



Оценка роли лесов Волжского бассейна в регуляции углеродного цикла при глобальных изменениях климата (эмпирико-имитационный прогнозный анализ)

Эрланд Георгиевич КОЛОМЫЦ
доктор географических наук, ведущий научный сотрудник
egk2000@mail.ru
Пушкинский научный центр РАН, Институт фундаментальных проблем биологии, Пушкино,
Россия

Аннотация. На примере Волжского бассейна проведен прогнозный анализ удельных и суммарных углеродных балансов лесных формаций по модели E GISS – умеренного варианта глобального потепления, отвечающего целям Парижского (2015 г.) Соглашения по изменению климата. Прогноз базируется на эмпирически установленных ландшафтно-экологических связях, которые рассматриваются в качестве механизмов метаболических реакций лесных экосистем на определенные климатические тренды. В этом состоит новизна разработанной автором прогностической эмпирико-имитационной концепции регионального и локального геоэкологического мониторинга. Ординационный анализ ландшафтных связей направлен на выявление переходов лесных сообществ в критические состояния по основным дискретным параметрам биологического круговорота. Центральное звено мониторинга – ландшафтно-экологический прогноз – имеет экспериментальный характер. Он представлен как система операций с экологическими нишами изучаемых объектов. В расчетных моделях ход прогнозируемых процессов воспроизводится с помощью их эмпирической имитации пространственно распределенными параметрами базовых экологических ниш. Описание будущих состояний биогеоценотических систем ведется по их современной пространственной организации в соответствии с фундаментальными свойствами эргодичности природной среды. Дана количественная оценка экологических ресурсов лесного покрова как его способности смягчать климатические колебания с помощью механизмов регуляции углеродного цикла. Изложены методы расчетов и картографирования объемов поглощения / эмиссии лесами парниковых газов при потеплении и похолодании. Приведены количественные показатели стока и эмиссии CO₂ в различных зонально-региональных условиях Восточно-Европейского субконтинента. Прогнозируется, что замещение коренных лесов производными может привести к двух-, трехкратному сокращению их абсорбционного потенциала. Таковой была вызванная человеком общая потеря экологических ресурсов лесного покрова Волжского бассейна со времен начала здесь интенсивного земле- и лесопользования.

Ключевые слова: лесные формации, углеродный баланс лесов при изменении климата, экологические ресурсы регуляции углеродного цикла, прогнозные ландшафтно-экологические модели

Для цитирования: Коломыц Э.Г. Оценка роли лесов Волжского бассейна в регуляции углеродного цикла при глобальных изменениях климата (Эмпирико-имитационный прогнозный анализ) // Тихоокеанская география. 2026. № 1. С. 38–54. https://doi.org/10.35735/26870509_2026_25_3.

Assessment of the role of forests of the Volga basin in the regulation of the carbon cycle under global climate change (empirical-simulation forecast analysis)

Erland G. KOLOMYTS

Doctor of Geographical Sciences, Leading research associate

egk2000@mail.ru

Pushchino Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Basic

Biological Problems, Pushchino, Russia

Annotation. Using the Volga Basin as an example, a predictive analysis of the specific and total carbon balances of forest formations was conducted using the E-GISS model as a moderate global warming scenario consistent with the goals of the 2015 Paris Agreement on Climate Change. The forecast is based on empirically established landscape-ecological relationships, which are considered as mechanisms of metabolic responses of forest ecosystems to specific climatic trends. This is the novelty of the author's predictive empirical-simulation concept of regional and local geo-ecological monitoring. The ordination analysis of landscape relationships is aimed at identifying the transitions of forest communities to critical states based on the main discrete parameters of the biological cycle. The central element of the monitoring, the landscape-ecological forecast, is experimental in nature. It is presented as a system of operations with the ecological niches of the studied objects. In the computational models, the course of the predicted processes is reproduced using their empirical imitation by spatially distributed parameters of the basic ecological niches. The future states of biogeocoenotic systems are described based on their current spatial organization in accordance with the fundamental properties of environmental ergodicity. A quantitative assessment of the ecological resources of forest cover is provided, as is its ability to mitigate climate fluctuations through carbon cycle regulation mechanisms. Methods for calculating and mapping the volumes of greenhouse gas absorption/emission by forests during warming and cooling are presented. Quantitative indicators of CO₂ runoff and emission are presented under various zonal and regional conditions of the Eastern European subcontinent. It is predicted that the replacement of primary forests with derivatives may lead to a two- to three-fold reduction in their adsorption potential. This has been the overall human-induced loss of ecological resources of the Volga Basin forest cover since the onset of intensive land and forest management.

Keywords: forest formations, carbon balance of forests under climate change, ecological resources for carbon cycle regulation, predictive landscape-ecological models

For citation: Kolomyts E.G. Assessment of the role of forests of the Volga basin in the regulation of the carbon cycle under global climate change (empirical-simulation forecast analysis). *Pacific Geography*. 2026;(1):38-54. (In Russ.). https://doi.org/10.35735/26870509_2026_25_3.

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 в зарубежной литературе [1–6]. Основное внимание уделяется разработке методики определения углеродных пулов в различных компонентах фитобиоты и в почве, а также созданию базы данных по современному содержанию углерода в лесных, болотных и других экосистемах. Например, в работе [7] описана методика составления с помощью спутниковых и наземных данных гибридной геоботанической карты для России, которая включает в себя как классы на-

земного 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 [8]. Удалось также построить прогноз глобального содержания углерода в океане, атмосфере и растительности до 2100 г., оценить рост содержания CO₂ в атмосфере и его влияние на температуру воздуха [9].

В оценках запасов и баланса углерода как в региональном, так и в глобальном масштабе наиболее эффективным признан разработанный в ИААА (International Institute for Applied Systems Analysis) ландшафтно-экологический подход LEA (landscape-ecological approach), объединяющий внушительную информацию о растительности, почвах и гидрологии в ГИС [10].

Глобальные прогнозные оценки роли лесного покрова в регуляции парникового эффекта атмосферы представлены в мелкомасштабных сценариях углеродного бюджета циркумполярных бореальных лесов Евразии и Северной Америки на основе корреляционных связей их биомов с ареалами температуры и осадков [5, 11, 12]. Ожидаемые воздействия изменений климата на леса России и механизмы адаптации лесов рассматриваются для использования последних в качестве средств смягчения климатических сигналов. Это входит в развиваемую в работе [13] концепцию перехода к устойчивому управлению лесами России.

Поведение региональных и локальных лесных образований в условиях меняющегося климата остается гораздо менее изученным, что затрудняет прогнозы биотической регуляции химического состава атмосферы и соответствующей роли лесов в смягчении предстоящего и уже начавшегося глобального потепления. Какие-либо устоявшиеся методические разработки в данной области до сих пор отсутствуют.

Состояние проблемы

В Парижском (2015 г.) Соглашении по Рамочной конвенции ООН об изменении климата указано, что к числу регулирующих мер по снижению углекислого газа в атмосфере, начиная с 2020 г., относится осуществление действий по предотвращению изменений климата с использованием абсорбции CO₂ экосистемами [14]. Во избежание глобальной экологической катастрофы рекомендуется принимать меры, чтобы потепление к 2050 г. не превысило 1.5–2.0 °С. Одной из этих мер является «достижение баланса между возникающими в результате деятельности человека парниковыми газами и их поглощением морями и лесами» (Ст. 4 Парижского Соглашения).

Первичные (коренные или девственные) леса Земли сохранились на площади около 13.5 млн км², что составляет 40 % территории суши. При этом почти половину из них представляют бореальные леса, которые обеспечивают свыше 90 % стока углерода всех мировых бореальных лесов [12]. Среди бореальных лесов более 51 % приходится на девственные леса России. В биоклиматической интерпретации это климаксные и близкие к ним квазиклимаксные лесные сообщества (хвойные, смешанные и широколиственные), знаменующие собой заключительный этап эндоэкогенетических (восстановительных) сукцессий [15], состоящих из серии производных (вторичных) мелколиственных формаций – главным образом березняков и осинников.

Финальный сукцессионный этап приводит структуру и функционирование лесного сообщества в соответствие с данными зонально-региональными климатическими условиями, в результате чего стабилизируется его биомасса и восстанавливается замкнутость биологического круговорота. Тем самым обеспечивается наиболее высокая эффективность работы почвенно-биотических механизмов стабилизации и регулирования окружающей среды. Эту эффективность можно трактовать как определенный *экологический ресурс* лесного сообщества [15], «... обеспечивающий оптимальные условия для существования

человека и всего живого» [16, с. 10]. Следовательно, *коренные климаксные и близкие к ним лесные образования, в отличие от образований производных, должны обладать максимальным экологическим ресурсом*. Задача поддерживать способность лесов выполнять функции по смягчению изменений климата с помощью механизмов биотической регуляции углеродного цикла входит в стратегию устойчивого управления лесами [12].

В данной статье рассматриваются экологические ресурсы двух условных типов леса – восстановленных коренных и реальных (коренных + производных). Прогнозные климатические сценарии взяты по модели E GISS [17, 18] из семейства моделей общей циркуляции атмосферы AOGCMs. Эта модель дает пределы климатических изменений, соответствующие целям Парижского Соглашения. В бореальном поясе Волжского бассейна к 2050 г. ожидается понижение средней июльской температуры на $-0.5 \div 1.9^\circ$, с ростом коэффициента атмосферного увлажнения Высоцкого-Иванова ($K_{увл}^*$) с 1.15–1.52 до 1.27–1.79 (гумидизация), а к 2150 г. – ее повышение на $0.5 \div 0.7^\circ$ при уменьшении $K_{увл}$ до 1.36–1.00 (аридизация). Оба прогнозных срока рассматривались безотносительно к их временной привязке, т.е. они использованы как модели для ответа на вопрос, «что будет, если ...». Сама же прогнозно-климатическая модель используется в качестве иллюстрации.

Цель и задачи исследования

В основе известной концепции биотической регуляции углеродного цикла и определяющих ее природных процессов [19–21] лежат идеи о *биогеоценозах как элементарных единицах биологического круговорота* [22], *играющих ключевую роль в газообмене земной поверхностью с атмосферой на основе принципа Ле Шателье*. Следовательно, механизмы этой регуляции познаются наиболее глубоко на топологическом уровне природно-территориальной организации, что и послужило целью настоящего исследования. Основная задача состояла в проведении эмпирико-имитационного прогнозного эксперимента по решению данной проблемы методами ландшафтной экологии, которые ранее освещены в работе [23]. Волжский бассейн послужил достаточно репрезентативным объектом для проведения эксперимента.

Излагаемый в статье локальный (и региональный) прогноз влияния лесов на содержание парниковых газов в атмосфере при глобальных изменениях климата основан на построении *дискретных эмпирико-статистических моделей* их структуры и функционирования [13]. При реализации данных моделей реализован *метод эмпирической имитации* прогнозируемых геоэкологических ситуаций. В нем материалы натуральных исследований используются не в качестве проверки тех или иных расчетных данных, а как фактологическая база самого моделирования. Возможности широко применять в прогножном анализе данные полевых ландшафтных исследований, а также различные картографические материалы позволяют получать результаты с высокой степенью пространственного разрешения и эмпирически обоснованно выходить на достаточно широкие географические обобщения.

Исходные материалы

Объектами анализа послужили лесные биогеоценозы 8 экспериментальных полигонов основного водосбора Волжского бассейна (рис. 1), на которых в течение 1987–1998 гг. были проведены крупномасштабные ландшафтные съемки по специально разработанной методике [23]. Это было время окончания базового периода 1880–1985 гг., после которого, как известно [24], началось современное глобальное потепление. Полигоны охватывают основной зональный спектр растительного покрова Верхнего и Среднего Поволжья – от южной тайги до южной лесостепи. Каждый полигон на основе 42–53 проб-

ных площадей характеризовал *локальные пространственно сопряженные ансамбли (катенарные системы) лесных сообществ* в соответствующем экорегионе. Материалы ландшафтных съемок на полигонах относятся к локальному (топологическому) уровню организации лесных экосистем.

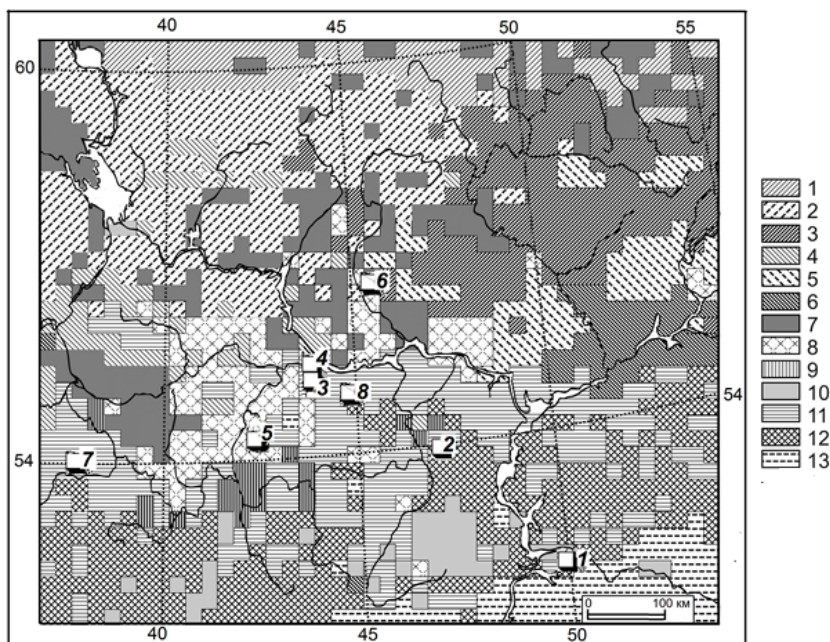


Рис. 1. Расположение экспериментальных полигонов на территории основного водосбора Волжского бассейна, представленного растровой базовой картой зонально-провинциальных групп коренных растительных формаций (современных + восстановленных). Карта разработана и составлена автором при участии Л.С. Шарой.

Номера экспериментальных полигонов: 1 – Жигули; 2 – Присурье; 3 – Зеленый Город; 4 – Щелоковский Хутор; 5 – Выкса; 6 – Керженец; 7 – Приокско-Террасный резерват; 8 – Кудья. 1–13 – группы коренных растительных формаций (см. в табл. 1)

Fig. 1. Location of experimental sites within the main Volga basin watershed, represented by a raster base map of zonal-provincial groups of native plant formations (modern + restored). The map was compiled by the author with the participation of L.S. Shara. Experimental site numbers: 1 – Zhiguli; 2 – Prisurye; 3 – Zeleny Gorod; 4 – Shchelokovsky Khutor; 5 – Vyksa; 6 – Kerzhenets; 7 – Prioksko-Terrasny Reserve; 8 – Kudma. 1–13 – groups of native plant formations (see Table 1)

Данные базовых запасов углерода взяты с подробных карт масштаба 1 : 2 000 000 – 1 : 2 5 000 000 [25, 26] и разнесены по 52 группам растительных формаций. Данные карты создавались в тот же период времени, когда нами проводились ландшафтные съемки (1987–1996 гг.). Эти геоботанические материалы не потеряли своей актуальности до настоящего времени. Установлено [27], что за период 1968–2008 гг. в Европейской части России площади земель, покрытых и не покрытых лесом, изменились на 6–8 % , что едва превышает точность самого геоботанического картографирования. Несущественные изменения произошли и в породной структуре лесов. Доля хвойных пород в составе покрытых лесом земель снизилась на 4 %, а доля мягколиственных пород увеличилась на 5 %. По спутниковым данным 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 % [28].

Новейшая мелкомасштабная карта лесного покрова России, полученная методами дистанционного зондирования лесов из космоса [27, 28], оказалась нерепрезентативной.

Классификационная схема коренных растительных формаций основного водосбора Волжского бассейна и его окружения

Table 1. Classification scheme of native plant formations of the main Volga River catchment and its surroundings

Фитоценологические единицы, по (Грибова и др., 1980)			Группы растительных формаций	
Зональные типы и классы	Региональные варианты	Подзональные подтипы	Краткая характеристика	Номер и символ
Темнохвойные и широколиственно-темнохвойные леса (производные осиново-березовые)	Восточно-европейские (верхневолжские)	Среднетаежные	Еловые кустарничково-зеленомошные	1
		Южнотаежные	Еловые кустарничково-травяные	2
		Подтаежные	Широколиственно-еловые сложные неморальнотравяные	3
	Камско-печерско-западно-уральские	Средне- и южнотаежные	Пихтово-еловые и елово-пихтовые травяно-кустарничковые зеленомошные и травяные	4
		Подтаежные	Пихтово-еловые сложные неморальнотравяные	5
			Широколиственно-пихтово-еловые неморальнотравяные	6
Сосновые и широколиственно-сосновые леса (производные осиново-березовые)	Восточно-европейские (верхневолжские)	Средне- и южнотаежные	Сосновые с елью кустарничково-зеленомошные	7
		Подтаежные	Сосновые (с дубом в подлеске) кустарничково-травяные	8
			Широколиственно-сосновые и сосновые сложные с елью	9
	Лесостепные и степные	Сосновые и широколиственно-сосновые разнотравно-злаковые	10	
Широколиственные леса	Восточно-европейские	Северо-лесостепные	Липово-дубовые и дубовые	11 a
			Липовые с примесью других широколиственных пород	11 б
Типичная и южная лесостепь	Причерноморского типа	Типичные лесостепные	Луговые степи в сочетании с лесами из дуба	12
		Южно-лесостепные	Богаторазнотравно-типчаково-ковыльные степи	13

Выделенные на этой карте категории лесов совершенно не соответствуют принятому в традиционной геоботанике содержательному смыслу понятий «классы растительных формаций» и «типы растительности» [29], на основе которых и построена классификация растительного покрова Волжского бассейна.

Методы анализа

Расчет углеродных балансов лесных экосистем при потеплении и похолодании. Для оценок изменений содержания углерода в различных биотических компонентах был применен известный лесоводственный метод [30], основанный на динамике *экомасс* (живых и мертвых фитомасс, а также гумусной массы) и дающий наиболее эффективные

результаты за большие промежутки времени. При этом реализован известный кибернетический подход, согласно [31], когда сами экомассы для каждого прогнозируемого срока рассматривались как определенные функциональные характеристики на «выходе» системы, без детального анализа метаболических процессов «черного ящика». Изменение массы потока углерода в системе почва–растение–атмосфера $\Delta C(Fa)$ рассчитывалось как

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

Здесь представлены углеродные пулы следующих экомасс: BS – живой скелетной древесно-кустарниковой; BV – общей зеленой массы всех растительных ярусов; BR – общей массы корней; WD – мертвой древесно-кустарниковой фитомассы (дебриса); ML – массы лесной подстилки (опад+отпад+мор); HU – массы лабильного гумуса.

Рассчитываемые по данному уравнению значения параметра $\Delta C(Fa)$ характеризуют *динамический* (так будем его называть) *углеродный баланс лесных экосистем*, обусловленный *изменениями баланса депозита и эмиссии углерода* в почвенно-растительном покрове под воздействием устойчивой смены климатических условий. Это, так сказать, баланс балансов – как соотношение прогнозных балансов и баланса конца базового периода.

Алгоритмы расчетов изложены в работе [19]. Каждый член правой части представленного уравнения может иметь как положительные, так и отрицательные значения. При положительных величинах первые три слагаемых дают прибавку эмиссии CO_2 из почвенно-растительного покрова в атмосферу, а вторые – убыль этого потока. В данном случае пулы мортмассы выступают в качестве дополнительного источника углерода, а живая фитомасса играет роль его стока (депонирования). При отрицательных же значениях указанных параметров картина обратная. В итоге складывается *общий баланс изменений углеродного обмена между биогеоценозами и атмосферой* [$\pm \Delta C(Fa)$], который показывает, поглощает ли данная группа лесных биогеоценозов *дополнительное количество 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 на выполнение принципа Ле Шателье [15] по стабилизации или даже ослаблению первичного сигнала, а во втором – связь положительная, которая ведет к усилению парникового эффекта атмосферы, а следовательно и самого потепления.

При похолодании те же слагаемые углеродного баланса играют прямо противоположную роль, если оценивать их вклад в ослабление этого похолодания. При отрицательных значениях суммы [$\Delta C(BS) + \Delta C(BV) + \Delta C(BR)$] и положительных [$\Delta C(ML) + \Delta C(WD) + \Delta C(HU)$] можно говорить о позитивной биотической регуляции холодного климатического сигнала, направленной на его ослабление. В противном случае эта регуляция окажется негативной, т.е. усиливающей похолодание.

Функциональная ординация лесных биогеоценозов. Расчеты прогнозируемых значений живых и мертвых фитомасс для различных сценариев изменений климата проводились по результатам их гидротермической ординации в различных зонально-региональных и локальных условиях. Функциональная ординация проведена по температуре почвы на глубине 50 см и запасам летней продуктивной влаги в слое почвы 0–50 см. С этими параметрами метаболические характеристики лесных сообществ обнаруживают наиболее тесные связи. Как показывают полученные уравнения, корреляции не всегда достаточно высоки, хотя и вполне значимы (табл. 2). При описании сложных многокомпонентных биологических систем значения коэффициентов корреляции и детерминации не могут быть высокими, так как уравнение регрессии чаще всего описывает связи рассматриваемого объекта с условиями окружающей среды, а биологическая система и ее компоненты существуют по своим внутренним законам [32]. Слабая связь может интерпретироваться как общая тенденция изменения данного метаболического параметра под влиянием геофизического тренда на фоне значительного «шумового» воздействия других факторов регионального и локального порядка.

Таблица 2

Примеры расчетных моделей, описывающих изменения параметров малого биологического круговорота в биогеоценозах экорегионов Среднего и Верхнего Поволжья под влиянием трендов температуры и влагосодержания почвы в вегетационный период

Table 2. Examples of computational models describing changes in the parameters of minor biological turnover in biogeocenoses of the Middle and Upper Volga ecoregions under the influence of temperature and soil moisture content trends during the growing season

Вид модели (расчетная формула) *	Экспериментальные полигоны (см. рис. 1)	Параметры (см. в тексте)	Коэффициенты			Статистические характеристики**		
			b_0	b_1	b_2	R	P	S_y
$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$	6. Присурье	<i>BV</i>	21.93	-0.7415	-0.7135	0.664	0	3.09
		<i>HU</i>	5.99	0	55.75	0.696	0	20.29
	3. Зеленый Город	<i>BR</i>	8.712	5.838	-0.0678	0.582	$0.1 \cdot 10^{-3}$	17.92
		<i>HU</i>	16.34	-0.2402	0.07426	0.713	0	
	4. Щелоковский Хутор	<i>ML</i>	27.18	-2.333	0.04896	0.717	0	6.51
$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2^2$	1. Жигули	<i>WD</i>	642.1	-114.7	5.142	0.936	0	2.21
		<i>HU</i>	88.54	-0.3988	0.00519	0.781	0	42.0
$y = \exp(b_0 + b_1/x_1)$	6. Керженец	<i>WD</i>	22.85	-0.2588	0.00149	0.72	0	12.78
		<i>HU</i>	8.84	0.0091	0.0006	0.851	0	8.03
	7. Приокско-Террасный резерват	<i>BS</i>	244.6	0.3956	-0.00312	0.557	$0.7 \cdot 10^{-3}$	71.4
		<i>HU</i>	25.31	0.0159	0.00042	0.577	$0.4 \cdot 10^{-3}$	16.32
	8. Кудьма	<i>ML</i>	0.0845	35.08	–	0.506	0	16.0
<i>WD</i>		-4.389	64.63		0.642	0	7.0	
5. Выкса	<i>ML</i>	0.3274	46.81	–	0.798	0	0.34	

* x_1 – температура почвы на глубине 50 см (t_{50}); x_2 – запасы продуктивной влаги в слое почвы 0–50 см ($W-50$); x_3 – средневзвешенный (по массе древесины различных пород) возраст леса.

** R – коэффициент корреляции; P – уровень значимости (критерий Пирсона); S_y – стандартное отклонение. Полу жирным шрифтом выделены коэффициенты при значимых аргументах в уравнениях множественной регрессии.

Для перехода с локального уровня на региональный, с получением углеродных балансов растительных формаций, использован предложенный нами метод *индукционно-иерархической экстраполяции*, основанный на явлении полизональности локальных гео(эко-) систем как форме их реакции на глобальные изменения климата [18]. В результате были получены осредненные парциальные и суммарные значения базового содержания углерода в коренных и производных лесных формациях Средней полосы Европейской России, в том числе в лесо-болотных комплексах, а также в лесных угодьях.

В процессе обобщения по каждой лесной формации, с одной стороны, интегрировались локальные геоморфологические и гидро-термоэдафические условия ее формирования, а с другой – осреднялись возрастные показатели лесообразующих 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 прогнозируемого углеродного баланса. Таким образом, каждая лесная формация описывалась *осредненными зонально-региональными ресурсами регуляции углеродного цикла*. Эти ресурсы складываются из топологического разнообразия абиотической среды и уровней функционирования биогеоценозов, входящих в данную формацию.

Результаты и обсуждение

Базовые запасы углерода в растительных формациях. По удельным базовым запасам углерода (рис. 2) доминируют средне- и южнотаежные, пихтово-еловые и ело-

во-пихтовые травяно-кустарничковые, зеленомошные и травяные леса бассейна Ветлуги и ветлужско-камского междуречья (от 186 до 204 т/га). Эти леса обладают наиболее высоким фотосинтетическим потенциалом. Они характеризовались нами из материалов экспериментальных полигонов по соответствующим биогеоценозам с наиболее развитой возрастной фитоценотической структурой. К ним приближаются леса липово-дубовые и дубовые, а также липовые с примесью других широколиственных пород Окско-Волжского Возвышенного Правобережья, с суммарными запасами углерода 178–186 т/га. Это говорит о том, что топоаналогия этих лесных формаций находилась в субклимаксном состоянии. В лежащих южнее лесостепных и степных широколиственно-сосновых и сосновых разнотравно-злаковых лесах в верховьях Оки, Цны и Суры и далее в Высоком Заволжье базовые углеродные резервы также достаточно высоки (до 180–186 т/га).

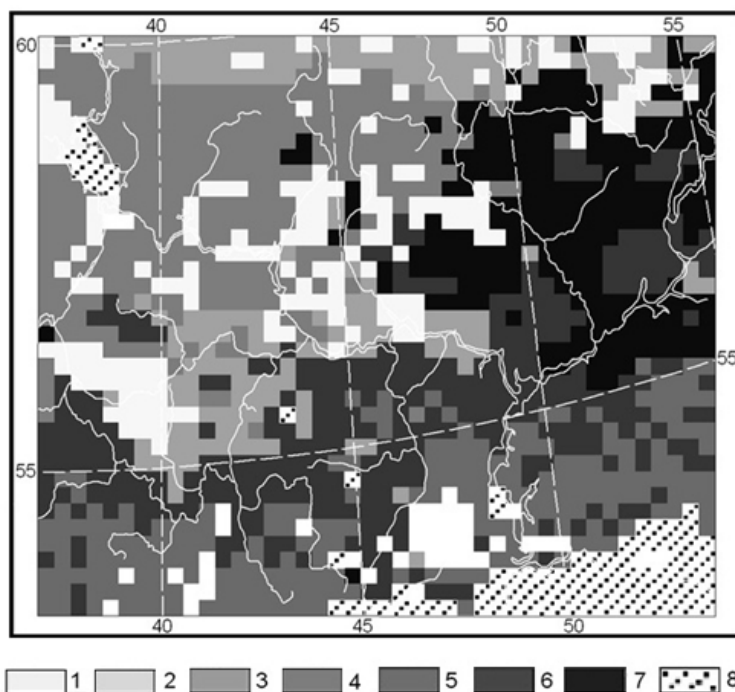


Рис. 2. Распределение удельных базовых запасов углерода в восстановленных коренных лесных формациях основного водосбора Волжского бассейна (см. рис. 1). Растровая карта рассчитана и составлена Л.С. Шарой.

Базовые запасы углерода (т/га): 1 – 145–150; 2 – 151–160; 3 – 161–177; 4 – 178–180; 5 – 181–185; 6 – 186–188; 7 – 189–204; 8 – нет данных (озера, водохранилища и территории с отсутствием лесов)

Fig. 2. Distribution of specific baseline carbon stocks in restored primary forest formations of the main watershed of the Volga Basin (see Figure 1). The raster map was calculated and compiled by L.S. Shara. Baseline carbon stocks (t/ha): 1 – 14–150; 2 – 151–160; 3 – 161–177; 4 – 178–180; 5 – 181–185; 6 – 186–188; 7 – 189–204; 8 – no data (lakes, reservoirs, and forest-free areas)

Гораздо меньшие суммарные запасы углерода (≤ 150 –175 т/га) свойственны восточноевропейским средне- и южнотаежным кустарничково-зеленомошным ельникам, а также подтаежным неморальнотравяным широколиственно-еловым лесам в обширной полосе Низменного Заволжья. Здесь прообразами коренных формаций служили относительно молодые биогеоценозы, находящиеся на средних и даже ранних сукцессионных стадиях.

Общая картина регуляции углеродного цикла. Рассмотрим прогнозные оценки абсорбционной способности современного лесного покрова Волжского бассейна при климатических сценариях, соответствующих положениям Парижского Соглашения (см. выше). Согласно прогнозно-климатической модели E GISS, при потеплении удельный углеродный баланс групп лесных формаций (ГЛФ) 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 % базового содержания углерода в лесных экосистемах (рис. 3). При холодно-гумидном климатическом тренде (прогноз на 2050 г.) лесные массивы в подавляющем большинстве будут увеличивать свою продуктивность и соответственно – суммарные запасы углерода, что и приведет к дополнительному массовому стоку углерода из атмосферы (от 12.0–17.0 до 31.0–34.0 т/га) и соответственно к усилению похолодания (рис. 4). Наибольший вклад в этот процесс внесут широколиственные леса по всей лесостепной зоне, а также кустарничково-травяные и сфагновые подтаежные сосняки и в меньшей степени заболоченные леса.

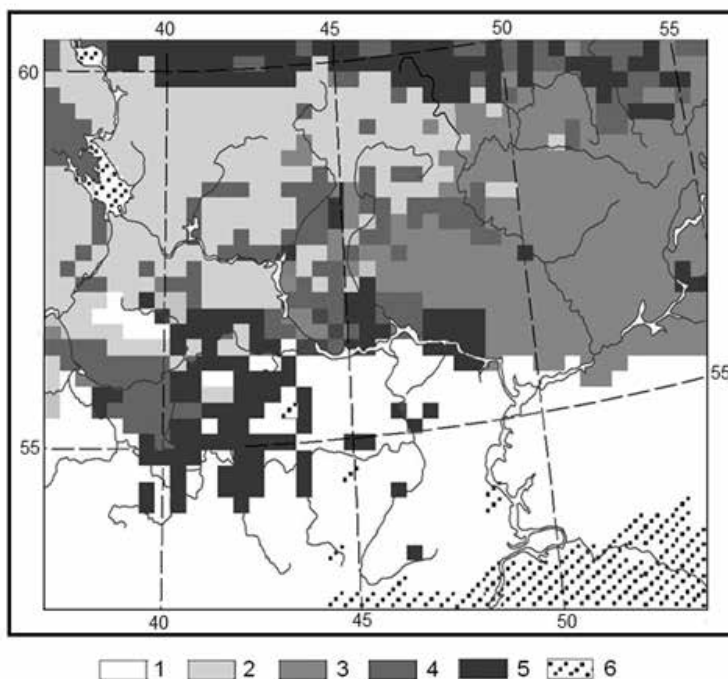


Рис. 3. Распределение удельного баланса углерода в восстановленных коренных лесных формациях Волжского бассейна для сценариев регионального потепления по модели E GISS на 2200 г. Растровые карты рассчитаны и составлены Л.С. Шарой. Баланс углерода (т/га): 1 – $(-15.0) \div (-7.5)$; 2 – $(-7.4) \div 0$; 3 – $0.1 \div 15.0$; 4 – $15.1 \div 25.0$; 5 – $25.1 \div 43.0$; 6 – озера, водохранилища и территории с отсутствием лесов

Fig. 3. Distribution of the specific carbon balance in restored primary forest formations of the Volga Basin for regional warming scenarios according to the E GISS model for 2200. Raster maps calculated and compiled by L.S. Shara. Carbon balance (t/ha): 1 – $(-15.0) \div (-7.5)$; 2 – $(-7.4) \div 0$; 3 – $0.1 \div 15.0$; 4 – $15.1 \div 25.0$; 5 – $25.1 \div 43.0$; 6 – lakes, reservoirs, and forest-free areas

Термоаридный тренд (на 2200 г.) также вызовет преобладающее увеличение продуктивности лесов и сток углерода в них (до 35.0–43 т/га, т.е. более чем на 20–25 % его базовых запасов). Последнее будет препятствовать повышению температуры и, таким образом, окажет позитивное воздействие на биотическую регуляцию углеродного цикла. Этот процесс особенно широко распространится среди южнотаежных и подтаежных сосновых и хвойно-лиственных формаций. В типичной же и южной лесостепи термоаридный кли-

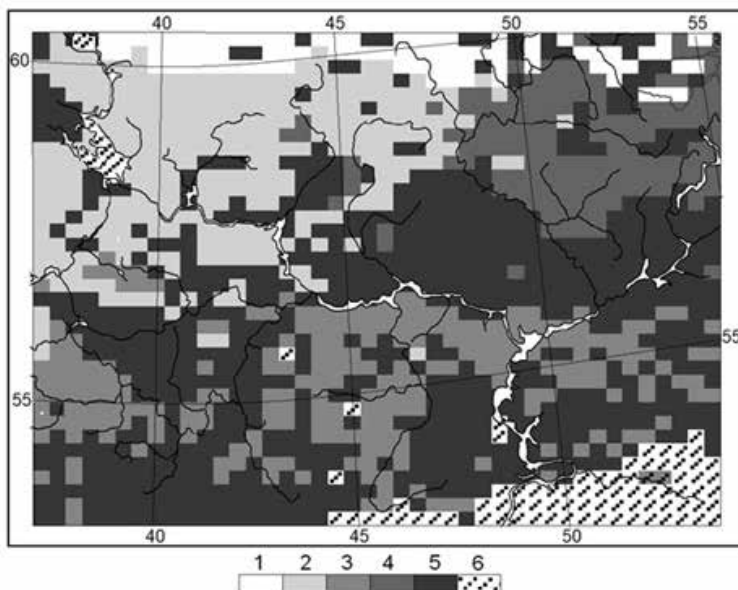


Рис. 4. Распределение удельного баланса углерода в восстановленных коренных лесных формациях Волжского бассейна для сценариев регионального похолодания по модели E GISS на 2050 г. Растровые карты рассчитаны и составлены Л.С. Шарой.

Баланс углерода (т/га): 1 – $(-17.0) \div (-10.0)$; 2 – $(-9.9) \div 0$; 3 – $0.1 \div 4.0$; 4 – $4.1 \div 10.0$; 5 – $10.1 \div 19.0$; 6 – озера, водохранилища и участки без лесной растительности

Fig. 4. Distribution of the specific carbon balance in restored primary forest formations of the Volga Basin for regional cooling scenarios according to the E GISS model for 2050. Raster maps were calculated and compiled by L.S. Shara. Carbon balance (t/ha): 1 – $(-17.0) \div (-10.0)$; 2 – $(-9.9) \div 0$; 3 – $0.1 \div 4.0$; 4 – $4.1 \div 10.0$; 5 – $10.1 \div 19.0$; 6 – lakes, reservoirs, and areas without forest vegetation

матический сигнал вызовет, наоборот, снижение продуктивности широколиственных и сосново-мелколиственных лесов (чаще всего островных и байрачных) и соответственно даст дополнительную эмиссию CO_2 в атмосферу (от 5–15 до 30 т/га и более, что составит от 3–5 до 35–30 % базовых запасов углерода).

Таким образом, регуляция углеродного цикла со стороны бореальных и неморальных лесов Русской равнины должна быть достаточно пестрой как по знаку, так и по абсолютной величине. Эта пестрота между ГЛФ будет проявляться 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. Так, сосновые средне- и южнотаежные 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. Незначительной будет негативная регуляция углеродного цикла и со стороны наиболее распространенных (занимающих более 30 % площади региона) темнохвойных южнотаежных и смешанных лесов – по причине низких отрицательных значений $\Delta C(Fa)$. И наоборот, менее распространенные широколиственно-сосновые подтаежные леса станут объектами наиболее мощного стока CO_2 при термоаридном климатическом тренде, что и предопределил их доминирующую позитивную роль в региональной биотической регуляции углеродного цикла. Восточноевропейские же широколиственные леса проявят незначительную отрицательную регуляцию. В то же время они, несмотря на их малые площади, смогут вызвать наибольшее усиление холодно-гумидного тренда благодаря значительному росту продуктивности и соответствующего стока углерода.











Экологические ресурсы восстановленных коренных лесов. Обратимся к гипотетической (виртуальной) карте зонально-провинциальных групп коренных лесных формаций (см. рис. 1, табл. 1). Карта создана на основе геоботанической карты [26]. На ней современные ареалы коренных лесов объединены с площадями находящихся на их месте вторичных формаций, а также сельскохозяйственных земель. Карта демонстрирует исходное размещение классов и групп коренных лесных формаций в доиндустриальный период отсутствия интенсивного земле- и лесопользования в регионе. Она отображает его *зонально-провинциальную фитоклиматическую структуру*. Базовое удельное и суммарное содержание углерода и соответствующие углеродные балансы этих гипотетических лесов в меняющемся климате представлены в табл. 3 и 4. По существу *таблицы раскрывают регуляцию углеродного цикла зонально-региональной биоклиматической системы Волжского бассейна* для двух мягко выраженных (по модели E GISS) сценариев прогнозируемых изменений климата – похолодания и потепления.

В целом коренные бореальные и суббореальные леса бассейна оказывают два взаимно противоположных воздействия на углеродный обмен земной поверхности с атмосферой: 1) сравнительно слабое негативное – при холодно-гумидном тренде (дополнительный

Таблица 3

Удельные углеродные балансы восстановленных коренных (А) и реальных (Б, коренных + производных) лесных формаций Волжского бассейна на прогнозные сроки 2050 г. (похолодание) и 2150 г. (потепление), согласно модели E GISS

Table 3. Specific carbon balances of restored native (A) and real (B, native + derivative) forest formations of the Volga River basin for the forecast periods of 2050 (cooling) and 2150 (warming), according to the E GISS model

Группы формаций (см. табл. 1)	Удельное базовое содержание углерода, т/га		Удельный углеродный баланс, т/га			
	А	Б	2050 г.		2150 г.	
			А	Б	А	Б
1 	110.74	80.33	-16.06 [+]	-11.64 [+]	+42.45 [+]	+30.78 [+]
2 	184.05	133.50	-9.93 [+]	-1.94 [+]	-4.14 [-]	-6.48 [-]
3 	203.80	233.58	+3.91 [-]	+0.68 [-]	+14.82 [+]	+16.45 [+]
4 	175.24	156.25	-9.45 [+]	-2.27 [+]	-3.94 [-]	-7.58 [-]
5, 6 	189.55	169.27	+3.64 [-]	+0.49 [-]	+13.78 [+]	+11.92 [+]
7 	154.50	179.87	+12.47 [-]	+10.89 [-]	+21.14 [+]	+10.21 [+]
8, 9 	174.46	180.26	+18.57 [-]	+8.94 [-]	+27.33 [+]	+16.39 [+]
11 	205.40	182.65	+1.37 [-]	+5.83 [-]	-7.76 [-]	-5.82 [-]
10, 12 	178.81	167.44	+14.96 [-]	+13.50 [-]	-14.46 [-]	-12.73 [-]
13 	15.12		+14.96 [-]		-14.46 [-]	
Заболоченные леса	140.71		+16.84 [-]		+14.27 [+]	
Лесные болота	137.56		+10.39 [-]		+28.12 [+]	
Неморальные поймы	158.65		+0.15 [-]		+7,91 [+]	
Среднее	156.040	148.87	+4.76 [-]	5.14 [-]	+9.62 [+]	+6.85 [+]

Примечание. Лесопокрытая площадь для групп формаций 10 и 12 принята равной 26 %, а для 13-й группы формаций – 11 %. Знаком [+] отмечена позитивная регуляция углеродного цикла при данном климатическом тренде, а знаком [-] – регуляция негативная.

Таблица 4. Суммарные углеродные балансы восстановленных коренных (А) и реальных (Б, коренных + производных) лесных формаций Волжского бассейна на прогнозные сроки 2050 г. (похолодание) и 2020 г. (потепление), согласно модели E GISS

Table 4. Total carbon balances of restored native (A) and real (B, native + derivative) forest formations of the Volga River basin for the forecast periods of 2050 (cooling) and 2020 (warming), according to the E GISS model

Группы формаций (см. табл. 1)	Выборочная площадь, км ²	Суммарный углеродный баланс, млн т			
		2050 г.		2020 г.	
		А	Б	А	Б
1	19580	-31.880	-23.110	+63.280	+47.870
2	55603	-55.214	-10.787	-23.196	-36.031
3	10301	+4.028	+0.700	+15.266	+16.945
4	6700	-43.470	-10.442	-18.124	-34.868
5, 6	3030	+1.103	+0.185	+4.175	+3.612
7	48506	+60.487	+53.823	+102.542	+49.525
8, 9	35413	+65.752	+31.559	+96.784	+58.042
11	14295	+1.958	+8.334	-11.093	-8.320
10, 12	39344	+58.859	+53.114	-56.891	-50.085
13	936	+1.400		+2.353	
Заболоченные леса	5026	+14.270		+8.464	
Лесные болота	2062	+2.124		+5.798	
Неморальные поймы	14915	+0.223		+11.798	
Сумма	255 981	+73.865	+114.619	+198.958	+70.905

депозит CO₂ и соответствующее усиление похолодания); 2) гораздо более мощное позитивное (см. рис. 3) – при тренде термоаридном. Во втором случае ожидается трехкратно возрастающее значение $\Delta C(Fa)$, которое снижает концентрацию парниковых газов в атмосфере и тем самым ослабляет антропогенное потепление. В первом случае общая абсорбция CO₂ из атмосферы составляет около 1 % суммарного базового содержания углерода в бореальных и суббореальных лесах, а во втором – 3,5 %.

Рассмотрим более подробно экологические ресурсы гипотетического лесного покрова Волжского бассейна (см. табл. 3 и 4, рис. 3) для сценария регионального умеренного потепления. Наиболее мощное сокращение парниковых газов в атмосфере и, следовательно, максимальное ослабление термоаридного тренда ожидается со стороны двух групп коренных лесных формаций – среднетаежных пихто-ельников и средне- и южнотаежных сосняков: в каждой из них суммарный углеродный баланс $[\sum \Delta C(Fa)]$ приближается к +190 млн т. Высоким абсорбционным потенциалом обладают также подтаежные елово- и сосново-широколиственные леса в западном секторе бассейна, где $[\sum \Delta C(Fa)] \approx +140 \div +170$ млн т). В восточном же секторе (камско-печерско-западноуральском) величина суммарного углеродного баланса снижается почти в четыре раза.

Разительным контрастом по отношению к упомянутым лесным формациям выступают восточноевропейские широколиственные леса, которые становятся дополнительным источником выбросов CO₂ в атмосферу: здесь $[\sum \Delta C(Fa)] > -100$ млн т. В два с лишним раза возрастает отрицательный баланс в маргинальных типично-лесостепных сосновых и ши-

роколиственно-сосновых лесах. Последние, таким образом, оказываются не только наиболее неустойчивыми к глобальному потеплению (см. [18]), но и как фитоценологические системы с положительной обратной связью сами будут способствовать своей деградации, усиливая данный климатический тренд.

Для сценария холодно-гумидного тренда (см. рис. 4) имеют место аналогичные соотношения абсолютных значений $[\sum \Delta C(Fa)]$ между группами коренных лесных формаций, однако знак их углеродного баланса меняется на противоположный: преимущественно положительный углеродный баланс коренных лесов способствует дополнительному похолоданию.

В целом группы коренных лесов Волжского бассейна, при заполнении каждой из них своего зонально-регионального экологического пространства, оказывают положительное регулирующее влияние на углеродный обмен земной поверхности с атмосферой при потеплении и отрицательное влияние – при похолодании, причем в первом случае в три раза более мощное, нежели во втором (см. табл. 3. нижняя строка). Обладая достаточно высокими экологическими ресурсами, коренные бореальные леса Восточно-Европейского субконтинента могут служить эффективным поглотителем парниковых газов из атмосферы, снижая тем самым грядущее глобальное потепление.

Антропогенные изменения экологических ресурсов современного лесного покрова.

Встает немаловажный вопрос: как повлияли произошедшие к настоящему времени антропогенные изменения бореального и суббореального лесного покрова Волжского бассейна на его экологические ресурсы. Каковыми оказались эти изменения по знаку и по величине удельных и суммарных значений углеродного баланса? Для ответа на этот вопрос по каждой из 13 групп лесных формаций Волжского бассейна (см. табл. 1) нами были проведены расчеты базовых и прогнозируемых углеродных параметров как для восстановленных коренных лесов, так и для реального лесного покрова, включающего коренные и производные сообщества (см. табл. 3 и 4). Анализируемая территория находилась в границах 52–60° с. ш. и 36–53° в. д., т.е. она занимала около половины площади, представленной на рис. 3 и 4.

В целом сравнительная картина углеродных балансов сохраняется той же, что была обрисована для гипотетического лесного покрова бассейна. При термоаридном сценарии максимальные удельные экологические ресурсы остаются за средне- и южнотаежными и подтаежными сосняками, а также среднетаежными пихто-ельниками, а минимальные – за северостепными широколиственными лесами. Суммарные ресурсы определяются так же площадями лесных формаций, поэтому общее регулирующее влияние на углеродный цикл, например, мало распространенных камско-западнопредуральских хвойно-широколиственных лесов, а также дубо-липняков северной лесостепи оказывается незначительным. Удельные углеродные балансы по отдельным группам лесных формаций составляют от 1–5 до 11–16 % удельного базового содержания в них углерода. Исключение составляют подтаежные широколиственно-сосновые леса и особенно лесные болота, которые при потеплении поглощают дополнительно до 17 т/га и более 28 т/га углерода соответственно (см. табл. 4.).

Сопоставление удельных и суммарных углеродных балансов по восстановленным коренным лесам и реальному лесному покрову (коренные + производные леса) показывает, что замещение коренных лесов производными приводит к общему и достаточно ощутимому снижению экологических ресурсов лесного покрова Волжского бассейна. Это проявляется в снижении общей положительной регуляции углеродного цикла при потеплении и в повышении его отрицательной регуляции – при похолодании (см. табл. 4, нижняя строка). Особенно негативно сказывается распространение березняков и осинников в средне-южнотаежных и подтаежных сосновых лесах, которые, как уже говорилось, имеют лидирующий вклад в дополнительное поглощение CO_2 (при потеплении более 70 % от общего объема поглощения). Их средние значения $\Delta C(Fa)$ при потеплении сокращаются почти в два раза – с 16.16 до 8.87 т/га. На 27 % уменьшается также экологический ресурс средне-

таежных пихто-ельников, а у южнотаежных восточноевропейских и камско-западнопредуральских темнохвойных лесов отрицательный углеродный баланс увеличивается на 40–50 %. В темнохвойных южнотаежных и подтаежных сообществах, а также в широколиственных и остепненных сосново-широколиственных лесах вторичные мелколиственные формации оказывают гораздо меньшее влияние.

Широкое распространение в лесном поясе Волжского бассейна восстановительных сукцессий, с господством длительно-производных мелколиственных сообществ, снижает для термоаридного прогнозного сценария в 2.8 раза суммарную дополнительную поглотительную способность лесов по сравнению с гипотетически восстановленными коренными лесами. При холодно-гумидном же тренде эта способность, наоборот, увеличивается в два раза. В первом случае происходит резкое ослабление положительной регуляции углеродного цикла, а во втором – несколько меньшее, но также существенное, усиление регуляции отрицательной. В обоих случаях налицо сокращение абсорбционной способности современных лесных формаций, где наряду с коренными сообществами существуют гораздо более длительно распространенные производные образования. Таков, по-видимому, общий результат антропогенного снижения экологических ресурсов лесного покрова Волжского бассейна со времен начала в нем интенсивного земле- и лесопользования.

Заключение

1. По удельным и суммарным углеродным балансам лесных формаций Волжского бассейна дана количественная оценка их экологических ресурсов по смягчению климатических колебаний с помощью механизмов регуляции лесами углеродного цикла. Полученные обобщенные материалы могут быть использованы для количественных оценок влияния бореальных и неморальных лесов Восточной Европы и Предуралья на потоки парниковых газов в системе земная поверхность – атмосфера.

2. Прогнозируется, что при одном и том же климатическом сигнале различные лесные формации будут как поглощать дополнительно парниковые газы (положительный углеродный баланс лесных сообществ), так и выбрасывать их в атмосферу (отрицательный баланс), оказывая соответствующее влияние на общий климатический тренд. В каждом экорегионе выявляются определенные зонально-региональные типы регуляции лесным покровом содержания CO₂ в атмосфере при развитии климатической аридизации либо гумидизации. В соответствии с площадным распределением этих типов оценен общий региональный вклад лесной фитобиоты в смягчение климатических колебаний.

3. Установлены наиболее вероятные значения потерь лесами Волжского бассейна их экологических ресурсов со времен начала здесь интенсивного земле- и лесопользования. Распространение на большей части прежних коренных лесов современных вторичных лесных сообществ (не считая сельхозугодий) должно привести к весьма значительной утрате абсорбционного потенциала всего бореально-неморального лесного покрова. Это проявится в снижении общей положительной биотической регуляции углеродного цикла при потеплении и в повышении его отрицательной регуляции при похолодании. При современных темпах потепления в ближайшие 150–200 лет средние значения положительных углеродных балансов лесов могут сократиться в два–три раза.

Литература

1. Исаев А.С., Коровин Г.Н. Углерод в лесах Северной Евразии // Круговорот углерода на территории России. М.: Мин-во науки и технологий РФ, 1999. С. 63–95.
2. Кондратьев К.Я., Демирчян К.С. Глобальные изменения климата и круговорот углерода // Изв. Русского геогр. об-ва. 2000. Вып. 4. С. 1–20.

3. Швиденко А.З., Нильссон С., Столбовой В.С. и др. Опыт агрегированной оценки основных показателей биопродукционного процесса и углеродного бюджета наземных экосистем России. 2. Нетто-первичная продукция экосистем // *Экология*. 2001. № 2. С. 83–90.
4. Schimel D.S., House J.L., Hibbard K.A. et al. Resent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems // *Nature*. 2001. Vol. 414, N 8. P. 169–178.
5. Gamon J.A., Huemmrich K.E., Peddle D.R., et al. Remote sensing BOREAS: Lessons learned // *Remote Sensing of Environment*. 2004. Vol. 89. P. 139–162.
6. Stinson G., Kurz W.A., Smyth C.E. et al. An inventory-based of Canada's managed forest carbon dynamics, 1900 to 2008 // *Global Change Biology*. 2011. Vol. 17. P. 2227–2244.
7. Schepaschenko D., McCallum I., Shvidenko A., Fritz S., Kraxner F., Obersteiner M.A. New hybrid land cover dataset for Russia: a methodology for integrating statistics, remote sensing and in situ information // *Journal of Land Use Science*. 2011. Vol. 6, N 4. P. 245–259.
8. Щепаченко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф. Запасы органического углерода в почвах России // *Почвоведение*. 2013. № 2. С. 123–132.
9. Quegan S., Beer C., Shvidenko A., McCallum I., et al. Estimating the carbon balance of central Siberia using a landscape-ecosystem approach, atmospheric inversion and Dynamic Global Vegetation Models // *Global Change Biology*. 2011. Vol. 17. P. 351–365.
10. Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V., Gluck F., Mattias J., Obersteiner M. Full carbon account for Russia. IIASA Interim Report, IR-00-021. Laxenburg, Austria: IIASA, 2000.
11. Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A.Z., Schepachenko D.G. Boreal forest health and global change // *Science*. August 2015. Vol. 349, is. 6259. P. 819–821.
12. Швиденко Ф.З., Щепаченко Д.Г., Кракнер Ф., Онуцин А.А. Переход к устойчивому управлению лесами России: теоретико-методические предпосылки // *Сибирский лесной журнал*. 2017. № 6. С. 3–25.
13. Розенберг Г.С. Модели в фитоценологии. М.: Наука, 1984.
14. Paris Agreement. Conference of the Parties Twenty-first session. Paris, 30 Nov. to 11. Dec., 2015. 19 p.
15. Сукачев В.Н. Избранные труды. Т. 1. Основы лесной типологии и биогеоценологии. Л.: Наука, 1972. 418 с.
16. Лосев К.С. Экологические проблемы и перспективы устойчивого развития России в XXI веке. М.: Космосинформ, 2001. 399 с.
17. Schmidt G.A., Ruedy R., Hansen J.E. et al. Present day atmospheric simulations using GISS Model E: Comparison to in-situ, satellite and reanalysis data // *J. Climate*. 2006. Vol. 19. P. 153–192.
18. Hansen J., Sato M., Ruedy R. et al. Climate simulations for 1880–2003 with GISS model E // *Climate Dynamics*. 2007. Vol. 29. P. 661–696.
19. Gorshkov V.G. Physical and biological basis of life stability. Man, Biota, Environment. New York: Springer Verlag, 1994. 470 p.
20. Горшков В.В., Горшков В.Г., Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С., Макарьева А.М. Биотическая регуляция окружающей среды // *Экология*. 1999. № 2. С. 105–113.
21. Кондратьев К.Я., Лосев К.С., Ананичева М.Д., Чеснокова И.В. Естественно-научные основы устойчивости жизни. М.: ВИНТИ. Институт географии РАН, 2003. 239 с.
22. Тимофеев-Ресовский Н.В. Структурные уровни биологических систем // *Системные исследования*. Ежегодник. 1970. М.: Наука, 1970. С. 80–113.
23. Коломыц Э.Г. Мониторинг устойчивого развития лесных экосистем в меняющемся климате. М.: ИНФРА-М, 2024. 547 с.
24. Houghton J.T., Meira Filho L.G., Callander B.A. et al., eds. *Climate Change 1995. The Science of Climatic Change*. Cambridge, UK: The Cambridge Univ. Press, 1996.
25. Грибова С.А., Исаченко Т.И., Лавренко Е.М., ред. *Растительность Европейской части СССР*. Л.: Наука, 1980. 429 с.
26. Котова Т.В., ред. *Растительность Европейской части СССР и Кавказа*. М-6 1 : 2 000 000. М.: ГУГК, 1987. 4 л.
27. Исаев А.С., ред. *Разнообразие и динамика лесных экосистем России*. Кн. 1. М.: КМК, 2012. 460 с.
28. Бартаев С.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Уваров И.А. Карта растительного покрова России. М.: ИКИ РАН и ЦЭПЛИ РАН, 2010.
29. Сочава В.Б. *Растительный покров на тематических картах*. Новосибирск: Наука, 1979. 189 с.
30. Морозов Г.Ф. *Учение о лесе*. Изд. 3-е. Л.: Гос. изд-во, 1926. 368 с.
31. Ashby W.R. *An Introduction to Cybernetics*. London: Oxford University Press, 1956. 432 с.
32. Montgomery D.C., Peck E.A. *Introduction to linear regression analysis*. New York: Wiley, 1982. 504 p.

References

1. Isaev, A.S.; Korovin, G.N. Carbon in the Forests of Northern Eurasia. In *Carbon Cycle in Russia*. Ministry of Science and Technology of the Russian Federation: Moscow, Russia. 1999, 63–95. (In Russian)
2. Kondratyev, K.Ya.; Demirchyan, K.S. Global Climate Changes and Carbon Cycle. *Izvestiya of the Russian Geographical Society*. 2000, Issue 4, 1–20. (In Russian)

3. Shvidenko, A.Z.; Nilsson, S.; Stolbovoy, V.S., et al. Experience of Aggregated Assessment of Main Indicators of Bioproduction Process and Carbon Budget of Terrestrial Ecosystems in Russia. 2. Net Primary Production of Ecosystems. *Ecology*. 2001, 2, 83–90. (In Russian)
4. Schimal, D.S.; House, J.L.; Hibbard, K.A., et al. Resent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*. 2001, Vol. 414, 8, 169–178.
5. Gamon, J.A.; Huemmrich, K.E.; Peddle, D.R., et al. Remote sensing BOREAS: Lessons learned. *Remote Sensing of Environment*. 2004, Vol. 89, 139–162.
6. Stinson, G.; Kurz, W.A.; Smyth, C.E., et al. An inventory-based of Canada's managed forest carbon dynamics, 1900 to 2008. *Global Change Biology*. 2011, Vol. 17, 2227–2244.
7. Schepaschenko, D.; McCallum, I.; Shvidenko, A.; Fritz, S.; Kraxner, F.; Obersteiner, M.A. New hybrid land cover dataset for Russia: a methodology for integrating statistics, remote sensing and in situ information. *Journal of Land Use Science*. 2011, Vol. 6, 4, 245–259.
8. Shechepashchenko, D.G.; Mukhortova, L.V.; Shvidenko, A.Z.; Vedrova, E.F. Organic carbon reserves in Russian soils. *Soil Science*. 2013, 2, 123–132. (In Russian)
9. Quegan, S.; Beer, C.; Shvidenko, A.; McCallum, I., et al. Estimating the carbon balance of central Siberia using a landscape-ecosystem approach, atmospheric inversion and Dynamic Global Vegetation Models. *Global Change Biology*. 2011, Vol. 17, 351–365.
10. Nilsson, S.; Shvidenko, A.; Stolbovoi, V.; Gluck, F.; Mattias, J.; Obersteiner, M. Full carbon account for Russia. IASA Interim Report, IR-00-021. Laxenburg, Austria: IASA, 2000.
11. Gauthier, S.; Bernier, P.; Kuuluvainen, T.; Shvidenko, A.Z.; Schepachenko, D.G. Bo-real forest health and global change. *Science*. 2015, Vol. 349, Issue 6259, 819–821.
12. Shvidenko, F.Z.; Shechepachenko, D.G.; Kraxner, F.; Onuchin, A.A. Transition to sustainable forest management in Russia: theoretical and methodological prerequisite. *Siberian Forest Journal*. 2017, 6, 3–25. (In Russian)
13. Rosenberg, G.S. Models in phytocenology. Nauka: Moscow, USSR. 1984; 265 p. (In Russian)
14. Paris Agreement. Conference of the Parties Twenty-first session. Paris, 30 Nov. to 11. Dec., 2015. 19 p.
15. Sukachev, V.N. Selected works. Fundamentals of forest typology and biogeocenology. Nauka: Leningrad, USSR. Vol. 1. 1972; 418 p. (In Russian)
16. Losev, K.S. Environmental problems and prospects for sustainable development of Russia in the 21st century. Kosmosinform Publishing House: Moscow, Russia. 2001; 399 p. (In Russian)
17. Schmidt, G.A.; Ruedy R.; Hansen J.E., et al. Present day atmospheric simulations using GISS Model E: Comparison to in-situ, satellite and reanalysis data. *J. Climate*. 2006, Vol. 19, 153–192.
18. Hansen, J.; Sato, M.; Ruedy, R., et al. Climate simulations for 1880–2003 with GISS model E. *Climate Dynamics*. 2007, Vol. 29, 661–696.
19. Gorshkov, V.G. Physical and biological basis of life stability. Man, Biota, Environment. Springer Verlag: New York, USA. 1994; 470 p.
20. Gorshkov, V.V.; Gorshkov, V.G.; Danilov-Danilyan, V.I.; Losev, K.S.; Makarieva, A.M. Biotic regulation of the environment. *Ecology*. 1999, 2, 105–113. (In Russian)
21. Kondratyev, K.Ya.; Losev, K.S.; Ananicheva, M.D.; Chesnokova, I.V. Natural-scientific foundations of life sustainability. Institute of Geography RAS: VINITI. Moscow, Russia. 2003; 239 p. (In Russian)
22. Timofeev-Resovsky, N.V. Structural levels of biological systems. In *System studies. Yearbook*. Nauka: Moscow, Russia. 1970, 80–113. (In Russian)
23. Kolomyts, E.G. Monitoring of sustainable development of forest ecosystems in a changing climate. INFRA-M: Moscow, Russia. 2024; 547 c. (In Russian)
24. Houghton, J.T.; Meira Filho, L.G.; Callander B.A., et al., eds. Climate Change 1995. The Science of Climatic Change / Cambridge, UK: The Cambridge Univ. Press, 1996.
25. Gribova, S.A.; Isachenko, T.I.; Lavrenko, E.M., eds. Vegetation of the European part of the USSR. Nauka: Leningrad, USSR. 1980; 429 p. (In Russian)
26. Kotova, T.V., ed. Vegetation of the European part of the USSR and the Caucasus. M-b 1:2 000 000. GUGK: Moscow, USSR. 1987; 4 p. (In Russian)
27. Isaev, A.S., ed. Diversity and dynamics of forest ecosystems in Russia. Book 1. KMK: Moscow, Russia. 2012; 460 p. (In Russian)
28. Bartalev, S.A.; Ershov, D.V.; Isaev, A.S.; Lupyan, E.A.; Uvarov, I.A. Map of the vegetation cover of Russia. IKI RAS and CEPL RAS: Moscow, Russia. 2010. (In Russian)
29. Sochava, V.B. Vegetation cover on thematic maps. Nauka: Novosibirsk, Russia. 1979; 189 p. (In Russian)
30. Morozov, G.F. Teaching about the forest. Ed. third. State Publishing House: Leningrad, USSR. 1926; 368 p. (In Russian)
31. Ashby, W. R. An Introduction to Cybernetics. Oxford University Press: London. 1956; 432 p.
32. Montgomery, D.C.; Peck, E.A. Introduction to linear regression analysis. Wiley: New York, USA. 1982; 504 p.

Статья поступила в редакцию 22.08.2025; одобрена после рецензирования 25.09.2025; принята к публикации 14.11.2025.

The article was submitted 22.08.2025; approved after reviewing 25.09.2025; accepted for publication 14.11.2025.