

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 9.929 + 57.557 + 50.502/504

DOI: 10.15372/GIPR20230310

Э.Г. КОЛОМЫЦ

Пушкинский научный центр РАН, Институт фундаментальных проблем биологии,
129290, Пушкино, ул. Институтская, 2, Россия, egk2000@mail.ru

РОЛЬ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ БОРЕАЛЬНЫХ И НЕМОРАЛЬНЫХ ЛЕСОВ ВОЛЖСКОГО БАСЕЙНА В СМЯГЧЕНИИ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Представлен прогнозный ландшафтно-экологический анализ лесного покрова Волжского бассейна. Освещена проблема поглощения парниковых газов экосистемами и их адаптации к глобальному потеплению, решение которой соответствует целям Парижского соглашения по изменению климата (2015 г.). Эмпирически обоснованы известные концептуальные положения о способности экологических ресурсов лесного покрова дополнительно поглощать парниковые газы с помощью механизмов регуляции углеродного цикла при изменениях климата. Установлен адсорбционный потенциал коренных и производных бореальных и неморальных лесов, оценена их способность смягчать климатические изменения, в том числе снижать антропогенное потепление. Проведена количественная оценка потери экологических ресурсов лесами Волжского бассейна, связанной с интенсивным развитием лесо- и землепользования. Выявлены контрастные изменения экологических ресурсов бореальных и неморальных лесов при их структурной трансформации в процессе глобального потепления. Верификация прогнозных расчетов углеродного баланса, проведенная по дистанционным и наземным измерениям в бореальных лесах Центральной Канады в первое десятилетие современного потепления, дала положительные результаты.

Ключевые слова: лесные экосистемы, коренные и производные леса, биологический круговорот, изменения климата, углеродный баланс, экологические ресурсы лесного покрова.

E.G. KOLOMYTS

Pushchino Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Institute of Basic Biological Problems,
129290, Pushchino, ul. Institutsкая, 2, Russia, egk2000@mail.ru

THE ROLE OF ECOLOGICAL RESOURCES OF BOREAL AND NEMORAL FORESTS OF THE VOLGA RIVER BASIN IN THE ATTENUATION OF GLOBAL WARMING

A forecast landscape-ecological analysis is made of the forest cover of the Volga River basin, with a focus on the problem of absorption of greenhouse gases by ecosystems and their adaptation to global warming, the solution of which is in line with the goals set in the Paris (2015) Agreement. Empirically substantiated are the well-known conceptual provisions on the capacity of the ecological resources of forest cover to additionally absorb greenhouse gases using the mechanisms of regulating the carbon cycle under climate change. The absorption potential of indigenous and derivatives of boreal and nemoral forests has been established, and their ability to mitigate climate changes, including reducing anthropogenic warming, has been evaluated. A quantitative assessment is made of the loss of environmental resources by the forests of the Volga River basin since the beginning of intensive forest and land use in it. Contrasting changes in the ecological resources of boreal and nemoral forests in the process of their structure transformation due to global warming were revealed. A verification of the forecast calculations of the carbon balance, carried out on the basis of remote sensing and ground-based measurements in the boreal forests of Central Canada, gave positive results only in the first decades of current warming.

Keywords: forest ecosystems, indigenous and derivative forests, biological cycle, climate change, carbon balance, ecological resources of forest cover.

ВВЕДЕНИЕ

Познание крупномасштабных биосферных процессов тесно связано с решением проблемы сохранения и воспроизводства лесных ресурсов на обширных территориях в условиях глобальных климатических изменений. Лесной покров входит в число ведущих факторов устойчивости континентальной биосферы [1, 2]. Современное глобальное потепление, вызванное увеличением выбросов парниковых газов в атмосферу, — свершившийся факт [3]. Климатические прогнозы, основанные на сценариях техногенных выбросов парниковых газов в атмосферу, предполагают повышение с 1990 по 2100 г. средней глобальной температуры поверхности Земли в пределах 1,4–5,8 °C, что в 2–10 раз превышает величину потепления, зафиксированного в XX в. [4]. Согласно Парижскому соглашению по изменению климата (2015 г.) [5], во избежание глобальной экологической катастрофы необходимо принимать меры, чтобы потепление к 2050 г. не превысило 1,5–2 °C. 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 [5]). Через процессы поглощения парниковых газов необходимо оценить роль естественных экосистем в регуляции углеродного цикла и стабилизации окружающей среды.

В качестве идеологической основы научного поиска по указанной проблеме нами использована новая экологически ориентированная парадигма в учении о лесе [6, 7], которая содержит концептуальные положения о способности лесного покрова поглощать парниковые газы с помощью механизмов регуляции углеродного цикла при изменениях климата. Эта регуляция направлена на приспособление лесного сообщества к изменившимся условиям окружающей среды и сохранение относительной стабильности ее продукционного процесса в меняющемся климате, что обеспечивает и устойчивость механизмов самой регуляции углеродного цикла как ведущего звена биологического круговорота. Поддержка способности лесов смягчать изменения климата с помощью механизмов биотической регуляции углеродного цикла — одна из задач стратегии устойчивого управления лесами [8].

Бореальные леса России обеспечивают свыше 90 % стока углерода всех мировых бореальных лесов [8]. По разным оценкам, общая площадь относительно ненарушенных российских лесов, способных выступать стабилизаторами и регуляторами окружающей среды, варьируется от 3,45 до 4,65 млн км², что составляет треть всех аналогичных лесов мира [7, 9]. Это климаксные, а точнее, квазиклимаксные лесные сообщества (хвойные, смешанные и широколиственные), знаменующие собой заключительные этапы эндозоогенетических (восстановительных) сукцессий, по В.Н. Сукачёву [1], которые идут через серию производных (вторичных) мелколиственных формаций, главным образом березняков и осинников. Считается, что в зрелых лесах стабилизируется биомасса лесов, восстанавливается замкнутость биологического круговорота, сохраняется устойчивость депо живой и мертвой фитомасс. Это стабилизирует депозит углерода и замораживает его эмиссию [7]. Тем самым обеспечивается наиболее высокая эффективность работы почвенно-биотических механизмов стабилизации и регулирования окружающей среды.

В настоящей работе изложена сравнительная количественная оценка экологических ресурсов лесных формаций Волжского бассейна по удельным и суммарным значениям их углеродного баланса при прогнозируемых сценариях изменений климата. Оценивались экологические ресурсы двух категорий леса — восстановленных коренных и реальных (коренных и производных). Основные прогнозные климатические сценарии взяты по модели E GISS [10] из семейства моделей общей циркуляции атмосферы AOGCMs. Эта модель дает пределы климатических изменений, соответствующие целям Парижского соглашения 2015 г. (см. выше). В бореальном поясе Волжского бассейна к 2050 г. ожидается понижение средней июльской температуры на 0,5–1,9 °C, с ростом коэффициента атмосферного увлажнения ($K_{увл}$) с 1,15–1,52 до 1,27–1,79 (гумидизация), а в 2200 г. — ее повышение на 0,5–0,7 °C при уменьшении $K_{увл}$ до 1,0–1,36 (аридизация).

Однако существующий в настоящее время тренд потепления способен привести к повышению средней глобальной температуры к 2100 г. на 4 °C [11], а на территории России — до 6–11 °C [8]. Такая вполне реальная перспектива соответствует климатическому прогнозу, который дает известная экстремальная модель HadCM3, версия A2 [12], со снижением в бореальном поясе $K_{увл}$ с 1,29–1,37 до 0,78–0,75, т. е. до уровня увлажнения южной лесостепи [13].

Все прогнозные сроки рассматривались безотносительно к их временной привязке, т. е. использованы как модели для ответа на вопрос «Что будет, если...», независимо от того, когда наступит тот или иной прогнозируемый климатический сценарий. Аналогичный подход принят, как известно, в

ретроспективном прогнозе по палеогеографическим данным. Для каждого климатического сценария, заданного на тот или иной срок, оценивалась степень отклонения (положительного или отрицательного) метаболических параметров от их базовых величин. Такие отклонения были рассчитаны по материалам ландшафтной съемки на каждом экспериментальном полигоне (см. ниже) на основе проведенной гидротермической ординации метаболических параметров, подробно изложенной в [14]. При этом использовано свойство пространственно-временного самоподобия операционной эргодической системы, согласно [15].

ОБЪЕКТЫ

Исходными объектами послужили лесные биогеоценозы восьми экспериментальных полигонов основного водосбора Волжского бассейна (рис. 1), на которых в течение 1987–1998 гг. была проведена крупномасштабная ландшафтная съемка по специально разработанной методике [14]. Полигоны охватывают основной зональный спектр растительного покрова Верхнего и Среднего Поволжья — от южной тайги до южной лесостепи. В пределах каждого полигона на основе 40–53 пробных площадей выделялись шесть лесных биогеоценотических групп. Эти группы располагались по вектору локаль-

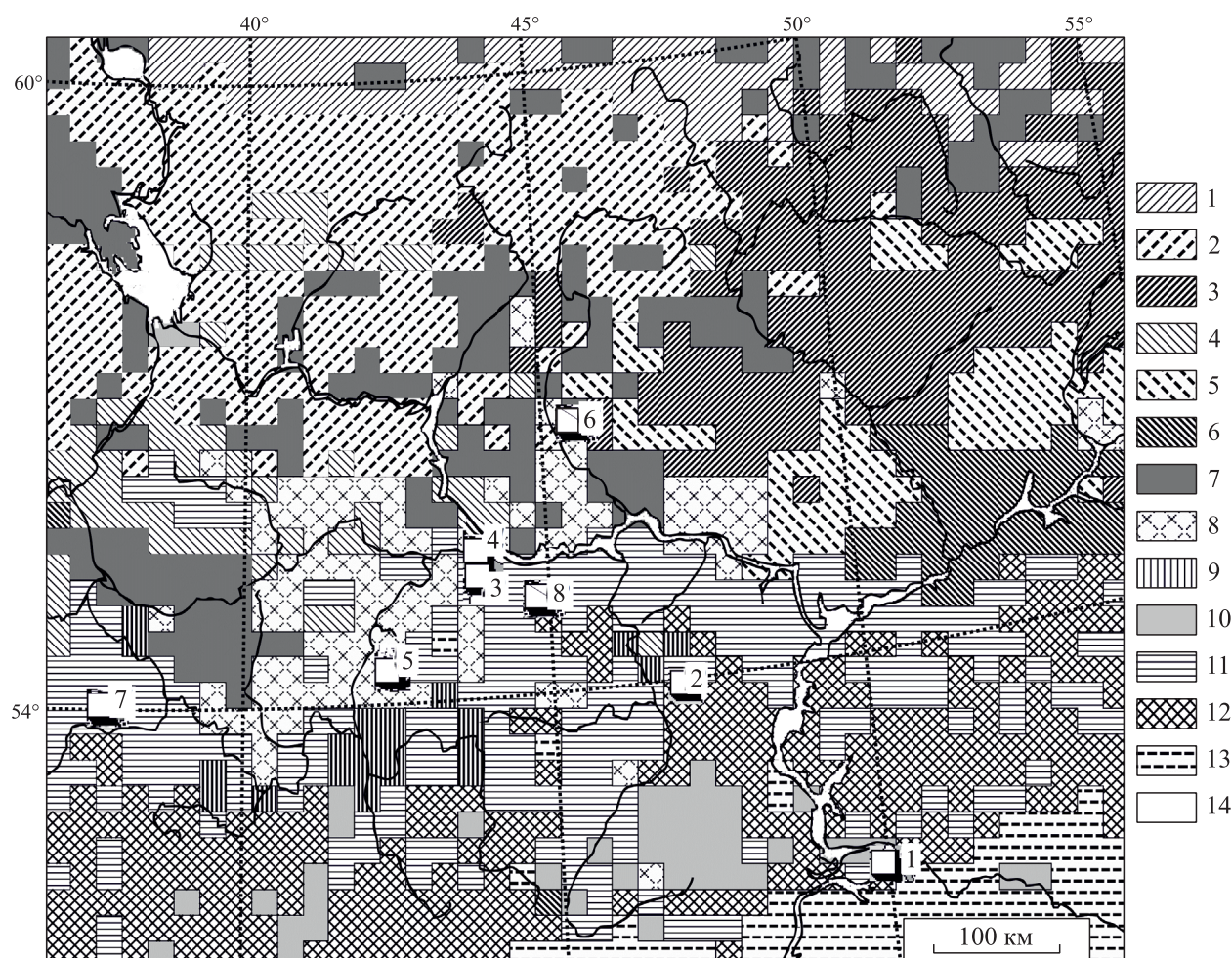


Рис. 1. Растровая базовая карта зонально-провинциальных групп коренных растительных формаций (современных и восстановленных) на территории основного водосбора Волжского бассейна (рассчитана автором и составлена Л.С. Шарой).

Экспериментальные полигоны, по [14]: 1 — Жигули, 2 — Присурье, 3 — Зелёный город, 4 — Шёлоковский хутор, 5 — Выкса, 6 — Керженец, 7 — Приокско-Террасный заповедник, 8 — Кудьма. 1–13 — см. в табл. 1. 14 — озера и водохранилища.

ного ландшафтного сопряжения (микрокатены) — от водораздельных элювиальных (Э) и трансэлювиальных (ТЭ) типов местоположений (МП) через склоновые транзитные (Т) и трансаккумулятивные (ТА) типы до долинных аккумулятивных (А) и супераккумулятивных (СА), согласно [16]. Каждому типу МП соответствовал определенный набор типов леса. Таким образом, каждый полигон описывался некоторой собирательной трансектой, что обеспечило сопоставимость полученного фактического материала.

Среди биогеоценозов выделялась плакорная группа, по определению Г.Н. Высоцкого [17], как локальный зональный представитель данного экорегиона. Остальные же катенарные звенья отнесены к экстразональным топоэкосистемам, которые рассматривались в качестве представителей других природных зон и регионов, нередко весьма удаленных. Таким образом, по всем экспериментальным полигонам были получены региональные системы локальной зональности [15]. Эмпирически выявленное свойство полизональности локальных экосистем позволило экстраполировать результаты крупномасштабных ландшафтных съемок (по 76 структурно-функциональным параметрам биогеоценозов) на весь зональный спектр основного водосбора Волжского бассейна — от средней тайги до северной степи.

Переход с локального уровня (м-бы 1:50 000–100 000) на региональный (м-бы 1:2 000 000–4 000 000) осуществлялся с помощью метода индукционно-иерархической экстраполяции [18], который основан на свойстве полизональности локальных экосистем. Системы локальной зональности состоят из векторных рядов плакорных биогеоценозов, отражающих зонально-региональный фон данной территории, и экстразональных топоэкосистем как представителей других зональных типов географической среды. Такие ряды соответствуют вектору прогнозируемых изменений климата и тем самым имитируют основные направления экосистемных перестроек.

В данной процедуре использованы карты растительности европейской части бывшего СССР указанных масштабов, созданные в 1974, 1980 и 1987 гг. [19–21], т. е. примерно в то же время, когда проводились крупномасштабные ландшафтные съемки. После окончания базового периода 1885–1986 гг., как известно [22], началось современное глобальное потепление. Содержание карт было использовано как исходный фактический материал для базовых и прогнозных экологических расчетов, в том числе по углеродному балансу лесных формаций. По систематике [23], на территории Волжского бассейна присутствует 13 классов (или групп) коренных растительных ассоциаций (см. рис. 1; табл. 1). Опишем метод индукционно-иерархической экстраполяции.

Каждый тип/подтип растительной формации, представленный на мелкомасштабной геоботанической карте, идентифицировался определенной группой конформных фитоценозов, взятых из плакорно-экстразональных рядов биогеоценозов по всем полигонам. В свою очередь, каждый экорегион, описываемый тем или иным экспериментальным полигоном, содержал целый спектр локальных представителей различных зонально-региональных фитоценологических систем ранга растительных формаций [23].

Одновременно создавалась карта мезоместоположений, для чего была проведена экологизация ландшафтной карты с выделением групп ландшафтов [24], а также использовались новые методы геоморфометрической статистики с 18 морфометрическими параметрами [25]. Каждый ареал данной формации, представленный как поливекторное множество мезокатен, дробился на региональные типы местоположений (группы ландшафтов) — от Э и ТЭ до А и СА. Принимая далее, согласно концепции ландшафтных сопряжений Б.Б. Полынова [26], мезокатену в качестве гомоморфного образа микрокатены, разносили имеющиеся биогеоценозы всех выделенных групп из каждого экспериментального полигона по мезоместоположениям соответствующего ему геоботанического ареала. Полученная таким образом региональная фитокактенарная мозаика насыщалась метаболическими параметрами биогеоценозов, взятых уже в качестве локальных представителей соответствующих зонально-региональных типов/подтипов географической среды. В данном случае это базовое содержание углерода $\Sigma C(\text{баз.})$ и углеродный баланс $\Delta C(Fa)$ к данному прогнозируемому сроку в отдельных пулах и в целом по лесному биогеоценозу. Наконец, на основе информационного анализа по каждой группе растительных формаций бассейна рассчитывались средневзвешенные значения $\Sigma C(\text{баз.})$ и $\Delta C(Fa)$ в соответствии с площадной долей ее участия в данном зональном типе формаций.

В группу ассоциаций входят лесные сообщества разного возраста (от молодого до перестойного), что обуславливает многообразие содержания углерода в различных пулах. Считается, что наиболее высокие значения депонирования CO_2 свойственны молодым и средневозрастным насаждениям [27, 28]. Однако влияние фактора возраста леса удалось обойти. В процессе обобщения по каждой лесной формации, с одной стороны, интегрировались локальные геоморфологические и гидротермозадафи-

Таблица 1

Классификационная схема коренного растительного покрова основного водосбора Волжского бассейна и его окружения

Растительные формации [20, 21, 23]			Кartiруемые типологические единицы растительности — группы ассоциаций	
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 неморально-травяные	3↑↑
	Камско-печерско-западноуральские	Средне-и южнотаежные	Пихтово-еловые и елово-пихтовые травяно-кустарничковые зеленомошные и травяные	4↑↑
		Подтаежные	Пихтово-еловые сложные неморально-травяные	5↑↑
			Широколиственно-пихтово-еловые неморально-травяные	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 со степными кустарниками и разнотравно-злаковые	10↑↑
Широколиственные леса	Восточно-европейские	Северо-лесостепные	Липово-дубовые и дубовые	11a↑↑
			Липовые с примесью других широколиственных пород	11b↑↑
Типичная и южная лесостепь	Причерноморского типа	Типично лесостепные	Луговые степи в сочетании с лесами из дуба	12↑↑
		Южно-лесостепные	Богатразнотравно-типчаково-ковыльные степи	13↑↑

ческие условия ее формирования, а с другой — осреднялись возрастные показатели лесообразующих пород в каждом множестве пробных площадей. Это нивелировало соответствующий разброс продуктивности и позволяло получить средние для каждой группы ассоциаций 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 определяются как топологическим разнообразием абиотической среды, так и уровнем функционирования биогеоценозов.

РАСЧЕТЫ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ БАЛАНСОВ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПРИ ПОТЕПЛЕНИИ И ПОХОЛОДАНИИ

Для оценок суммарного газообмена CO_2 лесных биогеоценозов с приземной атмосферой был применен известный лесоводственный метод, который, в отличие от двух других распространенных методов — эколого-физиологического (камерального) и пульсационного (эдди-корреляции), «независим, если необходимо определить поглощение CO_2 древостоями за длительное время» [29, с. 215].

Малый биологический круговорот в природных экосистемах складывается из трех основных процессов их функционирования, согласно [30]: 1) анаболизма, создающего биомассу (BM), или живую фитомассу; 2) некроболизма, формирующего первичную некромассу (NM_1), или мортмассу; 3) катаболизма (KB), приводящего к полной минерализации органического вещества и формированию гумуса — вторичной некромассы (NM_2). По другой терминологии [16], первый процесс именуется автотрофным биогенезом, а второй и третий — детритогенезом.

Таким образом, малый биологический круговорот формирует в лесном биогеоценозе два суммарных углеродных пула со следующими парциальными экомассами:

$$(BM) \leftrightarrow (BS + BV + BR); (NM) = [(NM_1) + (NM_2)] \leftrightarrow (WD + ML + HU), \quad (1)$$

где BS — общая скелетная масса древостоя, подроста и подлеска; BV — общая зеленая масса всех ярусов лесного сообщества; BR — общая масса корней; WD — мертвая древесно-кустарниковая фитомасса (дебрис); ML — масса лесной подстилки (опад + отпад + мор); HU — масса лабильного гумуса в горизонте A_1 (примерно в верхнем 20-сантиметровом слое почвы).

Расчеты живых фитомасс проводились по общим и региональным таблицам биологической продуктивности полных (нормальных) насаждений [31], для чего были использованы средний возраст и бонитет каждой породы — исходные параметры, полученные при таксации леса на пробных площадях. Параметры WD , ML и HU определены эмпирически. Переход от самих фитомасс к содержанию в них углерода осуществлен с помощью известных в литературе углеродных коэффициентов [27, 28 и др.].

Для каждого прогнозируемого климатического сценария углеродный баланс $\Delta C(Fa)$ — как отклонение масс углерода в системе почва — растение — атмосфера от их базовых значений рассчитывался по формуле

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

По уравнению (2) оценивались возможные изменения потоков углерода между почвенно-растительным покровом и атмосферой для каждой группы лесных биогеоценозов во всех рассматриваемых экорегионах Волжского бассейна. Алгоритмы расчетов изложены в работах [13, 15]. Принято, что по каждому климатическому сценарию содержание углерода в фито- и некромассах характеризует определенное стационарное состояние лесного биогеоценоза, свойственное данным гидротермическим условиям, с ежегодно повторяющимся законченным циклом биологического круговорота.

Каждый член правой части уравнения (2) может иметь как положительные, так и отрицательные значения. Все фитомассы с положительными значениями $\Delta(BM)$ свидетельствуют о дополнительном поглощении биомассой CO_2 из атмосферы. В то же время значение $\Delta(NM)$ есть дополнительная величина деструкции мертвой органики по сравнению с ее величиной в базовый период. Прибавка некромассы по сравнению с ее базовыми значениями указывает на то, что при данном климатическом сценарии в ежегодном цикле метаболизма должно произойти усиление процессов детритогенеза (разложения, минерализации и гумификации), которое вызовет дополнительную эмиссию CO_2 в атмосферу. Нейтральный углеродный режим лесного биогеоценоза имеет место при соотношении $(BM) \approx (NM)$, а при $(BM) > (NM)$ можно говорить о положительной регуляции углеродного цикла со стороны лесной экосистемы. В случае же $(BM) < (NM)$ дополнительная эмиссия углерода преобладает над его дополнительным поглощением, и суммарная регуляция становится отрицательной.

При отрицательных значениях указанных параметров картина обратная: автотрофный биогенез, снижающий свою интенсивность, потребляет меньшее количество CO_2 , а в детритной ветви биологического круговорота поступление углерода в атмосферу сокращается, что в определенной степени компенсирует недостаток его поглощения живой биомассой. В этих случаях соотношение абсолютных значений $(BM) < (NM)$ должно указывать на положительную регуляцию углеродного цикла, а соотношение $(BM) > (NM)$ — на регуляцию отрицательную.

В итоге складывается общий баланс изменений углеродного обмена между почвенно-растительным покровом 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 [6] 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 $-\Delta(BM)$ и положительных $\Delta(NM)$ можно говорить о позитивной биотической регуляции холодного климатического сигнала, направленной на его ослабление. В противном случае эта регуляция окажется негативной, т. е. усиливающей процесс похолодания.

Следует 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 воздействием устойчивой смены климатических условий. Это можно назвать «баланс балансов» — соотношение прогнозных балансов и баланса конца базового периода. Динамический баланс коренным образом отличается от традиционного статичного углеродного баланса, который рассчитывается для данных почвенно-геоморфологических и фитоценологических условий при стационарном климате (либо без учета каких-либо климатических изменений). Как правило, статичный углеродный баланс по своим абсолютным значениям на порядок больше, нежели баланс динамический.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экологические ресурсы восстановленных коренных лесов. На гипотетической (виртуальной) карте зонально-провинциальных групп коренных лесных ассоциаций (см. рис. 1, табл. 1) современные ареалы объединены с площадями находящихся на их месте вторичных сообществ, а также сельскохозяйственных земель, по [21]. Карта демонстрирует исходное размещение групп коренных сообществ в период отсутствия интенсивного земле- и лесопользования. Она отображает зонально-провинциальную фитоклиматическую структуру территории Волжского бассейна. Базовое суммарное содержание углерода, а также удельные и суммарные углеродные балансы этих гипотетических лесов в меняющемся климате представлены в табл. 2 и на рис. 2. Они раскрывают регуляцию углеродного цикла зонально-региональной структурой 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 (дополнительное поглощение CO_2 и соответствую-

Таблица 2

Суммарные базовые запасы углерода, суммарный и удельный углеродные балансы в восстановленных коренных (зонально-климаксных) лесах Волжского бассейна согласно моделям E GISS и HadCM3

Группы ассоциаций (см. табл. 1)	Общая площадь, км ²	Суммарные базовые запасы углерода, млн т	Суммарный (удельный) углеродный баланс, млн т (т/га) по климатическим сценариям		
			E GISS, холодногумидный, 2050 г.	E GISS, умеренный термоаридный, 2200 г.	HadCM3, экстремальный термоаридный, 2100 г.
1↑↑	45 927	508,596	−70,932 [+] (−16,06)	187,489 [+] (42,45)	91,205 [+] (20,65)
2↑↑	128 709	2 368,889	−122,565 [+] (−9,93)	−51,100 [−] (−4,14)	2,222 [+] (0,18)
3↑↑	96 957	1975,984	36,362 [−] (3,91)	137,822 [+] (14,82)	103,785 [+] (11,16)
4↑↑	32 319	566,358	−64,274 [+] (−9,45)	−26,800 [−] (−3,94)	221,865 [+] (32,62)
5, 6↑↑	65 772	1246,708	9,426 [−] (3,64)	35,685 [+] (13,78)	40,372 [+] (15,59)
7↑↑	93 555	2445,425	111,725 [−] (12,47)	189,404 [+] (21,14)	147,563 [+] (16,47)
8, 9↑↑	66 339	1157,35	117,881 [−] (18,57)	173,537 [+] (27,33)	55,448 [+] (9,05)
11a, 6↑↑	13 3245	2736,852	18,118 [−] (1,37)	−102,622 [−] (−7,76)	110,689 [+] (8,37)
10, 12↑↑	148 554	2656,309	58,859 [−] (14,96)	−56,891 [−] (−14,46)	−13,613 [−] (−3,46)
13↑↑	8505	10,266	4,165 [−] (13,09)	2,416 [+] (7,60)	0,767 [+] (2,41)
Заболоченные леса	5850	82,315	8,463 [−] (16,84)	7,172 [+] (14,27)	20,370 [+] (40,53)
Лесные болота	2400	33,014	2,142 [−] (10,39)	5,798 [+] (28,12)	4,182 [+] (20,28)
Неморальные поймы	17 361	255,762	0,223 [−] (0,15)	11,798 [+] (7,91)	12,469 [+] (8,36)
Сумма (среднее)	845 493	16 043,828	109,586 [−] (4,61)	513,708 [+] (11,31)	797,319 [+] (14,02)

Примечание. Здесь и в табл. 3, 4. Группы ассоциаций: 1–13 — см. рис. 1. Лесопокрываемая площадь для групп ассоциаций 10 и 12 принята равной 26 %, а для 13-й — 11 %. Знаком [+] отмечена позитивная регуляция углеродного цикла при данном климатическом тренде, а знаком [−] — негативная.

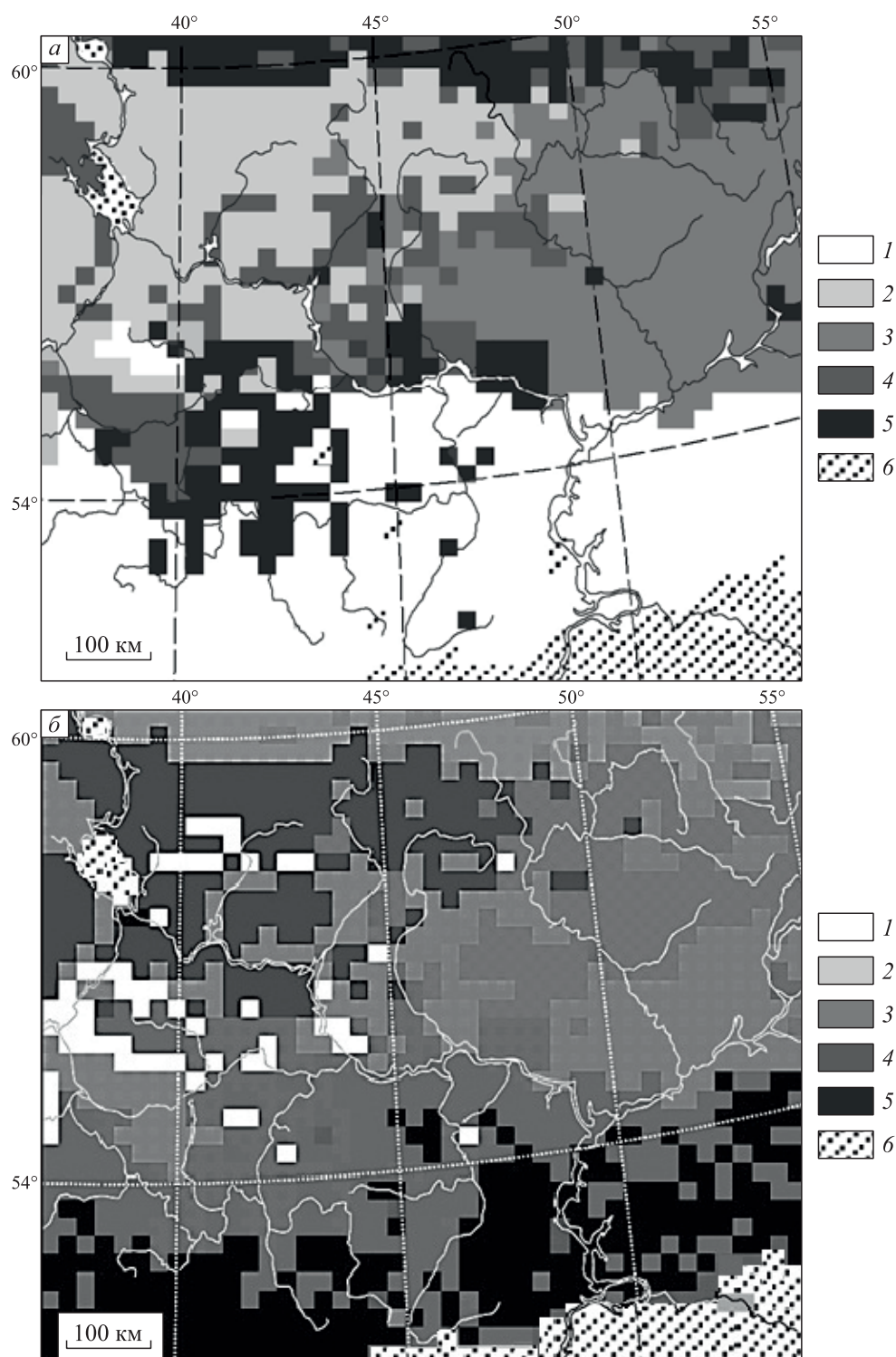


Рис. 2. Распределение удельного углеродного баланса (т/га) в восстановленных коренных лесных ассоциациях Волжского бассейна для сценариев регионального потепления (2200 г.) (а) и регионального похолодания (2050 г.) (б) согласно модели E GISS (растровые карты рассчитаны и составлены Л.С. Шарой).

а — углеродный баланс: 1 — -234,3...-162,3; 2 — -162,2...-90,3; 3 — -90,2-0; 4 — 0-53,8; 5 — 53,9-125,8; 6 — 125,9-197,8. б — углеродный баланс: 1 — -223,6...-127,8; 2 — -12,7...-62,8; 3 — -62,7-0; 4 — 0-73,8; 5 — 73,9-241,7; 6 — 241,8-242,5.

ющее усиление похолодания); 2) в три раза более мощное позитивное (см. табл. 2) — при тренде термоаридном (трехкратно возрастающее значение $\Delta C(Fa)$, которое снижает концентрацию парниковых газов в атмосфере и тем самым ослабляет антропогенное потепление). В первом случае общая адсорбция CO_2 из атмосферы составляет около 1 % суммарного базового содержания углерода в бореальных и суббореальных лесах, а во втором — 3,5 %.

По сценарию регионального умеренного потепления (см. табл. 2, рис. 2, а) наиболее мощное сокращение парниковых газов в атмосфере ожидается со стороны двух групп коренных лесных сообществ — среднетаежных пихто-ельников и средне- и южнотаежных сосняков: в каждой из них суммарный углеродный баланс $\Sigma \Delta C(Fa)$ приближается к 190 млн т. Почти столь же высоким экологическим ресурсом обладают подтаежные елово- и сосново-широколиственные леса в западном секторе бассейна, где $\Sigma \Delta C(Fa) \approx 140\text{--}170$ млн т. В восточном же секторе (камско-печерско-предуральском) суммарный углеродный баланс снижается почти в четыре раза.

Восточноевропейские широколиственные леса будут оказывать существенное негативное воздействие на углеродный обмен земной поверхности с атмосферой: здесь $\Sigma \Delta C(Fa) > -100$ млн т. В два с лишним раза возрастает отрицательный баланс в маргинальных типично-лесостепных сосновых и широколиственно-сосновых лесах.

По сценарию холодно-гумидного тренда имеют место аналогичные соотношения абсолютных значений $\Sigma \Delta C(Fa)$ между группами коренных лесных ассоциаций, однако знак их углеродного баланса меняется на противоположный (см. рис. 2, б): преимущественно положительный углеродный баланс коренных лесов способствует дополнительному похолоданию.

В целом коренные бореальные леса Волжского бассейна при заполнении своего зонально-регионального экологического пространства должны обладать достаточными экологическими ресурсами, чтобы дополнительно поглощать парниковые газы из атмосферы и тем самым снижать грядущее глобальное потепление.

Антропогенные изменения экологических ресурсов современного лесного покрова. 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? По каждой группе

Таблица 3

Удельный углеродный баланс восстановленных коренных (зонально-климаксных) и реальных (коренных и производных) лесных ассоциаций Волжского бассейна на прогнозные сроки 2050 г. (похолодание) и 2200 г. (потепление) согласно модели E GISS

Группы ассоциаций (см. табл. 1)	Удельное базовое содержание углерода, т/га		Удельный углеродный баланс, т/га			
	восстановленные коренные леса	коренные и производные леса	2050 г.		2200 г.	
			восстановленные коренные леса	коренные и производные леса	восстановленные коренные леса	коренные и производные леса
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		13,09 [-]		7,60 [+]
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	156,01	148,89	4,61 [-]	5,00 [-]	11,32 [+]	8,54 [+]

ассоциаций 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 (табл. 3; рис. 3). 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 южнотаеж-

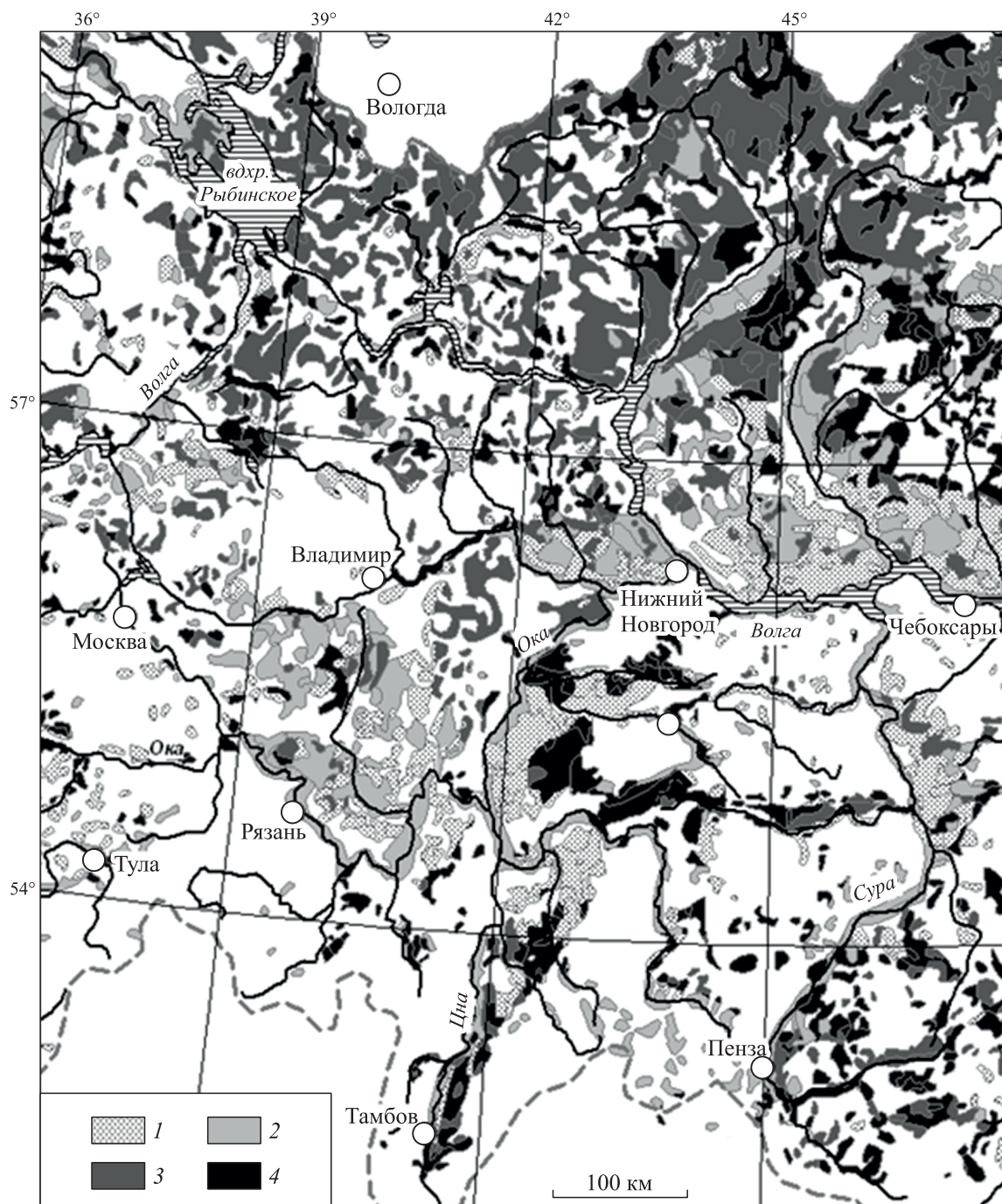


Рис. 3. Карта баланса углерода (т/га) в растительных сообществах Волжского бассейна на 2200 г. по прогнозной климатической модели E GISS (умеренный термоаридный тренд) (рассчитана и составлена Л.С. Шарой).

Ареалы 1–4 даны по карте лесов [1].

ными и подтаежными сосняками, а минимальные — за северостепными широколиственными лесами. Коренные широколиственно-сосновые леса и их дериваты (березняки и осинники) в широкой полосе, охватывающей подтаежную зону и неморально-лесную подзону, проявят резко выраженную положительную регуляцию углеродного цикла, поскольку будут увеличивать продуктивность, с активным поглощением CO_2 из атмосферы ($\Delta C(Fa) = 25\text{--}45$ т/га, местами до $60\text{--}85$ т/га). От дубрав и липняков лесостепной зоны следует ожидать слабо выраженную негативную регуляцию углеродного цикла ($\Delta C(Fa) = -10\text{--}35$ т/га). Суммарные ресурсы определяются также площадями лесных ассоциаций, поэтому общее регулирующее влияние на углеродный цикл, например, мало распространенных камско-предуральских хвойно-широколиственных лесов, а также дубо-липняков северной лесостепи оказывается незначительным.

Сопоставление удельных и суммарных углеродных балансов по восстановленным коренным лесам и реальному лесному покрову (коренные и производные леса) показывает, что замещение коренных лесов производными приводит к общему и достаточно ощутимому снижению экологических ресурсов лесного покрова. Это проявляется в снижении общей положительной регуляции углеродного цикла при потеплении и в повышении его отрицательной регуляции при похолодании (см. табл. 2, 3). Особенно негативно сказывается распространение березняков и осинников в средне- и южнотаежных и подтаежных сосновых лесах, которые 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 среднетаежных пихто-ельников, а у южнотаежных восточноевропейских и камско-предуральских темнохвойных лесов отрицательный углеродный баланс увеличивается на 40–50 %.

Широкое распространение в лесном поясе Волжского бассейна восстановительных сукцессий с господством длительно производных мелколиственных сообществ при термоаридном прогнозном сценарии в 2,8 раза снижает суммарную дополнительную поглотительную способность лесов по сравнению с гипотетически восстановленными коренными лесами. При холодно-гумидном тренде эта способность, наоборот, увеличивается в два раза. В первом случае имеет место резкое ослабление положительной регуляции углеродного цикла, а во втором — несколько меньшее, но также существенное усиление отрицательной регуляции. В обоих случаях присутствует сокращение адсорбционной способности лесов. Таков общий результат снижения экологических ресурсов лесного покрова Волжского бассейна за период интенсивного земле- и лесопользования.

Экологические ресурсы лесов в условиях экстремального потепления. Не менее важно оценить регуляцию углеродного цикла лесными экосистемами при экстремальном термоаридном сигнале согласно модели HadCM3, климатические сценарии которой могут оказаться, как уже отмечалось, вполне реальными при сохранении текущей тенденции к глобальному потеплению. В сравнении со сценарием по климатической модели E GISS на 2200 г. данная модель к концу нашего столетия прогнозирует в три раза большее увеличение не только летних, но и зимних температур [15]. Следовательно, должна возрасти продолжительность вегетационного периода, что при прибавлении атмосферных осадков неизбежно вызовет рост продуктивности лесных сообществ с соответствующим усилением ими поглощения парниковых газов.

В результате при экстремальном потеплении лесной покров Волжского бассейна может приобрести преимущественно положительный углеродный баланс (см. табл. 2). Так, восточноевропейские подтаежные широколиственно-еловые леса, оказывающие по сценарию потепления модели E GISS слабо выраженную отрицательную регуляцию углеродного цикла ($\Delta C(Fa) = -7,12$ т/га), при более мощном термоаридном сигнале, согласно модели HadCM3, становятся субъектами существенной положительной регуляции ($\Delta C(Fa) = 20,01$ т/га). Аналогично меняется углеродный баланс камско-предуральских коренных подтаежных лесов — с $-18,24$ до $15,59$ т/га. Восточноевропейские широколиственные леса оказываются уже не источником углерода, как это было при слабом термоаридном сигнале, а его стоком. Совместно с бореальными (подтаежными и таежными) лесами они способны выполнять общую положительную регуляцию углеродного цикла. В целом можно констатировать общее возрастание смягчающего воздействия лесного покрова бассейна на климатические изменения по мере усиления самого гидротермического сигнала.

В условиях экстремального потепления (по модели HadCM3) разница в удельных значениях углеродного баланса между восстановленными коренными и реальными лесами сглаживается, однако по суммарному балансу она остается столь же существенной (см. табл. 2), а для некоторых зонально-региональных групп лесных формаций даже возрастает. Это касается в первую очередь восточноевропейской южной тайги, где восстановленный коренной лесной покров обнаруживает при экстремальном потеплении положительную регуляцию углеродного цикла, между тем как смесь коренных

и производных лесов значительно увеличивает его отрицательную регуляцию. В широколиственно-темнохвойных лесах распространение березняков и осинников дает противоположный эффект — аномальное повышение положительного углеродного баланса.

Углеродный баланс лесных ассоциаций в системе их термоаридных преобразований. Рассмотренные углеродные балансы лесных формаций Волжского бассейна являются первым приближением в оценках биотической регуляции углеродного цикла и описывают лишь стартовую реакцию лесных сообществ на данный климатический сигнал в соответствии с их исходной фитоценологической структурой. Однако в процессе воздействия этого сигнала происходит функциональная, а затем и структурная адаптация лесных сообществ к новым гидротермическим условиям. Механизмы этой адаптации описаны нами достаточно подробно в виде системы вероятностей и скоростей ландшафтно-экологических переходов [15]. Очевидно, преобразование лесного сообщества типа А в сообщество типа Б с той или иной вероятностью должно сопровождаться и соответствующими изменениями биологического круговорота и углеродного баланса. Однако насколько адекватны эти предполагаемые изменения самой вероятности перехода $A \rightarrow B$?

Эмпирически установлено [32], что продуктивность лесных формаций (а следовательно, и основная доля потоков CO_2) — функциональный параметр, весьма автономный от самой их структуры. Он напрямую зависит от гидротермических условий приземной атмосферы, что и определяет весь процесс поглощения и эмиссии углерода. Это подтверждено также результатами нашего регионального анализа [24]. Можно ожидать, что в рассматриваемом нами 1–2-вековом прогнозном интервале структурная трансформация лесов в процессе глобального потепления не может оказать решающего влияния на углеродный цикл.

Тем не менее необходимо было проверить прогнозными расчетами, насколько все-таки велико влияние механизмов адаптации лесных сообществ на их углеродные балансы. Это соответствует поставленной Парижским соглашением [5] двуединой проблеме выявления адаптационных возможностей природных экосистем в меняющемся климате, обеспечивающих выполнение ими адсорбционных функций.

Второе приближение осуществлено на примере умеренного термоаридного регионального тренда на срок до 2200 г. согласно модели E GISS с использованием модели вероятностей переходов между группами растительных формаций на период до 2100–2150 гг. по GISS-93 [13]. Обе модели дают в целом близкие значения сдвигов основных климатических характеристик, в том числе годового коэффициента увлажнения. По температурному тренду эти климатические прогнозы вписываются в предельный уровень глобального потепления в XXI в., который предусмотрен Парижским соглашением [5].

В табл. 4 представлены значения углеродных балансов лесных ассоциаций Волжского бассейна в их начальном (базовом) и конечном состояниях. Конечными являются средневзвешенные значения

Таблица 4

Удельный углеродный баланс восстановленных коренных (зонально-климатических) и реальных (коренных и производных) лесных ассоциаций Волжского бассейна в их начальном и конечном состоянии к прогнозному сроку 2200 г. (умеренное потепление) согласно модели E GISS

Группы ассоциаций (см. табл. 1)	Удельный углеродный баланс, т/га			
	восстановленные коренные ассоциации		реальные сообщества (коренные и производные)	
	начальное состояние	конечное состояние	начальное состояние	конечное состояние
1↑↑	42,45 [+]	19,01 [+]	30,78 [+]	10,98 [+]
2↑↑	–4,14 [–]	11,42 [+]	–6,48 [–]	7,16 [+]
3↑↑	14,82 [+]	3,74 [+]	16,45 [+]	4,00 [+]
4↑↑	–3,94 [–]	3,13 [+]	–7,58 [–]	0,75 [+]
5, 6↑↑	13,78 [+]	3,32 [+]	11,92 [+]	–3,09 [–]
7↑↑	21,14 [+]	9,74 [+]	10,21 [+]	4,21 [+]
8, 9↑↑	27,33 [+]	4,29 [+]	16,39 [+]	–0,14 [–]
11↑↑	–7,76 [–]	–1,01 [–]	–5,82 [–]	–1,83 [–]
10, 12↑↑	–14,46 [–]	1,84 [+]	–12,73 [–]	–1,74 [–]
13↑↑	–14,96 [–]	4,79 [+]	–14,96 [–]	4,79 [+]
Среднее	7,43 [+]	6,03 [+]	3,82 [+]	2,51 [+]

параметра $\Delta C(Fa)$, при расчетах которого в качестве весовых коэффициентов приняты вероятности стабилизации каждой группы ассоциаций и вероятности ее перехода во все другие группы. Углеродные балансы финального состояния лесных сообществ указывают на регуляцию ими углеродного цикла уже после их преобразований под действием данного термоаридного сигнала.

В целом процесс климатогенной трансформации лесов Волжского бассейна даже по умеренному термоаридному тренду (согласно модели E GISS) приводит к общему снижению эффективности положительной биотической регуляции углеродного цикла. Это касается как восстановленных коренных лесов, так и реального лесного покрова. Другими словами, глобальное потепление должно привести к неизбежной потере обеими биоклиматическими системами бассейна (потенциальной и реальной) экологических ресурсов: в первой они сократятся на 19 %, во второй — на 34 %. При этом сохраняется в целом двукратное преобладание потенциальных экологических ресурсов над реальными (если не считать положительных значений $\Delta C(Fa)$ у лесных болот, заболоченных лесов и неморальных пойм).

Климатогенная трансформация лесных сообществ приводит к общему выравниванию их первоначально достаточно контрастных (от плюсовых до минусовых) значений параметра $\Delta C(Fa)$: те ассоциации, которые имели стартовый отрицательный углеродный баланс, к концу прогнозного периода повышают его вплоть до положительных значений, а в сообществах с базовым высоким положительным балансом происходит его снижение (тоже до нулевых и даже отрицательных величин). Примерами первого случая служат средне- и южнотаежные темнохвойнолесные формации, а второго — подтаежные широколиственно-темнохвойные леса, средне- и южнотаежные сосняки всего Волжского бассейна (см. табл. 4). Снижение годового коэффициента увлажнения приводит к тому, что подтаежные бореальные сообщества при термоаридном тренде на 40–50 % переходят в функциональные состояния типичной и даже южной лесостепи [13], в результате чего их экологические ресурсы сокращаются в несколько раз.

С другой стороны, остепненные редкостойные дубняки и сосняки типичной лесостепи резко сокращают свои отрицательные углеродные балансы, что вызвано приобретением ими более чем на 40 % функциональных свойств лежащих севернее бореальных лесов — от среднетаежных до подтаежных. Широколиственные леса северной лесостепи в процессе своей климатогенной трансформации остаются источником выбросов CO_2 в атмосферу, правда, с семикратным ослаблением этого процесса.

Верификация прогнозных расчетов углеродного баланса. Для верификации были использованы материалы по депонированию/эмиссии углерода в лесах бореального пояса Центральной Канады [33], полученные с помощью повторного дистанционного зондирования и наземных измерений на протяжении 1990–2000 гг. (начального периода глобального потепления). Верхне-Средневожский бассейн и Центральная Канада оказались вполне сопоставимы по региональным климатическим прогнозам, а также по параметрам углеродного цикла и экологическим последствиям лесопользования в прогнозируемые периоды. Современные запасы углерода в бореальных лесах Волжского бассейна оцениваются в пределах 120–150 т/га, а в канадских лесах они несколько ниже — 80–110 т/га.

Средние изменения экосистемного стока углерода $\Delta NEP(\text{CO}_2)$ в канадских бореальных лесах за указанный 11-летний период составили около 0,08 т/(га·год) [33]. Для коренных и реальных лесов Волжского бассейна за этот же период по модели HadCM3 значения $\Delta NEP(\text{CO}_2)$ равны 0,117 и 0,085 т/(га·год) соответственно, что весьма близко к «канадскому контролю». Модель E GISS дала явно заниженные прогнозные результаты — 0,051 и 0,015 т/(га·год). Таким образом, для начальных десятилетий глобального потепления верификация наших прогнозных расчетов углеродного баланса показала положительные результаты только по экстремальной модели HadCM3. Это указывает на то, что современное глобальное потепление характеризуется такими высокими скоростями роста температуры, которые не отвечают упомянутой выше норме, заданной Парижским соглашением по изменению климата [5]. Данной норме могут соответствовать только экологические прогнозы по модели E GISS, однако их реализация предусматривает резкое снижение адсорбционного потенциала лесов.

Верификация прогнозных расчетов на отдаленную перспективу (после 2050 г.) по фактическим данным о депонировании/эмиссии углерода в канадских лесах за интервал первого 10-летия глобального потепления оказалась невозможной. Наши расчетные модели прогнозных изменений содержания углерода в различных пулах лесных биогеоценозов основаны на результатах его базовой гидротермодинамической ординации, которые имеют вид не только линейных связей, но и параболических (степенных) и экспоненциальных [15]. Это дает общий восходящий тренд параметра $\Delta C(Fa)$, не подтвержденный линейным трендом его изменений, который основан на эмпирических данных начального периода глобального потепления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенный опыт аналитического и картографического моделирования изменений углеродного баланса лесных формаций Волжского бассейна в системе их термоаридных преобразований по различным сценариям глобального потепления позволяет пролить свет на поставленную Парижским соглашением об изменении климата (2015 г.) проблему сопряженного анализа адсорбционной способности лесных биомов и их адаптации к меняющемуся климату.

Результаты численного эксперимента, основанного на эмпирических данных, подтверждают гипотезу о том, что климаксовый или приближающийся к нему лес служит наиболее активным регулятором окружающей среды, а валовая первичная продукция климаксового лесного сообщества (и соответствующие запасы углерода) определяет мощность биотической регуляции окружающей среды [9]. Эта регуляция направлена на возвращение среды в оптимальное для лесной экосистемы состояние и способствует сохранению относительной стабильности продукционного процесса в меняющемся климате, что обеспечивает и устойчивость механизмов самой регуляции углеродного цикла.

В целом проведенное исследование может рассматриваться как определенный шаг на пути превращения выдвинутой В.Г. Горшковым [6] и А.И. Уткиным [7] концептуальной идеи об экологических ресурсах лесов в полновесную научно-методическую концепцию. Оценивая результаты научного поиска, нельзя не согласиться с резонным замечанием А.З. Швиденко о том, что численные предсказания прогнозных моделей нужно рассматривать скорее как информацию к размышлению о вероятных будущих траекториях лесов, «принимая во внимание значительную неопределенность прогнозов» [34, с. 55]. Проведенный нами прогнозный ландшафтно-экологический анализ регуляции углеродного цикла лесным покровом Волжского бассейна носит принципиально вероятностный характер.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (18-05-00024-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сукачев В.Н. Избранные труды. Т. 1: Основы лесной типологии и биогеоценологии. — Л.: Наука, 1972. — 418 с.
2. Тарко А.М. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. Математическое моделирование. — М.: Физматлит, 2005. — 231 с.
3. Состояние и комплексный мониторинг природной среды и климата. Пределы изменений / Ред. Ю.А. Израэль. — М.: Наука, 2001. — 242 с.
4. Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. — Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2013. — 1535 p.
5. Paris Agreement. Conference of the Parties. Twenty-first session. Paris, 30 Nov. to 11 Dec. 2015 [Электронный ресурс]. — <http://unfccc.int/resource/docs/2015/-cop21/eng/l09r01.pdf> (дата обращения 20.08.2021).
6. Горшков В.Г. Физические и биологические основы устойчивости жизни. — М.: Изд-во Всерос. ин-та науч. и техн. информации РАН, 1995. — 470 с.
7. Уткин А.И. Углеродный цикл и лесоводство // Лесоведение. — 1995. — № 5. — С. 3–20.
8. Швиденко Ф.З., Щепашенко Д.Г., Кракснер Ф., Онучин А.А. Переход к устойчивому управлению лесами России: теоретико-методические предпосылки // Сиб. лесн. журн. — 2017. — № 6. — С. 3–25.
9. Лосев К.С. Экологические проблемы и перспективы устойчивого развития России в XXI веке. — М.: Космосинформ, 2001. — 399 с.
10. Schmidt G.A., Ruedy R., Hansen J.E., Aleinov I., Bell N., Bauer M., Bauer S., Cairns B., Canuto V., Cheng Ye, Del Genio A., Faluvegi G., Friend A.D., Hall T.M., Hu Yongyun, Kelley M. Present day atmospheric simulations using GISS ModelE: Comparison to *in situ*, satellite, and reanalysis data // Journ. of Climate. — 2006. — Vol. 19. — P. 153–192.
11. Le Quere C., Moriarty R., Andrew R.M. Global carbon budget 2014 // Earth System Science Data. — 2015. — Vol. 7, Is. 1. — P. 47–85.
12. Pope V.D., Gallani M.L., Rowntree P.R., Stratton R.A. The impact of new physical parametrizations in Hadley Centre climate model Had-CM3 // Climate Dynamics. — 2000. — Vol. 16. — P. 123–146.
13. Коломыц Э.Г. Региональная модель глобальных изменений природной среды. — М.: Наука, 2003. — 371 с.
14. Коломыц Э.Г. Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. — М.: Наука, 2008. — 427 с.

15. Пузаченко Ю.Г. Методологические основы географического прогноза и охраны среды. — М.: Изд-во Ун-та Рос. акад. образования, 1998. — 212 с.
16. Глазовская М.А. Геохимия природных и антропогенных ландшафтов СССР. — М.: Высш. шк., 1988. — 328 с.
17. Высоцкий Г.Н. Избранные труды. — М.: Сельхозгиз, 1960. — 435 с.
18. 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. 1–8.
19. Карта растительности европейской части СССР. М-б 1:2 500 000 / Ред. Т.И. Исаченко, Е.М. Лавренко. — М.: ГУГК, 1974. — 6 л.
20. Растительность европейской части СССР / Ред. С.А. Грибова, Т.И. Исаченко, Е.М. Лавренко. — Л.: Наука, 1980. — 429 с.
21. Растительность европейской части СССР и Кавказа. М-б 1:2 000 000 / Ред. Т.В. Котова. — М.: ГУГК, 1987. — 4 л.
22. Houghton J.T., Meira Filho L.G., Callander B.A. Climate Change 1995: The Science of Climatic Change. — Cambridge: The Cambridge University Press, 1996. — 572 p.
23. Сочава В.Б. Растительный покров на тематических картах. — Новосибирск: Наука, 1979. — 189 с.
24. Коломыц Э.Г. Бореальный экотон и географическая зональность: Атлас-монография. — М.: Наука, 2005. — 390 с.
25. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. — 2002. — Vol. 107, N 1–2. — P. 1–32.
26. Польшов Б.Б. Избранные труды. — М.: Изд-во АН СССР, 1956. — 751 с.
27. Замолотчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н., Честных О.В. Динамика пулов и потоков углерода на территории лесного фонда России // Экология. — 2005. — № 5. — С. 323–333.
28. Разнообразие и динамика лесных экосистем России / Ред. А.С. Исаев. — М.: Изд-во КМК, 2012. — Кн. 1. — 460 с.
29. Цельникер Ю.Л. Газообмен CO₂ в лесных биогеоценозах // Идеи биогеоценологии в лесоведении и лесоразведении. — М.: Наука, 2006. — С. 213–229.
30. Керженцев А.С. Функциональная экология. — М.: Наука, 2006. — 259 с.
31. Швиденко А.З., Шепашенко Д.Г., Нильссон С., Болуй Ю.И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). — М.: Изд-во Междунар. ин-та приклад. систем. анализа, 2008. — 885 с.
32. Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С. Структура растительности лесной зоны СССР: Систем. анализ. — М.: Наука, 1981. — 275 с.
33. Stinson G., Kurz W.A., Smyth C.E. An inventory-based of Canada's managed forest carbon dynamics, 1900 to 2008 // Global Change Biology. — 2011. — Vol. 17. — P. 2227–2244.
34. Швиденко А.З. Глобальные изменения и российская лесная таксация // Лесная таксация и лесостроительство. — 2012. — Т. 47, № 1. — С. 52–75.

Поступила в редакцию 08.04.2022

После доработки 21.10.2022

Принята к публикации 05.04.2023