансов (табл. 2), показывает следующие результаты. В двух примерах из трех приведенных лесные сообщества плакорного ряда давали значения  $\Delta C(Fa)$ , резко отличные от обобщенных для данного района значений не только по величине, но и по знаку. В Присурье и ПТЗ плакорные леса должны осуществлять весьма существенную накопительную регуляцию углеродного цикла, между тем как в целом по каждому из этих регионов прогнозируется слабая накопительная регуляция. Экстразональные лесные сообщества, образующие целый спектр локальных отклонений от зонально-региональной нормы и занимающие более 70–75 % площади, в обоих случаях дают результаты, в значительной степени перекрывающие углеродный баланс плакорных лесов.

Последнее подтверждает неправомочность экстраполяции модельных сценариев биологического круговорота и углеродного баланса, которые получаются при имитационном моделировании «типичных биомов» (Кудеяров и др., 2007), на всю территорию природной зоны/подзоны или крупного региона. Для каждого подразделения той или иной зонально-региональной единицы необходимо вносить поправки, обусловленные местными закономерностями *катенарной организации ландшафтов*, и это может привести к совершенно иным результатам (Тишков, 2005), что и продемонстрировано проведенным нами опытом эмпирико-статистического моделирования.

**Лесные формации.** Аналитические модели. Эмпирический материал ландшафтных съемок позволил рассчитать углеродный баланс ( $\Delta C(Fa)$ ) лесных формаций Волжского бассейна для различных сценариев глобальных изменений климата и тем самым оценить величину положительной или отрицательной биотической регуляции углеродного цикла в территориальном масштабе этих зонально-региональных фитоценологических единиц (табл. 3, 4).

Согласно экстремальному сценарию глобального потепления (по модели HadCM3), к 2050 г. средневзвешенный по площади углеродный баланс в лесах основного водосбора Волжского бассейна может составить от  $-21-27$  до  $11-17$  %

**Таблица 3.** Средние базовые суммарные запасы углерода в растительных формациях Волжского бассейна и их углеродный баланс к прогнозному сроку регионального потепления (2200 г.) согласно климатической модели E GISS

Класс растительных формаций	Тип (подтип) растительности	Группа растительных формаций (по: Карта..., 1974)	Углерод	Углеродный баланс
			т/га	
Северные европейские еловые леса	А. Еловые южно-таежные и широколиственно-еловые (подтаежные) леса	(48б). Ельники южно-таежные зеленомошно-кустарничковые	179.26	-4.14 [-]
		(52). Ельники с сосной ( <i>Pinus L.</i> ), сложные, неморально-травяные	187.52	14.82 [+]
		(53). Широколиственно-еловые неморально-травяные леса	203.80	-7.12 [-]
		(54). Березово-ольховые с елью болотно-крупнотравные	110.74	42.45 [+]
Сосновые и широколиственно-сосновые леса	Б. Сосновые средне- и южно-таежные леса	(76). Сосняки с елью, березой ( <i>Betula L.</i> ) кустарничково-зеленомошные	166.94	14.73 [+]
		(77). Сосняки бруснично-лишайниковые и вересковые	140.88	24.81 [+]
		(76). Сосняки с елью зеленомошно-сфагновые, с болотами	168.96	14.31 [+]
		(84). Широколиственно-сосновые леса чернично-злаковые	198.75	1.09 [+]
Широколиственные леса. Европейские широколиственные леса	Г. Восточно-европейские широколиственные леса	(118а). Дубовые и липово-дубовые леса северные с елью	182.49	17.26 [+]
		(118б). Дубняки и липодубняки южные, остепненные	170.64	15.35 [+]
		(118в). Приволжские липово-дубовые осветленные леса	198.41	-18.39 [-]
		(120а). Липняки, с дубом ( <i>Quercus L.</i> ) и вязом ( <i>Ulmus L.</i> ) разнотравно-злаковые	197.77	-31.18 [-]
Пристепненные и степные широколиственные и сосновые леса	Д. Островные и байрачные леса в типичной (луговой) и южной лесостепи	(87). Широколиственно-сосновые леса со степными кустарниками	141.08	-1.34 [-]
		(88, 89). Сосново-березовые остепненные леса, лесные угодья	150.13	-9.37 [-]
		(119б). Среднерусско-приволжские дубняки остепненные, разреженные	172.62	-14.52 [-]
		(122). Островные и байрачные леса среди сельскохозяйственных полей	137.46	26.14 [+]

**Таблица 4.** Удельный и суммарный углеродные балансы в лесных типах (подтипах) лесных формаций Волжского бассейна согласно двум прогнозно-климатическим моделям: умеренной E GISS (2200 г.) и экстремальной HadCM3 (2100 г.)

Тип (подтип) лесных формаций (по: Карта..., 1974)	Общая площадь, км <sup>2</sup> (%)	Модель E GISS		Модель HadCM3	
		Углеродный баланс			
		удельный, т/га	суммарный, млн т	удельный, т/га	суммарный, млн т
<b>А.</b> Еловые южно-таежные и широколиственно-еловые подтаежные леса	369'684 (60.5)	5.23 [+]	193.345	7.70 [+]	284.657
<b>Б.</b> Сосновые средне- и южно-таежные леса	93'555 (15.3)	10.21 [+]	95.520	8.52 [+]	79.709
<b>В.</b> Широколиственно-сосновые подтаежные леса	66'339 (10.9)	16.39 [+]	108.730	8.48 [+]	56.255
<b>Г.</b> Восточноевропейские широколиственные леса	40'835 (6.7)	-5.82 [-]	-23.766	4.64 [+]	18.947
<b>Д.</b> Островные леса типичной и южной лесостепи	14'547 (2.4)	-11.51 [-]	-16.744	-0.99 [-]	-1.440
<b>Е.</b> Бореальные и неморальные заболоченные леса и лесные болота	8'250 (1.4)	13.62 [+]	11.236	30.40 [+]	25.080
<b>Ж.</b> Неморальные поймы	17'361 (2.8)	7.91 [+]	13.733	8.36 [+]	14.514
Средневзвешенное	–	<b>6.26</b> [+]	–	<b>7.83</b> [+]	–
Сумма ...	<b>610'571</b>	–	<b>382.054</b>	–	<b>477.772</b>

Примечание. Лесопокрытая площадь для подтипа формаций Г принята равной 26 %, а для подтипа Д – 11 %.

базового содержания углерода, с общим увеличением  $\Delta C(Fa)$  с юго-востока на северо-запад.

Эти цифры вполне сопоставимы с данными других прогнозных региональных оценок. Так, расчеты, выполненные по модели IPSL-CM2 (согласно сценарию SRES-A2) для Восточно-Европейского субконтинента, выявили увеличение к середине XX в. чистой первичной продукции (NPP) и соответствующего депозита углерода в среднем на 20 % (Мохов и др., 2005; Mokhov et al., 2005). Это соответствует максимально возможному приращению углерода в древостоях плакорных смешанных лесов Волжского бассейна (см. табл. 2). Для лесов США, согласно прогнозным биогеохимическим моделям CEN (CENTERE) и TER (Terrestrial Ecosystem Model), оказалось, что по сценарию климатической модели UKMO-1987 (предшественнице модели HadCM3) удвоение содержания  $CO_2$  в атмосфере приводит к изменениям содержания углерода в диапазоне от -1.5–1.8 до 7.8–12.5 % (Aber et al., 2001). Даже по умеренной прогнозно-климатической модели E GISS удельный углеродный баланс групп лесных формаций (ГЛФ) Волжского бассейна будет иметь значительный размах колебаний – в пределах  $\pm (5-10) \div (45-58)$  т/га, что составит от 0.5–1.0 до 25–38 % содержания углерода в лесных экосистемах.

Согласно умеренному термоаридным тренду по модели E GISS на 2200 г., повышение температуры и увеличение осадков вызовут рост продуктивности лесов и суммарных запасов углерода в них (до 35–43 т/га, т. е. более чем на 20–25 % его базовых запасов), что будет означать накопительную регуляцию углеродного цикла. Этот процесс особенно широко распространится среди южно-таежных и подтаежных сосновых и хвойно-лиственных формаций (см. табл. 3, 4). В типичной и южной лесостепи, наоборот, произойдет снижение продуктивности островных и байрачных лесов и это вызовет соответственно дополнительную эмиссию  $CO_2$  в атмосферу (от 5–15 до 30 т/га и более, что составит от 3–5 до 35–30 % запасов углерода). Здесь отрицательное влияние повышения температур (особенно летних) скажется сильнее положительного воздействия роста атмосферных осадков. В результате эти леса будут выполнять эмиссионную роль в биотической регуляции углеродного цикла, усиливая глобальное потепление.

Таким образом, регуляция углеродного цикла со стороны бореальных и неморальных лесов Русской равнины должна быть достаточно пестрой не только по знаку, но и по абсолютным значениям. Такая пестрота между группами лесных формаций проявится в пределах каждого типа

(подтипа) растительности, поэтому итоговый эффект регуляции углеродного цикла для всей рассматриваемой территории Волжского бассейна будет существенно зависеть от соотношения площадей ГЛФ. Между тем высокие удельные значения углеродного баланса той или иной ГЛФ нередко не соответствуют занимаемой им площади.

Так, сосновые средне- и южно-таежные леса, обладающие значительными положительными значениями  $\Delta C(Fa)$  по обоим климатическим сценариям, имеют не очень большие площади, поэтому их итоговый вклад в региональный сток углерода окажется достаточно скромным. Эмиссионная регуляция углеродного цикла будет незначительной со стороны наиболее распространенных (занимающих более 30 % площади региона) темнохвойных южно-таежных и смешанных лесов – по причине низких отрицательных значений  $\Delta C(Fa)$ . И наоборот, менее распространенные широколиственно-сосновые подтаежные леса станут объектами наиболее мощного стока  $\text{CO}_2$  при термогумидном климатическом тренде, что и предопределяет их доминирующую накопительную роль в региональной биотической регуляции углеродного цикла. В восточноевропейских же широколиственных лесах, ввиду их незначительных современных площадей, термогумидный тренд вызовет незначительную отрицательную регуляцию. В целом лесной покров рассматриваемой территории Волжского бассейна должен оказывать при потеплении накопительную регуляцию углеродного цикла – как в удельных значениях  $\Delta C(Fa)$ , так и по суммарному балансу (табл. 4). Примерно такие же масштабы регулирующего воздействия лесов можно ожидать и по экстремальной термоаридизации.

Важно сопоставить регуляцию углеродного цикла лесными экосистемами при умеренном (E GISS) и экстремальном (HadCM3) термоаридных сигналах, поскольку второй из них может оказаться вполне реальным при сохранении текущей тенденции глобального потепления. При экстремальном потеплении лесной покров Волжского бассейна способен приобрести более распространенный и в целом гораздо более высокий накопительный углеродный баланс (табл. 4). В целом можно констатировать *общее смягчающее воздействие лесного покрова бассейна на климатические изменения по мере усиления самого гидротермического сигнала.*

**Углеродные сценарии лесных формаций в картографическом выражении.** Согласно

полученной картографической модели, максимальными базовыми удельными запасами углерода (свыше 200 т/га) обладают южно-таежные и подтаежные сосняки и развитые на их месте березняки (рис. 2).

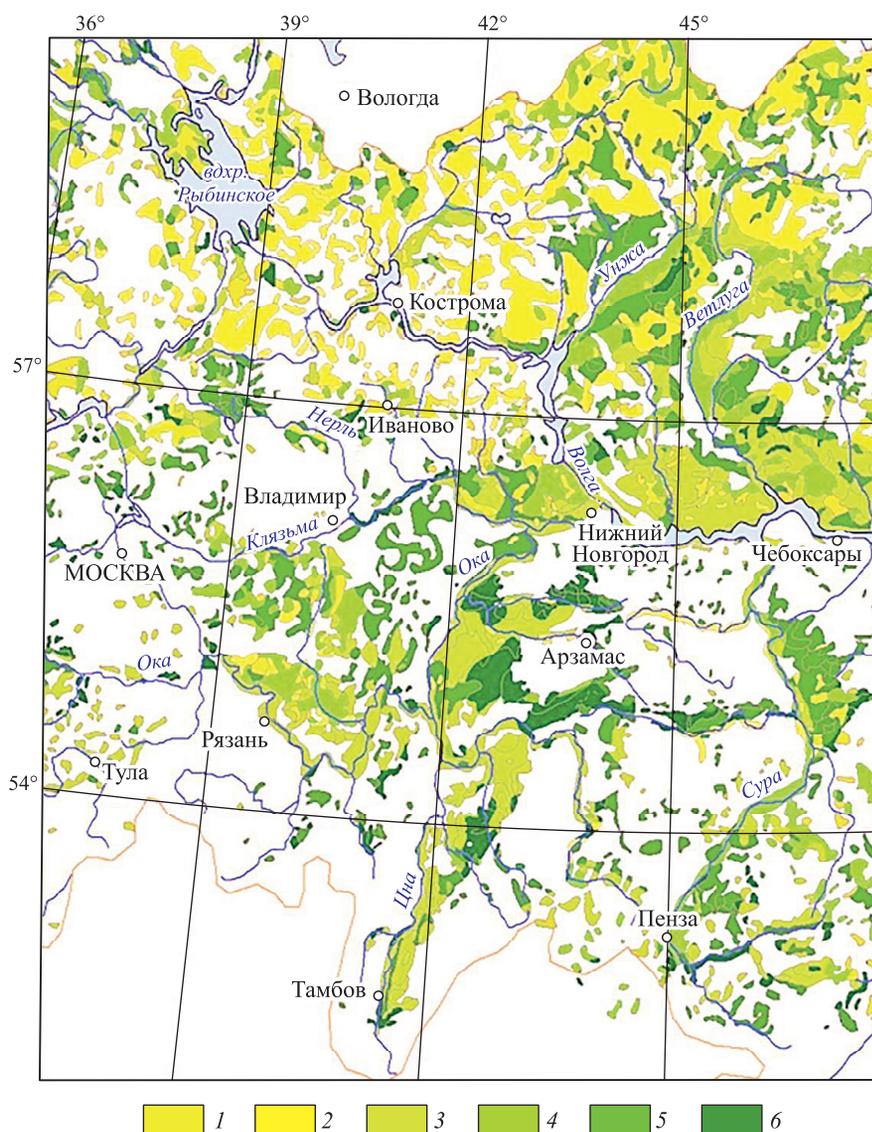
Широколиственно-сосновые подтаежные леса, а также дубравы и липняки неморально-лесной подзоны, равно как и их дериваты, содержат гораздо меньше углерода (150–180 т/га). Средние значения углеродных запасов приходятся на средне- и южно-таежные еловые и широколиственно-еловые подтаежные леса. Полученные эмпирические данные в целом согласуются с обзорными материалами о фитомассе лесов по отдельным породам и по запасам в них углерода на территории соответствующих районов Европейской России (Усольцев, 2007), однако существенно уточняют их, поскольку характеризуют реальные лесные формации, а не идеализированные чистые насаждения.

Прогнозная карта углеродного баланса лесных формаций Волжского бассейна детализирует описанную выше общую картину стока и эмиссии парниковых газов для умеренного термоаридного тренда (рис. 3). Средне- и южно-таежные ельники и замещающие их березняки по всей северной и северо-восточной части Волжского бассейна будут снижать продуктивность (из-за роста атмосферного увлажнения) и тем самым должны способствовать глобальному потеплению ( $\Delta C(Fa)$  составит от –15–30 до 45–65 т/га).

Слабо выраженную эмиссионную регуляцию углеродного цикла  $\Delta C(Fa) = -10 \div 35$  т/га следует ожидать от дубрав и липняков лесостепной зоны. В то же время коренные широколиственно-сосновые леса и их дериваты (березняки и осинники) в широкой полосе, охватывающей подтаежную зону и неморально-лесную подзону, проявят достаточно резко выраженную накопительную регуляцию углеродного цикла, поскольку будут увеличивать продуктивность ( $\Delta C(Fa) = 25-45$  т/га, местами до 60–85 т/га).

**Углеродные балансы лесных формаций в системе их термоаридных преобразований.** Рассмотренные углеродные балансы лесных формаций Волжского бассейна представляют собой первое приближение в оценках биотической регуляции углеродного цикла и описывают лишь стартовую реакцию лесов на данный климатический сигнал в соответствии с их исходной фитоценологической структурой.

Однако в процессе воздействия этого сигнала происходит функциональная, а затем и



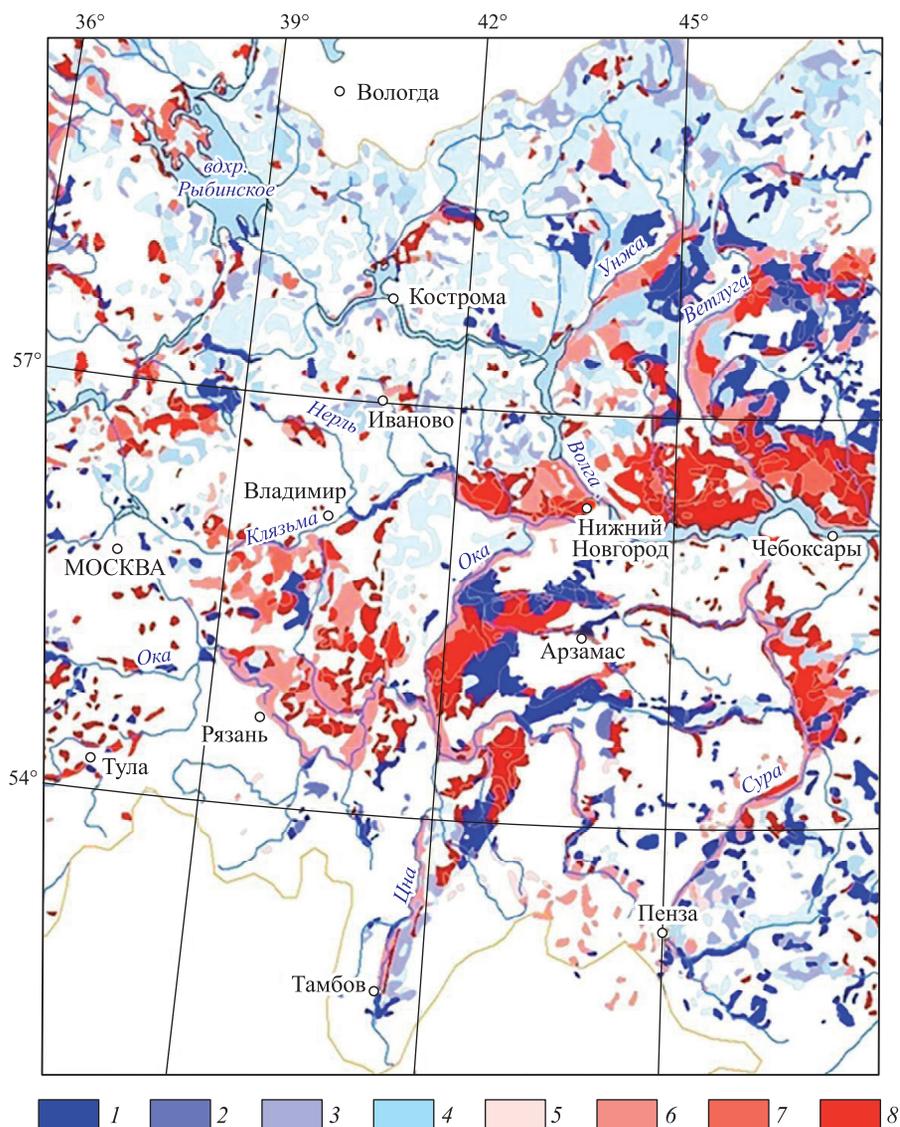
**Рис. 2.** Удельные запасы углерода в лесных формациях Волжского бассейна. Масштаб 1 : 4 100 000. Карта рассчитана и составлена Л. С. Шарой. Ареалы даны по картам лесов (Карта..., 1974; Растительность..., 1987).

Удельные базовые запасы углерода, т/га: 1 – 104–116; 2 – 116–130; 3 – 130–150; 4 – 150–170; 5 – 170–206; 6 – 206–280.

структурная адаптация лесных сообществ к новым гидротермическим условиям. Механизмы этой адаптации описаны в виде системы вероятностей и скоростей фитоценологических переходов (Коломыц, 2018). Преобразование лесного сообщества типа А в сообщество другого типа Б с той или иной вероятностью должно сопровождаться соответствующими изменениями биологического круговорота и углеродного баланса. Допускается, что значения этих изменений будут адекватны вероятности перехода А → Б.

Второе приближение осуществлялось на примере умеренного термоаридного регионального тренда на срок до 2200 г. по модели E GISS,

с использованием модели вероятностей переходов между группами растительных формаций на период до 2100–2150 гг. согласно модели GISS-93 (Коломыц, 2018). Обе модели дают в целом близкие значения сдвигов основных климатических характеристик – температур января и июля, атмосферных осадков (годовых, холодного и теплого периодов), а также годового коэффициента увлажнения. Следует отметить, что по температурному тренду эти климатические прогнозы вписываются в необходимый предельный уровень глобального потепления к середине XXI столетия, который предусмотрен Парижским соглашением не более чем на 1.5–2 °C (Adoption..., 2015).



**Рис. 3.** Удельный баланс углерода в растительных формациях Волжского бассейна на 2200 г. по прогнозно-климатической модели E GISS (умеренный термоаридный тренд). Масштаб 1 : 4 200 000. Карта рассчитана и составлена Л. С. Шарой. Ареалы даны по картам лесов (Карта..., 1974; Растительность..., 1987).

Углеродный баланс, т/га: 1 – (–66... –16); 2 – (–16...–12); 3 – (–12...–10); 4 – (–10...0; 5 – 0–10; 6 – 10–25; 7 – 25–40; 8 – 40–89.

В табл. 5 представлены значения углеродных балансов лесных формаций Волжского бассейна в их начальном и конечном состояниях на прогнозный период до 2200 г. по модели E GISS. Конечными являются средневзвешенные значения параметра  $\Delta C(Fa)$ , при расчетах которых в качестве весовых коэффициентов приняты вероятности стабилизации каждой группы формаций и вероятности ее перехода во все другие группы. Углеродные балансы финального состояния лесных формаций характеризуют механизмы регуляции ими углеродного цикла уже после произошедших за прогнозируемый интервал их

преобразований под действием данного термоаридного сигнала.

В целом процесс климатогенной трансформации коренных лесных формаций Волжского бассейна даже по умеренному термоаридному тренду e-гиссовской модели приводит к общему значительному снижению эффективности накопительной биотической регуляции углеродного цикла – в среднем на 34 %.

Кроме того, климатогенная трансформация лесных формаций приводит к общему выравниванию их первоначально достаточно контрастных (от плюсовых до минусовых) значений

**Таблица 5.** Удельный углеродный баланс лесных формаций Волжского бассейна в их начальных и конечных состояниях к прогнозируемому сроку 2200 г. умеренного потепления согласно модели E GISS

Зональные типы (см. табл. 4)	Региональные варианты	Группы формаций	Удельный углеродный баланс (т/га), состояние	
			начальное	конечное
А	Восточно-европейские	Еловые кустарничково-зеленомошные	30.78 [+]	10.98 [+]
		Еловые кустарничково-травяные	-6.48 [-]	7.16 [+]
		Широколиственно-еловые травяные	16.45 [+]	4.00 [+]
	Камско-предуральские	Пихтово-еловые кустарничковые, зеленомошные и травяные	-7.58 [-]	0.75 [+]
Пихтово-еловые и ширококолиственно-хвойные неморально-травяные		11.92 [+]	-3.09 [-]	
Б, В	Верхне-волжские	Сосновые с елью, кустарничково-зеленомошные	10.21 [+]	4.21 [+]
		Сосновые с дубом и ширококолиственно-сосновые с елью	16.39 [+]	-0.14 [-]
Г	Восточно-европейские	Липово-дубовые и липовые с примесью других широколиственных пород	-5.82 [-]	-1.83 [-]
Д	Причерноморского типа	Сосновые и широколиственные остепненные со степными кустарниками	-12.73 [-]	-1.74 [-]
		Луговые степи с лесами из дуба	-14.96 [-]	4.79 [+]
Среднее ...			3.82 [+]	2.51 [+]

параметра  $\Delta C(Fa)$ : формации, которые имели стартовый эмиссионный углеродный баланс, к концу прогнозного периода повышают его вплоть до положительных значений, а в формациях с высоким накопительным балансом происходит его снижение (тоже до нулевых и даже отрицательных величин). Примерами первого случая служат средне- и южно-таежные восточноевропейские и камско-предуральские темнохвойные сообщества, а второго – подтаежные широколиственно-темнохвойные леса, средне- и южно-таежные сосняки всего бассейна (табл. 5). Снижение годового коэффициента увлажнения приводят к тому, что подтаежные бореальные сообщества при термоаридном тренде на 40–50 % переходят в функциональные состояния типичной и даже южной лесостепи (Коломыц, 2018), и это приводит к снижению их экологических и ресурсных функций в несколько раз.

С другой стороны, остепненные редкостойные дубняки и сосняки типичной лесостепи резко сокращают свои эмиссионные углеродные балансы, что вызвано приобретением ими более чем на 40 % функциональных свойств целой серии лежащих севернее бореальных лесов – от среднетаежных до подтаежных. Широколиственные леса северной лесостепи в процессе своей климатогенной трансформации остаются источником эмиссии  $\text{CO}_2$  в атмосферу, однако с семикратным ослаблением этого процесса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представленный опыт расчетов и ландшафтно-экологического анализа биотической регуляции углеродного цикла демонстрирует *эффективность применения методов биогеоценологии к решению системных задач экологического прогнозирования*, связанных, в частности, с ситуацией глобального потепления. Во-первых, выявляются разнообразные механизмы отображения глобальных биосферных процессов в функционировании и структуре экосистем локальной и региональной размерности. Во-вторых, устанавливаются направления и интенсивность обратного дифференцированного воздействия лесной фитобиоты на химический состав и парниковый эффект атмосферы с соответствующей оценкой их экологических последствий. Именно в интерактивном воздействии лесного покрова на приземную атмосферу в условиях меняющегося климата проявляются механизмы, регулирующие структуру потоков парниковых газов.

2. Разработанные на примере лесных экосистем Волжского бассейна *дискретные эмпирико-статистические модели* описывают вероятностную будущую картину биотической регуляции углеродного цикла в системе лес – атмосфера по известным климатическим сценариям. На основе прогнозных моделей в каж-

дом экорегионе выявляются локальные ряды и зонально-региональные типы регуляции лесным покровом содержания  $CO_2$  в атмосфере при развитии климатической термоаридизации. В соответствии с площадным распределением этих типов оценивается общий региональный вклад лесной фитобиоты в устойчивость континентальной биосферы.

3. Установлено типологическое и пространственное разнообразие механизмов воздействия лесных экосистем как целостных образований на углеродный обмен земной поверхности с атмосферой. Соответственно выявлен неоднозначный вклад в общий процесс поглощения парниковых газов как локальными лесными ассоциациями, так и зональными формациями в лесном поясе Русской равнины. Одни из них могут осуществлять накопительную (в соответствии с известным принципом Ле Шателье), а другие – эмиссионную биотическую регуляцию углеродного цикла. Это позволило установить наиболее вероятную роль бореальных и суббореальных лесов в снижении парникового эффекта атмосферы при глобальном потеплении, а также оценить, насколько в действительности леса умеренного пояса способны поддерживать устойчивость континентальной биосферы в условиях меняющегося климата.

4. Биотическая регуляция углеродного цикла хвойными, смешанными и широколиственными лесами Волжского бассейна, по-видимому, будет оказывать как накопительное, так и эмиссионное влияние на состояние континентальной биосферы. Далеко не все ассоциации и формации бореальных и суббореальных лесов выполняют роль «легких планеты», как это нередко постулируется в отечественной и зарубежной литературе (Кудеяров и др., 2007; Schimel et al., 2001; и др.). Концентрация в бореальных лесах более 40 % углерода, присутствующего во всех биомсах суши (Исаев, Коровин, 1999), еще не означает, что все хвойные и смешанные лесные сообщества способны выполнять глобальные экологические функции по поглощению парниковых газов и соответствующей стабилизации состояния биосферы в условиях меняющегося климата. Эти функции существенно дифференцируются в зависимости от местных геоморфологических и гидроэдафических условий, а также от того, в какой сукцессионной стадии находится лесное сообщество. В конечном итоге осуществляемая этим сообществом биотическая регуляция углеродного цикла может иметь как накопительный, так и эмиссионный эффект.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-05-00024-а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

- Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с. [Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Lupyan E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V. Sputnikovoe kartografirovaniye rasritelnogo pokrova Rossii (Land cover mapping over Russia using Earth observation data). Moscow: IKI RAN (Space Res. Inst. Rus. Acad. Sci.), 2016. 208 p. (in Russian with English summary)].
- Барталев С. А., Еришов Д. В., Исаев А. С., Лупян Е. А., Уваров И. А. Карта растительного покрова России. М.: ИКИ РАН; ЦЭПЛ РАН, 2010 [Bartalev S. A., Ershov D. V., Isaev A. S., Lupyan E. A., Uvarov I. A. Karta rastitelnogo pokrova Rossii (Map of vegetation cover of Russia). Moscow: IKI RAN; TSEPL RAN (Space Res. Inst. Rus. Acad. Sci.; Center Ecol. & Product. For. Rus. Acad. Sci.), 2010 (in Russian with English summary)].
- Глазовская М. А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР: Учеб. пособие для ун-тов по спец. «География». М.: Высш. школа, 1988. 327 с. [Glazovskaya M. A. Geokhimiya prirodnyh i tekhnogennykh landshaftov SSSR: Ucheb. posobie dlya un-tov po spets. «Geografiya» (Geochemistry of natural and technogenic landscapes of the USSR: Textbook. manual for high fur boots on special. «Geography»). Moscow: Vyssh. shkola, 1988. 327 p. (in Russian)].
- Замолодчиков Д. Г., Грабовский В. И., Коровин Г. Н., Курц В. А. Оценка и прогноз углеродного бюджета лесов Вологодской области по канадской модели CBM-CFS // Лесоведение. 2008. № 6. С. 3–14 [Zamolodchikov D. G., Grabovsky V. I., Korovin G. N., Kurz V. A. Otsenka i prognoz uglerodnogo byudzheta lesov Vologodskoy oblasti po kanadskoy modeli CBM-CFS (Assessment and projection of carbon budget in forest of Vologda Region using the Canadian model CBM-CFS) // Lesovedenie (For. Sci.). 2008. N. 6. P. 3–14 (in Russian with English abstract)].
- Исаев А. С., Коровин Г. Н. Углерод в лесах Северной Евразии // Круговорот углерода на территории России. М.: Мин-во науки и технол. РФ, 1999. С. 63–95 [Isaev A. S., Korovin G. N. Uglerod v lesakh Severnoy Evrazii (Carbon in the forests of Northern Eurasia) // Krugovorot ugleroda na territorii Rossii (Carbon cycle in Russia). Moscow: Min-vo nauki i tehnol. RF (Min. Sci. & Technol. Rus. Fed.), 1999. P. 63–95 (in Russian)].
- Карта растительности Европейской части СССР. М-б 1 : 1 000 000 / ред. Т. И. Исаченко, Е. М. Лавренко. М.: Науч.-ред. картосостав. часть ГУГК, 1974. 6 л. [Karta rastitelnosti evropeyskoy chasti SSSR. M-b 1 : 1 000 000 (Vegetation map of the European part of the USSR. Scale 1 : 1 000 000) / T. I. Isachenko, E. M. Lavrenko (Eds.). Moscow: Nauch.-red. kartosostav. chast GUGK (Sci.-Ed. Mapmaking Part Main Adm. Geod. & Map.), 1974. 6 p. (in Russian)].

- Кобак К. И. Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 248 с. [Kobak K. I. Bioticheskie komponenty ugleirodnogo tsikla (Biological components of carbon cycle). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988. 248 p. (in Russian with English summary)].
- Коломыц Э. Г. Экспериментальная географическая экология. Записки географа-натуралиста. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2018. 716 с. [Kolomyts E. G. Experimentalnaya geographicheskaya ekologiya. Zapiski geographa-naturalista (Experimental geographical ecology. The records of geographer-naturalist). Moscow: Tov-vo nauch. izd. KMK (Partnership Sci. Editions KMK), 2018. 716 p. (in Russian with English title, summary and contents)].
- Коломыц Э. Г., Розенберг Г. С., Шарая Л. С. Методы ландшафтной экологии в прогнозных оценках биотической регуляции углеродного цикла при глобальном потеплении // Экология. 2009. № 6. С. 403–410 [Kolomyts E. G., Rozenberg G. S., Sharaya L. S. Metody landshaftnoy ekologii v prognoznykh otsenkakh bioticheskoy regulyatsii ugleirodnogo tsikla pri globalnom poteplenii (Methods of landscape ecology in prognostic estimation of the biotic regulation of the carbon cycle under conditions of global climate warming) // Ekologiya (Ecology). 2009. N. 6. P. 403–410 (in Russian with English abstract)].
- Кондратьев К. Я., Демирчян К. С. Глобальные изменения климата и круговорот углерода // Изв. Рус. геогр. об-ва. 2000. Т. 132. № 4. С. 1–20 [Konratev K. Ya., Demirchyan K. S. Globalnye izmeneniya klimata i krugovorot ugleiroda (Global climate changes and carbon cycle) // Izv. Rus. geogr. ob-va (Proc. Rus. Geogr. Soc.). 2000. V. 132. N. 4. P. 1–20 (in Russian with English abstract)].
- Кондратьев К. Я., Лосев К. С., Ананичева М. Д., Чеснокова И. В. Естественно-научные основы устойчивости жизни. М.: ЦС АГО, 2003. 240 с. [Konratev K. Ya., Losev K. S., Ananicheva M. D., Chesnokova I. V. Estestvenno-nauchnye osnovy ustoychivosti zhizni (Natural scientific foundations of life sustainability). Moscow: TsS AGO (Central Council Astron.-Geod. Ass.), 2003. 240 p. (in Russian)].
- Кудеяров В. Н., Заварзин Г. А., Благодатский С. А., Борисов А. В., Воронин П. Ю., Демкин В. А., Демкина Т. С., Евдокимов И. В., Замолодчиков Д. Г., Карелин Д. В., Комаров А. С., Курганова И. Н., Ларионова А. А., Лопес де Гереню В. О., Уткин А. И., Чертов О. Г. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / ред. Г. А. Заварзин. М.: Наука, 2007. 324 с. [Kudeyarov V. N., Zavarzin G. A., Blagodatskiy S. A., Borisov A. V., Voronin P. Yu., Demkin V. A., Demkina T. S., Evdokimov I. V., Zamolodchikov D. G., Karelin D. V., Komarov A. S., Kurganova I. N., Larionova A. A., Lopes de Gerenyu V. O., Utkin A. I., Chertov O. G. Puly i potoki ugleiroda v nazemnykh ekosistemakh Rossii (Pools and fluxes of carbon in terrestrial ecosystems of Russia) / G. A. Zavarzin (Ed.). Moscow: Nauka (Science), 2007. 315 p. (in Russian with English title, summary and contents)].
- Мохов И. И., Дюфрен Ж.-Л., Ле Трет Э., Тихонов В. А., Чернокульский А. В. Изменения режимов засух и биопродуктивности наземных экосистем в регионах Северной Евразии по расчетам с глобальной климатической моделью с углеродным циклом // Докл. АН. 2005. Т. 405. № 6. С. 810–814 (Mokhov I. I., Dufresne J.-L., Le Treut H., Tikhonov V. A., Chernokulsky A. V. Izmeneniye rezhimov zasukhi i bioproduktivnosti nazemnykh ekosistem v regionakh Severnoy Evrazii po raschetam s globalnoy klimaticheskoy modelyu s ugleirodnym tsiklom (Changes in drought and bioproductivity regimes in land ecosystems in regions of Northern Eurasia based on calculations using a global climatic model with carbon cycle) // Dokl. AN (Pro. Rus. Acad. Sci.). 2005. V. 405. N. 6. P. 810–814 (in Russian with English abstract)].
- Разнообразие и динамика лесных экосистем России. В 2-х кн. Кн. 1 / ред. А. С. Исаев. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2012. 461 с. [Raznoobrazie i dinamika lesnykh ekosistem Rossii (Diversity and dynamics of forest ecosystems of Russia). In 2 books. Book 1 / A. S. Isaev (Ed.). Moscow: Tov-vo nauch. izd. KMK (Partnership Sci. Editions KMK), 2012. 461 p. (in Russian)].
- Распоряжение Минприроды России от 30.06.2017 № 20-р «О методических указаниях по количественному определению объема поглощения парниковых газов» (с изменениями, утв. распоряжением Минприроды России от 27.12.2018 № 41-р). М.: Минприроды России, 2017. 67 с. [Rasporyazhenie Minprirody Rossii ot 30.06.2017 N. 20-r «O metodicheskikh ukazaniyakh po kolichestvennomu opredeleniyu obyema pogloshcheniya parnikovoykh gazov» (s izmeneniyami, utv. rasporyazheniem Minprirody Rossii ot 27.12.2018 N. 41-r) (By the order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated June 30, 2017 N. 20-r «On methodological guidelines for the quantitative determination of the volume of absorption of greenhouse gases» (as amended, approved by the order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated December 27, 2018 N. 41-r)). Moscow: Minprirody Rossii (Min. Nat. Res. Environ. Rus.), 2017. 67 p. (in Russian)].
- Растительность Европейской части СССР и Кавказа. М-б 1 : 2 000 000 / ред. Т. В. Котова. М.: ГУГК, 1987. 4 л. [Rastitelnost Evropeyskoy chasti SSSR i Kavkaza (Vegetation of the European part of USSR an Caucasus. Scale 1 : 2 000 000 / T. V. Kotova (Ed.)). Moscow. GUGK (Main Adm. Geod. & Map.), 1987. 4 p. (in Russian)].
- Сочава В. Б. Растительный покров на тематических картах. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1979. 189 с. [Sochava V. B. Rastitelnyy pokrov na tematicheskikh kartakh (Vegetation cover on thematic maps). Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie (Sci. Sib. Br.), 1979. 189 p. (in Russian)].
- Сукачев В. Н. Избранные труды. Т. 1: Основы лесной типологии и биогеоценологии. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1972. 418 с. [Sukachev V. N. Izbrannyye trudy. T. 1: Osnovy lesnoy tipologii i biogeotsenologii (Selected works. V. 1. Fundamentals of forest typology and biogeocenology). Leningrad: Nauka. Leningrad otd-nie (Sci. Leningrad Br.), 1972. 418 p. (in Russian)]. Тимофеев-Ресовский Н. В. Структурные уровни биологических систем // Системные исследования. Ежегодник. 1970. М.: Наука, 1970. С. 80–113 [Timofeev-Resovskiy N. V. Strukturnyye urovni biologicheskikh system (Structural levels of biological systems) // Sistemnyye issledovaniya. Ezhegodnik (System studies. Yearbook). 1970. Moscow: Nauka (Science). P. 80–113 (in Russian)].
- Тихов А. А. Биосферные функции природных экосистем России. М.: Наука, 2005. 308 с. [Tishkov A. A. Biosfernyye funktsii prirodnykh ekosistem Rossii. M.: Nauka, 2005. 308 p. (in Russian)].

- funktsii prirodnykh ekosistem Rossii (Biosphere functions of natural ecosystems of Russia). Moscow: Nauka (Science), 2005. 308 p. (in Russian)].
- Усольцев В. А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 636 с. [Usoltsev V. A. Biologicheskaya produktivnost lesov Severnoy Evrazii: metody, baza dannyh i ee prilozheniya (Biological productivity of Northern Eurasia's forests: Methods, datasets, applications). Yekaterinburg: UrO RAN (Ural Br. Rus. Acad. Sci.), 2007. 636 p. (in Russian with English title, summary, contents, and conclusion)].
- Уткин А. И., Замолодчиков Д. Г., Честных О. В. Пулы углерода фитомассы, биологического углерода и азота почв в лесном фонде России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2006. № 2. С. 18–34 [Utkin A. I., Zamolodchikov D. G., Chestnykh O. V. Puly ugleroda fitomassy, biologicheskogo ugleroda i azota pochv v lesnom fonde Rossii (Pool of carbon phytomass biological carbon and soil nitrogen in the Russian forest fund) // Izv. RAN. Ser. geogr. (Proc. Rus. Acad. Sci. Ser. Geogr.). 2006. N. 2. P. 18–34 (in Russian with English abstract)].
- Шарый П. А. Аналитическая ГИС Эко. 2001 [Shary P. A. Analiticheskaya GIS Eco (Analytic GIS Eco). 2001. (in Russian)]. <https://gis-lab.info/forum/viewtopic.php?t=10540>
- Швиденко А. З. Глобальные изменения и российская лесная таксация // Лесн. таксация и лесоустройство. 2012. № 1 (47). С. 52–76 [Shvidenko A. Z. Globalnye izmeneniya i rossiyskaya lesnaya taksatsiya (Global change and forest mensuration) // Lesn. taksatsiya i lesoostroystvo (For. Invent. For. Plann.). 2012. N. 1 (47). P. 52–76 (in Russian with English abstract)].
- Швиденко А. З., Нильссон С., Столбовой В. С., Рожков В. А., Глюк М. Опыт агрегированной оценки основных показателей биопродукционного процесса и углеродного бюджета наземных экосистем России. 2. Нетто-первичная продукция экосистем // Экология. 2001. № 2. С. 83–90 [Shvidenko A. Z., Nilsson S., Stolbovoi V. S., Rozhkov V. A., Gluck M. Opyt agregirovannoy otsenki osnovnykh pokazateley bioproduktsionnogo protsesssa i ugle-rodного byudzheta nazemnykh ecosystem Rossii. 2. Netto-pervichnaya produktsiya ekosistem (Aggregated estimation of basic parameters of biological production and the carbon budget of Russian terrestrial ecosystems: 2. Net primary production) // Ekologiya (Ecology). 2001. N. 2. P. 83–90 (in Russian with English abstract)].
- Швиденко А. З., Щепашенко Д. Г., Кракнер Ф., Онучин А. А. Переход к устойчивому управлению лесами России: теоретико-методические предпосылки // Сиб. лесн. журн. 2017. № 6. С. 3–25. [Shvidenko A. Z., Schepaschenko D. G., Kraxner F., Onuchin A. A. Perekhod k ustoychivomu upravleniyu lesami Rossii: teoretiko-metodicheskie predposylki (Transition to sustainable forest management in Russia: theoretical and methodological backgrounds) // Sib. lesn. zhurn. (Sib. J. For. Sci.). 2017. N. 6. P. 3–25 (in Russian with English abstract)].
- Щепашенко Д. Г., Мухортова Л. В., Швиденко А. З., Ведрова Э. Ф. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. С. 123–132 [Schepaschenko D. G., Mukhtorova L. V., Shvidenko A. Z., Vedrova E. F. Zapasy organicheskogo ugleroda v pochvakh Rossii (The pool of organic carbon in the soils of Russia) // Pochvovedenie (Soil Sci.). 2013. N. 2. P. 123–132 (in Russian with English abstract)].
- Шмальгаузен И. И. Кибернетические вопросы биологии. Новосибирск: Наука, 1968. 223 с. [Shmalgauzen I. I. Kiberneticheskie voprosy biologii (Cybernetic questions of biology). Novosibirsk: Nauka, 1968. 223 p. (in Russian)].
- Aber J., Neilson R. P., McNulty S., Lenihan J. M., Bachelet D., Drapek R. J. Forest processes and global environmental change: Predicting the effects of individual and multiple stressors // BioScience. 2001. V. 51. N. 9. P. 735–751.
- Adoption of the Paris Agreement // FCCC/CP. 2015. L. 9. Rev. 1. 32 p.
- Ashby W. R. An introduction to cybernetics. New York: John Wiley & Sons Inc., 1956. 295 p.
- Climate change 1995: the science of climatic change. Contribution of working group 1 to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change / J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, K. Maskell (Eds.) Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 1996. 572 p.
- Gamon J. A., Huemmrich K. F., Peddle D. R., Chen J., Fuentes D., Hall F. G., Kimball J. S., Goetz S., Gu J., McDonald K. C., Miller J. R., Moghaddam M., Rahman A. F., Roujean J.-L., Smith E. A., Walthall C. L., Zarco-Tejada P., Hu B., Fernandes R., Cihlar J. Remote sensing BOREAS: Lessons learned // Rem. Sens. Environ. 2004. V. 89. Iss. 2. P. 139–162.
- Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A. Z., Schepachenko D. G. Boreal forest health and global change // Science. 2015. V. 349. Iss. 6250. P. 819–822.
- Gorshkov V. G. Physical and biological bases of life stability: Man, biota, environment. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1995. 340 p.
- Grace J. Understanding and managing the global carbon cycle // J. Ecol. 2004. V. 92. Iss. 2. P. 189–202.
- Hansen J., Sato M., Ruedy R., Kharecha P., Lacis A., Miller R., Nazarenko L., Lo K., Schmidt G. A., Russell G., Aleinov I., Bauer S., Baum E., Cairns B., Canuto V., Chandler M., Cheng Y., Cohen A., Del Genio A., Faluvegi G., Fleming E., Friend A., Hall T., Jackman C., Jonas J., Kelley M., Kiang N. Y., Koch D., Labov G., Lerner J., Menon S., Novakov T., Oinas V., Perlwitz Ja., Perlwitz Ju., Rind D., Romanou A., Schmunk R., Shindell D., Stone P., Sun S., Streets D., Tausnev N., Thresher D., Unger N., Yao M., Zhang S. Climate simulations for 1880–2003 with GISS modelE // Climate Dynamics. 2007. V. 29. Iss. 7–8. P. 661–696.
- Kolomyts E. G., Rozenberg G. S., Sharaya L. S. Methods of landscape ecology in prognostic estimation of the biotic regulation of the carbon cycle under conditions of global climate warming // Rus. J. Ecol. 2009. V. 40. N. 6. P. 379–386 (Original Rus. Text © E. G. Kolomyts, G. S. Rozenberg, L. S. Sharaya, 2009, publ. in Ekologiya. 2009. N. 6. P. 403–410).
- Kurz W. A., Apps M. J., Banfield G. E., Stinson G. Forest carbon accounting at the operation scale // The For. Chron. 2002. V. 78. N. 5. P. 672–679.
- Le Quere C., Moriarty R., Andrew R. M., Peters G. P., Ciais P., Friedlingstein P., Jones S. D., Sitch S., Tans P., Arneeth A., Boden T. A., Bopp L., Bozec Y., Canadell J. G., Chini L. P., Chevallier F., Cosca C. E., Harris I., Hoppema M.,

- Houghton R. A., House J. I., Jain A. K., Johannessen T., Kato E., Keeling R. F., Kitidis V., Klein Goldewijk K., Koven C., Landa C. S., Landschützer P., Lenton A., Lima I. D., Marland G., Mathis J. T., Metzl N., Nojiri Y., Olsen A., Ono T., Peng S., Peters W., Pfeil B., Poulter B., Raupach M. R., Regnier P., Rödenbeck C., Saito S., Salisbury J. E., Schuster U., Schwinger J., Séférian R., Segschneider J., Steinhoff T., Stocker B. D., Sutton A. J., Takahashi T., Tilbrook B., Werf G. R. van der, Viovy N., Wang Y.-P., Wanninkhof R., Wiltshire A., Zeng N. Global carbon budget 2014 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2015. V. 7. Iss. 1. P. 47–85.
- Mokhov I. I., Dufresne J.-L., Le Treut H., Tikhonov V. A., Chernokulsky A. V. Changes in drought and bioproductivity regimes in land ecosystems in regions of Northern Eurasia based on calculations using a global climatic model with carbon cycle // *Doklady Earth Sci.* 2005. V. 405 A. N. 9. P. 1414–1418 (Original Rus. Text © I. I. Mokhov, J.-L. Dufresne, H. Le Treut, V. A. Tikhonov A. V. Chernokulsky, 2005, publ. in *Doklady Akademii Nauk*. 2005. V. 405. N. 6. P. 810–814).
- Montgomery D. C., Peck E. A. Introduction to linear regression analysis. New York: Wiley, 1982. 504 p.
- Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V., Gluck M., Jonas M., Obersteiner M. Full carbon account for Russia. Interim Report IR-00-021. Laxenburg: IIASA, 2000. 181 p.
- Pope V. D., Gallani M. L., Rowntree P. R., Stratton R. A. The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model: HadAM<sub>3</sub> // *Climate Dynamics*. 2000. V. 16. Iss. 2–3. P. 123–146.
- Quegan S., Beer C., Shvidenko A., McCallum I., Handoh I. C., Peylin P., Rödenbeck C., Lucht W., Nilsson S., Schmulius C. C. Estimating the carbon balance of central Siberia using a landscape-ecosystem approach, atmospheric inversion and Dynamic Global Vegetation Models // *Global Change Biol.* 2011. V. 17. Iss. 1. P. 351–365.
- Schepaschenko D., McCallum I., Shvidenko A., Fritz S., Kraxner F., Obersteiner M. A new hybrid land cover data set for Russia: a methodology for integrating statistics, remote sensing and in situ information // *J. Land Use Sci.* 2011. V. 6. Iss. 4. P. 245–259.
- Schepaschenko D. G., Mukhortova L. V., Shvidenko A. Z., Vedrova E. F. The pool of organic carbon in the soils of Russia // *Euras. Soil Sci.* 2013. V. 46. N. 2. P. 107–116 (Original Rus. Text © D. G. Schepaschenko, L. V. Mukhortova, A. Z. Shvidenko, E. F. Vedrova, 2013, publ. in *Pochvovedenie*. 2013. N. 2. P. 123–132).
- Schimel D. S., House J. I., Hibbard K. A., Bousquet P., Ciais P., Peylin P., Braswell B. H., Apps M. J., Baker D., Bondeau A., Canadell J., Churkina G., Cramer W., Denning A. S., Field C. B., Friedlingstein P., Goodale C., Heimann M., Houghton R. A., Melillo J. M., Moore III B., Murdiyarso D., Noble I., Pacala S. W., Prentice I. C., Raupach M. R., Rayner P. J., Scholes R. J., Steffen W. L., Wirth C. Resent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems // *Nature*. 2001. V. 414. N. 6860. P. 169–172.
- Shvidenko A., Nilsson S. A synthesis of the impact of Russian forests on the global carbon budget for 1961–1998 // *Tellus B*. 2003. V. 55. Iss. 2. P. 391–415.
- Shvidenko A. Z., Nilsson S., Stolbovoi V. S., Rozhkov V. A., Gluck M. Aggregated estimation of basic parameters of biological production and the carbon budget of Russian terrestrial ecosystems: 2. Net primary production // *Rus. J. Ecol.* 2001. V. 32. Iss. 2. P. 71–77 (Original Rus. Text © A. Z. Shvidenko, S. Nilsson, V. S. Stolbovoi, V. A. Rozhkov, M. Gluck, 2001, publ. in *Ekologiya*. 2001. N. 2. P. 83–90).
- SRTM30 Documentation, 2000. [https://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat/tools/SRTM30\\_Documentation.html](https://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat/tools/SRTM30_Documentation.html)
- Stinson G., Kurz W. A., Smyth C. E., Neilson E. T., Dymond C. C., Metsaranta J. M., Boisvenue C., Rampley G. J., Li Q., White T. M., Blain D. An inventory-based analysis of Canada's managed forest carbon dynamics, 1990 to 2008 // *Global Change Biol.* 2011. V. 17. Iss. 6. P. 2227–2244.

## CARBON BALANCE OF FOREST ECOSYSTEMS OF THE VOLGA RIVER BASIN DUE TO GLOBAL WARMING: FORECAST LANDSCAPE-ECOLOGICAL MODELING

**E. G. Kolomyts**

*Institute of Ecology of the Volga River Basin, Russian Academy of Sciences  
Komzin str., 10, Togliatty, Samara Oblast, 445003 Russian Federation*

---

E-mail: egk2000@mail.ru

On the example of the Volga basin, based on the materials of large-scale landscape surveys, predictive empirical-statistical modeling of the carbon balance of boreal and nemoral forest biomes was carried out. One of the types of predictive ecological models is presented – within the framework of experimental landscape ecology. Methods for calculating and mapping the volumes of absorption/emission of greenhouse gases by forests under predicted climate changes are discussed. Based on global climate models, predictive estimates of the components of the carbon balance of forest ecosystems as integral formations and their influence on the carbon exchange of the earth's surface with the atmosphere are given. For two climatic forecast scenarios: moderate and extreme, quantitative indicators of adsorption and emission of CO<sub>2</sub> in various local and zonal-regional conditions of the East European subcontinent are given. It has been established that boreal forest ecosystems predominantly carry out cumulative regulation of the carbon cycle, which mitigates warming, while nemoral forests regulate emission regulation. The general softening effect of the forest cover of the Volga basin on climatic changes with the strengthening of the hydrothermal signal was revealed. It is shown that the process of thermal arid transformation of forest ecosystems leads to a general decrease in carbon accumulation in most groups of forest formations. The maps of the carbon content and the projected carbon balance of the main forest formations of the Volga basin for the moderate scenario of global warming allowed by the Paris Agreement on Climate Change (2015) are presented.

**Keywords:** *forests, regulation of carbon cycle, climate change, predictive empirical-statistical models.*

**How to cite:** *Kolomyts E. G. Carbon balance of forest ecosystems of the Volga river basin due to global warming: forecast landscape-ecological modeling // Sibirskij Lesnoj Zhurnal (Sib. J. For. Sci.). 2021. N. 3. P. 56–75 (in Russian with English abstract and references).*