

ЭМПИРИКО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПРИ ГЛОБАЛЬНОМ ПОТЕПЛЕНИИ

Г.С. Розенберг, Э.Г. Коломыц, Л.С. Шарая

Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти
genarozenberg@yandex.ru

В настоящем сообщении излагается опыт ландшафтно-экологического анализа феномена биотической регуляции углеродного цикла лесными экосистемами при ожидаемых глобальных изменениях климата. Подход предусматривает выявление геосистемного многообразия типов этой регуляции, обусловленное катенарной формой пространственной организации лесных биогеоценозов в различных зонально-региональных условиях (Базилевич и др., 1986). Это позволяет выделить те лесные сообщества, которые могут обеспечить устойчивость экосистем к изменениям климата в соответствии с принципом Ле Шателье (по: Горшков, 1995).

Методический подход и исходные материалы

Стратегия исследования состояла в установлении динамики основных углеродных пулов на основе прогнозируемых изменений биологического круговорота в лесных биогеоценозах при заданных сценариях климатического прогноза до 2100 г. (по глобальной модели HadCM3–A2). Используются материалы крупномасштабных ландшафтно-экологических съемок, проведенных на экспериментальных полигонах основного водосбора Волжского бассейна. Прогноз осуществлен с помощью: а) разработанных методов эмпирико-статистического моделирования топозкосистем, с использованием дискретных параметров биологического круговорота и б) гидротермической ординации этих параметров в пространстве локальных ландшафтных сопряжений для различных экорегионов (Розенберг, 1984; Розенберг, Коломыц, 2007; Коломыц, 2008). Основным каналом связи метаболических экосистемных параметров с климатическими сигналами служит летнее влагосодержание почвы, динамика которой легла в основу прогнозных моделей углеродного баланса экосистем.

В пределах каждого полигона выделялись шесть биогеоценологических групп, расположенных по вектору локального ландшафтного сопряжения (микрокатены), согласно классификации (Глазовская, 1964): от элювиальных (Э) и трансэлювиальных (ТЭ) типов местоположений (геотопов) через транзитные (Т) и трансаккумулятивные (ТА) типы до аккумулятивных (А) и супераккумулятивных (СА). Аналогичная парагенетическая система свойственна также типам мезоместоположений (ММП) регионального уровня (Полынов, 1956). Среди биогеоценозов выделялась их плакорная группа, занимающая элювиальные местоположения и служащая локальным представителем зональной биоклиматической нормы данного экорегиона (Высоцкий, 1960). Остальные группы могут имитировать условия других экорегионов, т.е. относятся к разряду экстразональных топозкосистем, согласно (Спрыгин, 1986).

Методы и результаты аналитического моделирования

Прогнозные расчеты дискретных метаболических параметров лесных экосистем выполнены по результатам гидротермической ординации этих параметров для различных зонально-региональных и локальных условиях Волжского бассейна. 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 обнаруживают наиболее тесные связи. Как показывают полученные уравнения (табл. 1), корреляции не всегда достаточно высоки, хотя и вполне значимы. При слабой связи.

Таблица 1

Расчетные модели, описывающие связи параметров биологического круговорота с температурой и влажностью почвы в вегетационный период в биогеоценозах экорегионов Среднего и Верхнего Поволжья

Вид модели (расчетная формула) ^{*)}	Региональные экосистемы	Параметры (см. в тексте)	Коэффициенты			Статистические характеристики ^{**)}		
			b_0	b_1	b_2	R	P	S_y
$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$	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
$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$	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	
$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_1^2$	Щелоковский хутор	<i>WD</i>	642,1	-114,7	5,142	0,936	0	2,21
$y = b_0 + b_1x_2 + b_2x_2^2$	Жигули	<i>ML</i>	44,08	-0,3611	0,00091	0,699	0	17,75
	Щелоковский хутор	<i>BS</i>	-34,93	0,9472	0,00403	0,769	0	90,49
		<i>HU</i>	12,5	0,1712	0	0,649	0	9,31
	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	
Приокско-Террасный заповедник	<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	
$y = \exp(b_0 + b_1/x_1)$	Жигули	<i>BS</i>	3,706	15,42		0,611	0	39,3
		<i>BR</i>	1,768	26,26		0,614	0	12,25
	Зеленый город	<i>ML</i>	0,0845	35,08		0,506	0	16,0
<i>WD</i>		-4,389	64,63		0,642	0	7,0	
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.

Жирным шрифтом выделены коэффициенты при значимых аргументах в уравнениях множественной регрессии.

последнюю можно интерпретировать лишь как некоторую общую тенденцию изменений данного функционального параметра под влиянием того или иного геофизического тренда

Оценки изменений содержания углерода в различных биотических компонентах и в целом по лесным биогеоценозам проведены по известному лесоводственному методу, основанному на динамике живых и мертвых фитомасс (Цельникер, 2006). Изменение (по сравнению с базовым периодом – до 1985 г.) массы потока углерода $\Delta C(Fa)$ над растительным покровом, т.е. углеродный баланс почвенно-растительного комплекса на тот или иной прогнозный срок, рассчитывали по формуле

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

где BS и BV – живая скелетная и зеленая массы; BR – масса корней; ML и HU – массы лесной подстилки и гумуса; WD – масса валежа и сухостоя; ΔC – изменение массы углерода. Параметр ΔFa определялся для каждой группы биогеоценозов данного экорегиона. По его значению оценивалось, будет ли данное лесное сообщество преимущественно поглощать CO_2 из атмосферы в результате сдвигов в биологическом круговороте или, наоборот, станет источником его дополнительных выбросов.

Прогнозные расчеты показали, что при развитии термоаридного климатического тренда в бореальных и суббореальных лесах наибольшие по абсолютному значению изменения должен испытать автотрофный биогенез, дающий BS , BV и BR фитомассы. Приоритетный вклад в изменения углеродного баланса будет вносить динамика прироста древесины. К 2100 г. в своих экстремальных значениях $\Delta C(BS)$ составит от (-)37-40 т/га в плакорных и трансаккумулятивных липняках Жигулевского массива до (+)95-100 т/га в трансэлювиальных хвойно-широколиственных лесах Нижегородского Предволжья. Величины же экстремальных $\Delta C(Fa)$ будут равны, соответственно, (-)78-83 и (+)115-120 т/га. Таков возможный размах изменений потока углерода, вызванных неоднозначной реакцией бореальных и неморальных лесов (рис. 1).

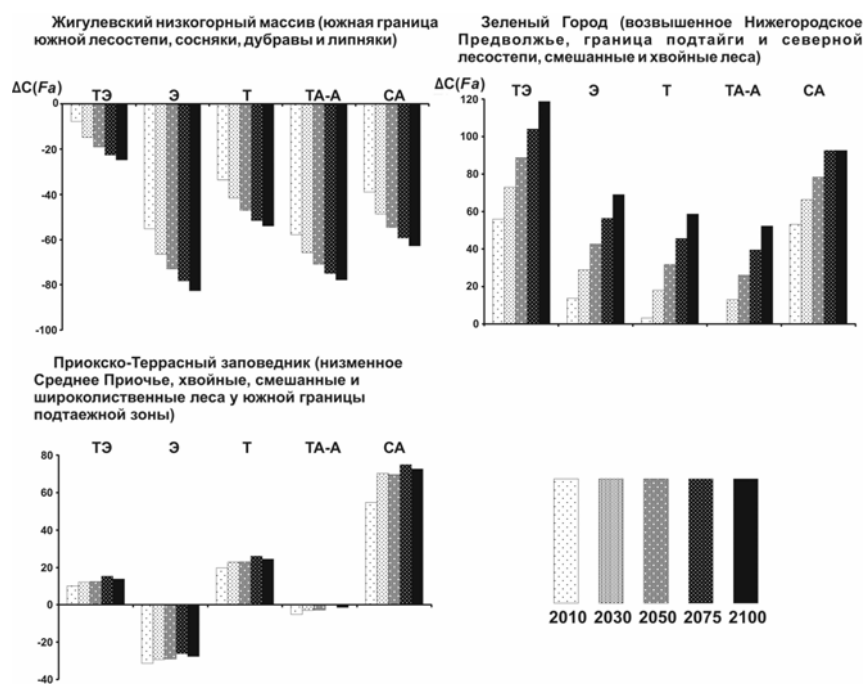


Рис. 1. Прогнозируемая динамика содержания углерода в лесных биогеоценозах различных экорегионов Среднего и Верхнего Поволжья, согласно сценариям глобальной модели HadCM3. ТЭ, Э, ... – типы ММП (см. в тексте)

До конца XXI в. содержание углерода, законсервированного в фитомассе лесов Среднего и Верхнего Поволжья, может измениться на (\pm)20-40% от базовой величины,

что указывает на их существенную роль в биотической регуляции углеродного цикла. Наиболее сильно сократится продуктивность маргинальных лесных сообществ на зональных экотонах леса и степи, что вместе с усилением разложения древесной мортмассы и гумуса вызовет рост содержания CO_2 в атмосфере. Основную положительную регуляцию углеродного обмена наземных экосистем с атмосферой, направленную на снижение ее парникового эффекта, будут выполнять широколиственно-еловые и темнохвойные леса возвышенных равнин в неморальнолесной подзоне и в южной полосе подтаежной зоны. Второстепенную роль сыграют переувлажненные сосняки низко-зандровых полесий. Это, пожалуй, единственная группа формаций бореальных лесов, которая окажет существенную поддержку устойчивости континентальной биосферы в условиях глобального потепления.

Экологический прогноз в картографическом выражении

В картографическом блоке прогнозного анализа были использованы новые методы геоморфометрии (Sharq et al., 2002). Крупномасштабное картографирование (м-б 1:50–100 000) основывалось на предварительно выявленных статистически значимых связях функциональных характеристик локальных экосистем с морфометрией рельефа. Морфометрические параметры рассчитывались из данных НАСА (проект SRTM90) о высотах земной поверхности в виде матриц с размером ячейки 50 м. Так, по Приокско-Террасному заповеднику (рис. 2) были получены следующие уравнения множественной регрессии (с коэффициентами корреляции Спирмана r_s и уровнями значимости P):

- а) для суммарных запасов углерода базового периода –

$$C_{\text{баз}} = 243,69 - 92,82 \cdot MGA - 41,62 \cdot kh + 22,31 \cdot Z; \quad r_s = 0,48, \quad P < 0,01;$$
 б) для изменения суммарных запасов углерода к 2050 г. –

$$\Delta C(Fa)_{2050} = -5,25 + 10,18 \cdot MCA + 8,07 \cdot Q - 3,21 \cdot kA; \quad r_s = 0,50, \quad P < 10^{-3}.$$

Здесь Z – абсолютная высота; MCA – площадь водосбора; Q – освещенность склонов при положении солнца в южном азимуте; kh – горизонтальная кривизна, kA – кривизна, различающая зоны сноса, транзита и аккумуляции потоков углерода.

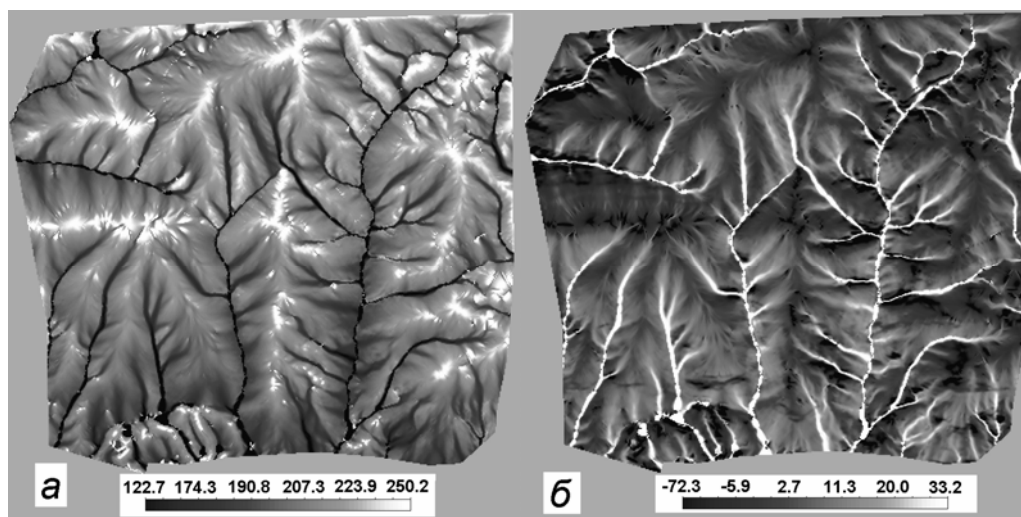


Рис. 2. Приокско-Террасный биосферный заповедник. Карты содержания суммарного углерода (т/га) для базового периода (а) и его изменений (т/га) к 2050 г. (б)

При построении региональных карт были использованы спутниковые данные НАСА о рельефе – матрицы высот земной поверхности, полученные в ходе выполнения проекта SRTM30 «США-Италия-Германия». В качестве модельной территории регионального уровня был взят Окский бассейн. Матрица по этому бассейну была преобра-

зована в равнопромежуточную проекцию Каврайского для Европейской России с шагом 900 м. Предварительно проводился статистический анализ параметра $\Delta C(Fa)$ на прогнозные сроки для групп растительных формаций и их сочетаний с помощью программы «Аналитическая ГИС Эко» (Шарый, 2001).

Переход от локального уровня прогнозирования на региональный, с построением карт в М 1: 2 500 000, проведен с помощью разработанного нами *метода индукционно-иерархической экстраполяции*. Рассматривались региональные системы локальной зональности, слагающиеся из векторных рядов плакорных и экстразональных биогеоценозов. Каждый тип/подтип растительной формации, выделенный на мелкомасштабной геоботанической карте, соотносился с определенной группой биогеоценозов из их плакорно-экстразонального ряда, который характеризует региональную пространственно упорядоченную (микрокатенарную) систему локальной зональности. Затем каждый ареал данной формации, представленный как поливекторное множество мезокатен, дробился на мезоместоположения – звенья цепочки региональных ландшафтных сопряжений ($\Theta \rightarrow T\Theta \rightarrow T \rightarrow TA, A$), с разделением $T\Theta$ и T местоположений на две соллярно-экспозиционные градации: солнцепечную и теневую (+ нейтральную). Для этого использовались новые методы геоморфометрической статистики. Создавалась промежуточная карта мезомасштабных местоположений на всю лесопокрытую площадь региона.

Таблица 2

Уравнения связей изменения суммарного содержания углерода в лесных формациях Окского бассейна к 2050 г. (ΔC_{2050}) с наиболее значимыми факторами среды

Группы растительных формаций	Уравнения регрессии ^{*)}
а) Еловые и широколиственно-еловые леса	$\Delta C_{2050} = 76,7 \cdot Z + 46,7 \cdot T + 24,0 \cdot F - 63,8$
б) Сосновые и широколиственно-сосновые леса	$\Delta C_{2050} = -24,0 \cdot Z + 21,0 \cdot MCA - 7,1 \cdot F + 12,1$
в) Широколиственные леса	$\Delta C_{2050} = -76,2 \cdot T + 42,9 \cdot MCA + 12,1 \cdot GA + 15,1$
г) Вторичные леса на месте сосновых и широколиственно-сосновых лесов	$\Delta C_{2050} = 83,1 \cdot k_{\max} + 76,6 \cdot MCA + 9,7 \cdot T - 61,6$
д) Вторичные леса на месте еловых, сосновых и широколиственных лесов (все вторичные леса бассейна)	$\Delta C_{2050} = 37,5 \cdot MCA - 18,4 \cdot GA - 10,9 \cdot T + 12,7$
е) Коренные и вторичные леса бассейна (все леса бассейна, в их современных ареалах)	$\Delta C_{2050} = 28,8 \cdot MCA + 23,9 \cdot k_{\max} - 7,2 \cdot T - 7,8$

^{*)} k_{\max} – максимальная кривизна, определяющая гребневые формы рельефа; T – средняя температура июля; GA – крутизна склонов (остальные обозначения см. выше)

Принимая далее, согласно концепции ландшафтных сопряжений Б.Б. Польшова (1956), мезокатену в качестве гомоморфного образа микрокатены, разносили имеющиеся биогеоценозы всех выделенных групп из каждого полигона по мезоместоположениям соответствующего ему геоботанического ареала. Полученная таким образом региональная фитокатенарная мозаика насыщалась далее базовыми или прогнозными метаболическими параметрами биогеоценозов, взятых уже в качестве локальных представителей тех или иных зонально-региональных типов/подтипов географической среды. По эмпирическим уравнениям связи (табл. 2) была построена карта параметра $\Delta C(Fa)$ для территории Окского бассейна на прогнозный срок 2050 г. (рис. 3).

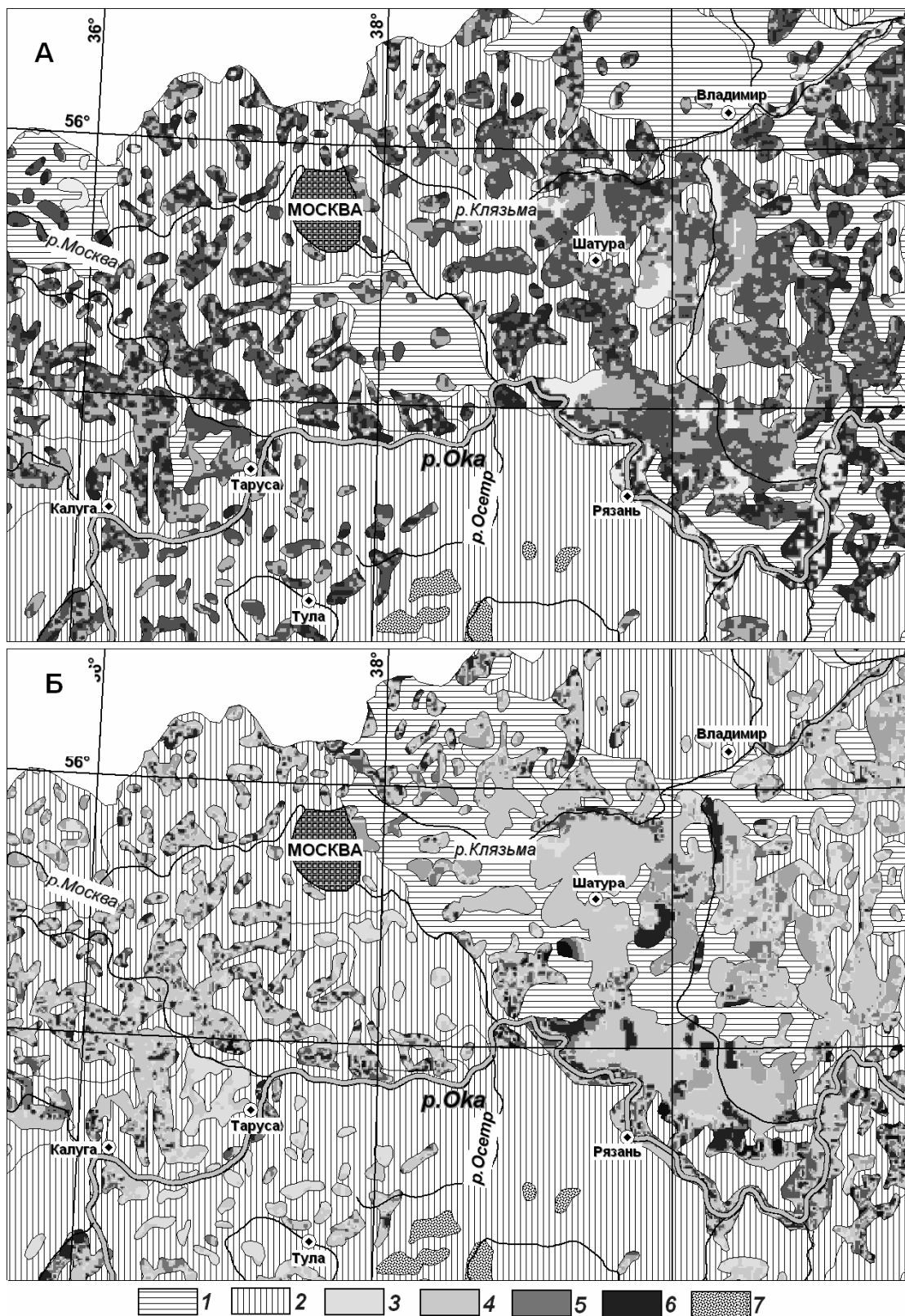


Рис. 3. Фрагменты карт суммарного содержания углерода и его прогнозируемых изменений на территории Окского бассейна:

А – распределение содержания углерода на конец базового периода (1985 г.), т/га: 1 – 10,2-15,2; 2 – 15,2-19,3; 3 – 43-130; 4 – 130-160; 5 – 160-200; 6 – 200-423. Б – изменение (т/га) суммарных запасов углерода по отношению к базовому периоду. Фрагментарные лесные массивы на территории сельскохозяйственных полей: 1 – (-)1,3-0; 2 – 0-5,5. Лесопокрываемые территории: 3 – (-)136-(-)25; 4 – (-)25-0; 5 – 0-25; 6 – 25-115; 7 – острова распаханых степей

Современный лесной покров Окского бассейна, составляющий немногим более 1% площади лесов России, должен осуществлять при глобальном потеплении в целом

позитивную регуляцию углеродного цикла (табл. 3). Однако сама ее величина не будет сколько-нибудь значительной ввиду сравнительно малых изменений содержания углерода в большинстве пулов, в том числе в скелетной фитомассе. Прогнозная карта вскрывает также резко выраженную контрастность и мелкоконтурную пятнистость положительных и отрицательных величин углеродного баланса ($\Delta C(Fa)$ меняется от $(-)$ 115 до $(+)$ 65 т/га).

В темнохвойных лесах бассейна депозит углерода почти на 70% превысит его эмиссию, однако из-за незначительной площади этих формаций их общий вклад в изменение углеродного баланса региона не превысит 6%. Сосновые и широколиственно-сосновые формации будут так же положительно влиять на углеродный цикл, хотя и гораздо слабее, чем темнохвойные леса. Однако благодаря своим наибольшим площадям они внесут существенный вклад в депонирование углерода – к 2050 г. до 25% от всей его массы, которая будет дополнительно поступать в леса региона. Широколиственные леса окажут преимущественно отрицательное влияние на углеродный цикл, но это влияние будет незначительным ввиду весьма ограниченного распространения дубрав на территории Окского бассейна.

Таблица 3

Изменение суммарных запасов углерода (в млн. т) в растительных формациях Окского бассейна к 2050 г. согласно прогнозно-климатической модели HadCM3

Группы лесных формаций (площадь, км ²)	Базовое содержание углерода	Изменение содержания углерода			
		депозит	эмиссия	общий итог	
				млн. т	%
Еловые и широколиственно-еловые (2034)	37,14	3,02	- 1,8	1,22	3,3
Сосновые и широколиственно-сосновые (26 230)	481,76	45,77	- 23,17	22,60	4,7
Широколиственные (4770)	84,68	6,76	- 4,96	1,80	2,1
Вторичные на месте еловых (17 770)	293,26	40,77	- 14,79	25,98	8,9
Вторичные на месте сосновых (16 670)	318,7	40,97	- 51,0	- 1,03	- 3,2
Вторичные на месте широколиственных (16 911)	76,83	0,42	- 1,18	- 0,76	- 1,0
Болотные (2343)	35,18	1,01	- 0,17	0,84	2,4
Пойменные (9219)	149,28	6,62	- 4,45	2,17	1,5
Все леса бассейна (83 947)	476,83	45,34	101,52	3,82	3,0

Наибольшую положительную регуляцию углеродного цикла будут осуществлять березняки и осинники, замещающих еловые и широколиственно-еловые леса (см. табл. 3). Постоянное наличие здесь начальных стадий восстановительных сукцессий не способствует избыточному накоплению массы углерода в растущей древесине. В этом, по-видимому, и состоит ведущая роль бореальных лесов темнохвойнотаежного и подтаежного типов в положительной регуляции цикла CO₂.

Виртуальное прогнозно-экологическое картографирование

Выявленные статистические связи углеродного баланса различных лесных формаций Окского бассейна с наиболее значимыми предикторами позволили построить *регрессионные карты* ΔC_{2050} на срок 2050 г. (рис. 4). Сами карты носят условный характер. Каждая из них описывает виртуальную реальность – картину изменений содержания углерода в данной группе формаций при допущении, что она покрывает всю площадь бассейна. Такие карты позволяют более четко представить парциальный вклад лесных сообществ в биотическую регуляцию углеродного цикла на территориях с раз-

личными природными условиями. Это особенно важно для стратегии лесоразведения в ныне обезлесенных районах при ожидаемых изменениях климата. Очевидно, при подборе ассортимента лесопосадочных пород предпочтение следует отдавать тем из них, которые обеспечивают положительный углеродный баланс.

Для большинства лесных формаций (см. табл. 2, б–е) депозит углерода возрастает с увеличением площади водосбора МСА, т.е. с переходом от Э и ТЭ типов местоположений к ТА и А типам. Особенно это характерно для сосновых и широколиственно-сосновых лесов Окско-Цнинской низменной равнины, где аккумуляция углерода достигает 15 т/га. В еловых и широколиственно-еловых формациях депонирование углерода усиливается с ростом абсолютной высоты, между тем как в речных долинах ельники дают его слабо выраженную эмиссию. При повышении освещенности склонов F , возрастают депозит углерода в еловых лесах и его эмиссия – в лесах сосновых и широколиственно-сосновых.

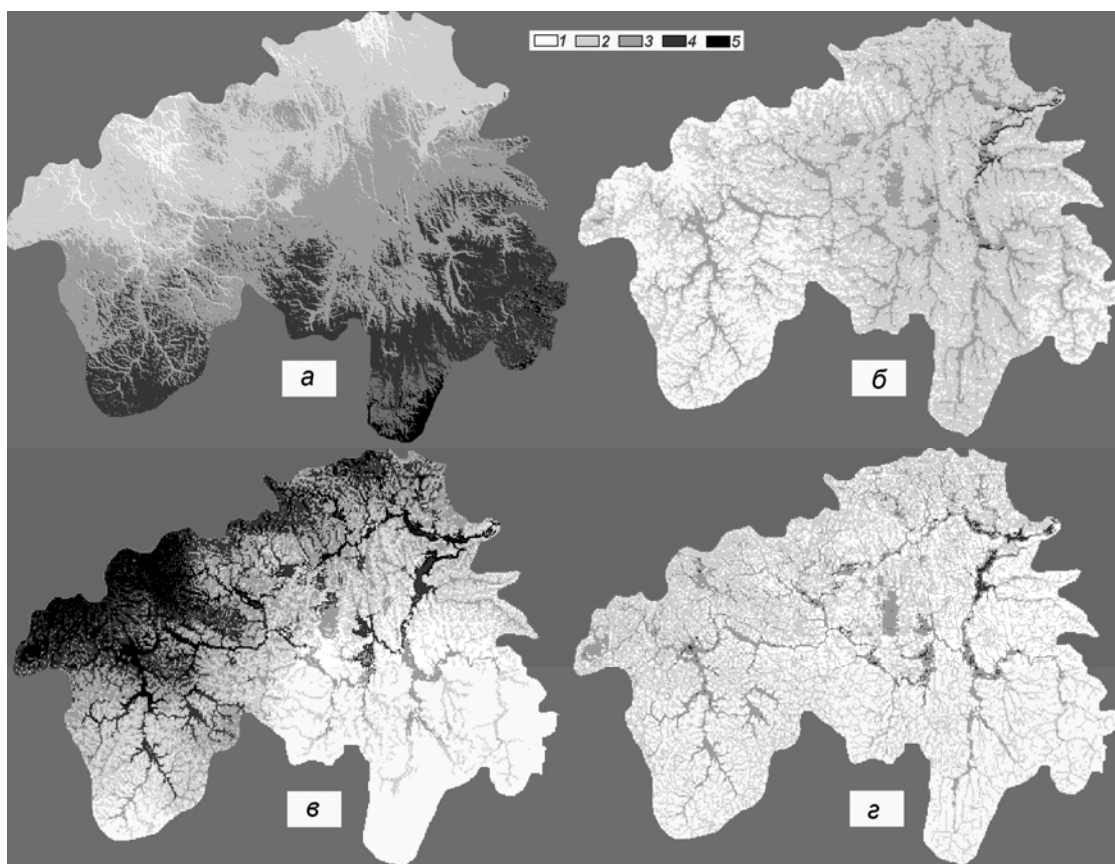


Рис. 4. Карты потенциала изменения суммарного содержания углерода в растительных формациях бассейна р. Оки к 2050 г. по модели HadCM3.

Допущение – территория бассейна р. Оки полностью покрыта лесами: *а* – еловыми и широколиственно-еловыми, *б* – сосновыми и широколиственно-сосновыми, *в* – широколиственными, *г* – вторичными на месте еловых, сосновых и широколиственных. Изменения суммарного содержания углерода, т/га: 1 – -136-0; 2 – 0-15; 3 – 15-30; 4 – 30-45; 5 – 45-115

Крутизна склонов GA и максимальная кривизна k_{\max} , определяющая «гребневые формы» в рельефе, оказывают положительное воздействие на аккумуляцию углерода. Исключение составляют березняки и осинники, для которых связь обратная. В результате, эти формации дают наибольшие для всего бассейна выбросы CO_2 в атмосферу – до 100 т/га и более (см. рис. 4, *г*). Среднеиюльская температура воздуха влияет на углеродный баланс лесов по-разному. В относительно сложных по генезису группах лесных формаций (см. табл. 2, *д, е*) повышение температуры вызывает тенденцию к преобла-

дающей эмиссии углерода, а в сравнительно простых группах (см. табл. 2, а, з) – к его депонированию.

Рассмотренные факторы могут действовать на углеродный баланс разнонаправленно, поэтому необходим результирующий учет их интерференции. В целом можно сказать, что на местном уровне более высокая эмиссия CO₂, т.е. отрицательная регуляция углеродного цикла, свойственна приводораздельным типам мезомасштабных местоположений, особенно занятых хвойнолесными сообществами. Зональные контрасты параметра ΔС наиболее резко выражены для темнохвойнолесных, смешанных и широколиственных формаций и в гораздо меньшей степени для березняков и осинников (см. рис. 4, а, в). В северо-западной полосе Окского бассейна, относящейся к подтаежной зоне, дубравы и липняки будут активно поглощать углерод из атмосферы (до 50-100 т/га), ослабляя тем самым ее парниковый эффект. В юго-восточных же районах типичной и южной лесостепи широколиственные леса будут осуществлять, наоборот, отрицательную биотическую регуляцию углеродного цикла.

ЛИТЕРАТУРА

Базилевич Н.И., Гребенщиков О.С., Тишков А.А. Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. М.: Наука, 1986. 297 с.

Высоцкий Г.Н. Избранные труды. М.: Сельхозгиз, 1960. 435 с.

Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1964. 230 с.

Горшков В.Г. Физические и биологические основы устойчивости жизни. М.: ВИНТИ, 1995. 470 с.

Коломыц Э.Г. Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. М.: Наука. 2008. 427 с.

Полынов Б.Б. Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 751 с.

Розенберг Г.С. Модели в фитоценологии. М.: Наука, 1984. 265 с.

Розенберг Г.С., Коломыц Э.Г. Прогноз изменений биологического круговорота и углеродного баланса в лесных экосистемах при глобальном потеплении // Успехи соврем. биол. 2007. Т. 127, № 3. С. 531-547.

Спрыгин И.И. Материалы к познанию растительности Среднего Поволжья // Научное наследие. Т. 11. М.: Наука, 1986. 512 с.

Цельникер Ю.Л. Газообмен CO₂ в лесных биогеоценозах // Идеи биогеоценологии в лесоведении и лесоразведении. М.: Наука, 2006. С. 213-229.

Шарый П.А. Аналитическая ГИС Эко // Сайт: <http://www.giseco.info>. 2001.

Shary P.A., Sharaya L.S., Mitsov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. 2002. V. 107, № 1-2. P. 1-32.