

УДК 581.52/581.524.3/574.9

ЭМПИРИЧЕСКАЯ ИМИТАЦИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ И СТОКА УГЛЕРОДА В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЯХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

© 2012 Э.Г. Коломыйц, Н.А. Сулова

Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти

Поступила 21.06.2012

Изложен опыт изучения функционального отклика лесных экосистем одного из экорегионов Среднего Поволжья на межгодовые колебания метеорологических условий, которые могут имитировать многолетние (внутривековые и вековые) изменения климата. Установлено, что гумидный сигнал оказывает более эффективное и разнообразное воздействие на функциональное состояние лесных экосистем, нежели сигнал термодридный. Соответственно в первом случае возникает и более ярко выраженная и пространственно более контрастная картина изменений стока углерода в лесную фитобиоту. Еще более яркую и контрастную картину дает экстремальная имитационная модель.

Ключевые слова: лесная экосистема, первичная продуктивность, метеорологические условия, эмпирическая имитация климатического сигнала, изменение стока углерода.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальное потепление, вызванное антропогенным изменением химического состава атмосферы, можно считать, по-видимому, уже начавшимся. В конце 50-х годов XX в. концентрация CO₂ в атмосфере равнялась 315 ppm, а к 2000 г. она достигла 368 ppm [6]. За этот же период происходил рост коэффициента корреляции между реальной обстановкой и модельными аномалиями, что подтвердило гипотезу о влиянии антропогенных факторов на современную планетарную климатическую обстановку [8].

Согласно геофизическим прогнозам, к концу нашего столетия нижний предел концентрации диоксида углерода в атмосфере может достигнуть 540 ppmv, что составит двукратное ее превышение по сравнению с доиндустриальным периодом. Соответственно предполагается повышение средней глобальной температуры поверхности Земли в пределах 1,4–5,8° за период с 1990 г. по 2100 г., что в 2–10 раз больше величины потепления, произошедшем в XX в. [6].

Результаты анализа климатических временных рядов показывают, что среднегодовая величина роста температуры на континентах в XX столетии находится в пределах 0,7–1,6° [9, 16]. Уже к 1980 году на 55–60° с.ш. в Северном полушарии изменение средней температуры июля составило 0,4–0,5° по отношению к норме за период 1891–1979 гг. [10]. За последние 100 лет на территории Европейской части России, в том числе Волжского бассейна, средняя годовая температура воздуха выросла в среднем на 0,9–1,1° [18, 20].

В то же время годовое количество осадков на территории Волжского бассейна, как и в целом на Европейской части России, за последние 100 лет почти не изменилось; была выражена лишь весьма слабая и статистически недостоверная тенденция к

увеличению [18, 20]. Впрочем, в последней трети XX столетия заметный рост осадков все же имел место. Таков был, например, 24-летний период 1967–1990 гг., когда на Европейской территории России годовое количество осадков выросло на 30% [5].

В свете изложенного все большую актуальность приобретает проблема прогнозирования наиболее вероятных, в том числе негативных, экологических последствий предстоящих глобальных изменений климата. Глобальные биосферные процессы зарождаются в конкретных регионах, поэтому региональный подход к изучению этих процессов, как показано на примере Волжского бассейна [12–14], становится наиболее эффективным путем выявления кризисных экологических ситуаций и поиска путей их ликвидации. Особое внимание привлекает предстоящая судьба бореальных и широколиственных лесов, находящихся в южной полосе лесной зоны, где лесные экосистемы уже в настоящее время находятся в состояниях, близких к критическим, и должны в первую очередь реагировать на неблагоприятные климатические изменения.

Разработанная единая региональная система ретроспективных (палеогеографических) и теоретических (расчетных) прогнозных моделей природных экосистем [12] описывает состояния их почвенно-фитоценологического ядра в прошлом, настоящем и будущем (до конца XXI столетия). По картографическим и аналитическим моделям установлены закономерности структурного и функционального отклика зонально-региональных геосистем на глобальные климатические сигналы, с получением такой развертки ландшафтно-геофизических связей, которая обеспечивает достаточно эффективное использование метода актуализма в численном и ретроспективном экологическом прогнозировании. Однако верификация расчетных прогнозных и палеогеографических моделей остается весьма проблематичной задачей и до сих пор не найдены пути ее решения. В настоящем сообщении изложены результаты изучения функ-

Коломыйц Эрланд Георгиевич, докт. биол. наук, проф., e_gk2000@mail.ru; Сулова Наталья Алексеевна, науч. сотр.

ционального отклика лесных экосистем одного из экорегионов Среднего Поволжья на межгодовые колебания метеорологических условий, которые могут в определенной степени имитировать многолетние (внутривековые и вековые) изменения климата. Погодичные метеорологические аномалии предоставляют нам своего рода окошки в будущие климатические ситуации, когда та или иная аномалия может стать многолетней нормой.

ПРЕДПОСЫЛКИ НАУЧНОГО ПОИСКА И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эмпирически было установлено, что основной пропускной канал связей региональных и локальных экосистем с фоновой климатической системой проходит через летнее влагосодержание почвы, которое, с одной стороны, служит достаточно надежным геофизическим индикатором состояния экосистем, а с другой, — является наиболее сильным экологическим фактором, который определяет их территориальную организацию [12, 14]. Для лесных экосистем Волжского найдены связи июльских запасов продуктивной влаги в слоях почвы 0–20 см ($W-20$), 0–50 см ($W-50$) и 0–100 см ($W-100$) с годовым коэффициентом увлажнения Высоцкого-Иванова — $K_{увл}$, при достаточно высоких коэффициентах корреляции (R) и детерминации (R^2). Эти связи имеют вид:

$$W-20) = \exp [2,281 + 0,8068 K_{увл}]; \quad R = 0,83; R^2 = 0,69; \quad (1)$$

$$(W-50) = \exp [2,622 + 1,071 K_{увл}]; \quad R = 0,89; R^2 = 0,79; \quad (2)$$

$$(W-100) = \exp [3,225 + 1,134 K_{увл}]; \quad R = 0,88; R^2 = 0,77. \quad (3)$$

В свою очередь, параметр $K_{увл}$ определяется почти исключительно среднеиюльской температурой ($t_{июль}$), в то время как влияние температуры января ($t_{январь}$) незначимо:

$$K_{увл} = 12,09 - 0,9095 t_{июль} + 0,01744 t_{июль}^2; \quad R = 0,94; R^2 = 0,88. \quad (4)$$

Итак, главный фактор климатогенной трансформации природных комплексов — термические условия вегетационного периода. С другой стороны, распределение лесных экосистем достаточно тесно связано с летним влагосодержанием почвы. Так, неморальнолесные биогеоценозы Среднего Поволжья имеют информационные коэффициенты сопряженности, по [19], с параметрами ($W-20$), ($W-50$) и ($W-100$) соответственно 0,154–0,173, 0,128–0,162 и 0,139–0,200. Это существенно превышает критический порог значимости связей — 0,070 [14, 15].

Следует отметить, что временной лаг функционального экологического прогноза достаточно мал. Обусловленные климатическими изменениями сдвиги в темпах продуцирования фитомассы, занимают в таежной зоне первые несколько лет, а в широколиственных лесах — не более одного года [12]. Столь же быстро меняются и скорости детритогенеза, хотя общая продолжительность пребыва-

ния углерода в лесной подстилке, мертвой надземной скелетной фитомассе (дебресе) и лабильном гумусе почвы занимает до нескольких десятков лет [7, 21].

Объектом исследования послужила северная часть территории Окско-Мокшинского полесья, по низменному правобережью нижней Оки (юго-запад Нижегородской обл., Выксунский район). Экорегион находится у северных пределов подзоны широколиственных лесов, что подтверждается его основными климатическими характеристиками (табл. 1, см. также [14]). Однако почвенно-растительный покров здесь нетипичен для неморальнолесной подзоны. Литолого-гидрологические факторы: наличие песчаных водноледниковых и древнеаллювиальных отложений и слабый в целом дренаж, — обуславливают преобладание сосноволесных биогеоценозов (табл. 2). Здесь отчетливо выраженное явление взаимозаменяемости климатических и литогенных экологических факторов: в северных суббореальных климатических условиях песчаный субстрат имитирует бореальные условия — подтайги или даже южной тайги.

Вместе с тем, сосновые леса Нижнеокского полесья имеют более южный характер по сравнению с сосняками подтаежной зоны. Это находит отражение, прежде всего, во флористическом составе напочвенного покрова, для которого характерен значительный процент южно-боровых и лугово-степных видов, а во вторых, — в повышенной продуктивности лесных сообществ, особенно на влажных местообитаниях. Следует отметить также, что в окско-мешинских лесах происходит определенное смещение типов сосновых лесов в сторону повышенной гидроморфности почв по сравнению с их аналогами из более северных районов.

Указанные эколого-фитоценотические особенности лесов окско-мокшинского низменного зандра позволяют рассматривать данную территорию в качестве *зонально-регионального биогеографического экотона*, на котором происходит существенное взаимное перекрытие климатических ниш бореальных и неморальных лесных сообществ. Триггерный, по [1], характер этой переходной полосы обуславливает состояние неустойчивого равновесия слагающих ее биогеоценологических систем, которые должны чутко реагировать на климатические флуктуации — в первую очередь своими функциональными параметрами, которые так или иначе замыкаются на первичной биопродуктивности.

Задача состояла в том, чтобы на примере данной модельной территории выявить истоки и механизмы функциональных сдвигов лесных биогеоценозов в различные годы, которые достаточно четко различаются по своему гидрометеорологическому режиму. Такими оказались 1989 и 1990 г.г., когда на экспериментальном полигоне Выкса автором с сотрудниками в первой декаде июня была проведена крупномасштабная ландшафтно-экологическая съемка [14, 15].

Таблица 1. Сопоставление климатических параметров и запасов продуктивной влаги в почве открытого участка (луг) по ст. Выкса в периоды проведения ландшафтно-экологических съемок на экспериментальном полигоне с многолетними нормами этих характеристик (указаны курсивом в скобках)

Период метеонаблюдений	Время проведения съемок	Средняя температура		Годовая сумма осадков	Коэффициент увлажнения	Запасы влаги (в мм) в период съемок в слоях почвы, см			Поправочный коэффициент
		января	июля			0–20	0–50	0–100	
1988 – –1989	01.06– 11.06.1989	–4.6 (–11.5)	20.6 (18.9)	624 * (590)	0.89 * (1.15)	22 (24)	40 (44)	76 (90)	1.18
1989 – –1990	01.06– 10.06.1990	–8.1 (–11.5)	18.8 (18.9)	894 * (590)	1.62 * (1.15)	30 (24)	63 (44)	125 (90)	0.74

*) Параметры, рассчитанные за гидрологический год (октябрь–сентябрь)

Таблица 2. Группы биогеоценозов (ландшафтных фаций) региональной экосистемы Выкса и их условные обозначения

Краткая характеристика	Символ
1. Ксероморфные сосняки, а также елово-сосновые леса, вересково- и ракитниково-лишайниковые, вейниковые и бруснично-зеленомошные на вершинах песчаных дюн и гряд (транзэлювиальные и элювиальные), с рыхлопесчаными дерново-подзолистыми слабо- и средне-дерновыми, иногда иллювиально-железистыми почвами	
2. Мезо-ксероморфные сосняки и елово-сосновые леса, майниково-брусничные на супесчано-песчаных склонах и полого-волнистых водоразделах (транзитные реже элювиальные и транзэлювиальные), с дерново-подзолистыми мелко- и среднеподзолистыми слабо-дерновыми супесчаными и связнопесчаными почвами, иногда подстилаемыми суглинком	
3. Мезоморфные и гидро-мезоморфные ельники и елово-сосновые леса, кисличные и кислично-моховые на полого-волнистых и водоразделах их склонах (элювиальные и транзитные), с дерново-подзолистыми средне- и глубоко-дерновыми супесчаными и легкосуглинистыми почвами, с близким залеганием суглинка	
4. Гидро-мезоморфные и мезо-гидроморфные сосново-еловые (с липой) и дубово-сосново-еловые леса, неморально-травяные (волосистоосоковые и снытьевые), на хорошо дренируемых склонах и их подножьях (транзитные и трансаккумулятивные), с дерново-подзолистыми средне- и глубокоподзолистыми, слабо-, средне- и глубоко-дерновыми супесчаными и легкосуглинистыми почвами на водноледниковых песках, подстилаемых суглинком	
5. Мезо-гидроморфные и гидроморфные сосняки и сосново-еловые леса, черничные и долгомошно-черничные, на полого-вогнутых склонах и их подножьях (аккумулятивные, трансаккумулятивные и реже транзитные), с дерново-подзолистыми типично-подзолистыми глубоко оподзоленными поверхностно оглеенными супесчаными почвами	
6. Гидроморфные сосняки и ельники, сфагновые и чернично-долгомошные, в полузамкнутых понижениях дюнно-грядового рельефа и междуречных западинах (элювиально-аккумулятивные и супераквальные), с торфяно-подзолистыми, поверхностно оглеенными супесчаными почвами	

Первый (1989) год отличался общей положительной термической аномалией и относительной сухостью (см. табл. 1). Исключительно теплая предшествующая зима сопровождалась глубокими оттепелями, с частичным таянием снега, что существенно уменьшило весеннюю влагозарядку почвы. Вегетационный период оказался также аномально теплым, хотя и не в такой степени. Годовая сумма осадков была близка к многолетней норме, тем не менее коэффициент увлажнения понизился на 23% от своей нормы. Территория полигона оказалась в гидротермических условиях типичной и даже южной лесостепи, которой свойствен диапазон $K_{увл} = 0,76–1,03$ [12]. Таким образом, по данному гидрологическому году вполне отчетливо был выражен *термоаридный климатический сигнал*. При этом изменение запасов почвенной влаги в начале вегетационного периода 1989 г. были вызваны почти

исключительно сдвигами в температурном режиме почвы.

Во второй (1990) год имела место, наоборот, весьма резкая плювиальная аномалия на фоне несколько более теплой зимы и умеренного летнего сезона (см. табл. 1). Годовое количество осадков превысило многолетнюю норму более чем на 65% и на такую же величину вырос годовой коэффициент увлажнения, что при относительно низкой испаряемости не могло не вызвать общего увеличения весенне-летнего влагосодержания почвы. Как видим, в этом году ярко проявился *гумидный климатический сигнал*, с практически не выраженной термической составляющей. Этот сигнал как бы сместил изучаемую территорию на зональную границу между смешанными лесами и южной тайгой, где для Среднего Поволжья норма $K_{увл}$ составляет 1,62–1,88 [12].

На территории экспериментального полигона было выделено шесть фациальных (биогеоценологических) групп. Они охватывали основное разнообразие типов леса и располагались по следующему вектору локального ландшафтного сопряжения (катены), согласно классификации [2]: от элювиальных (Э), или плакорных, типов местоположений (МП) к трансэлювиальным (ТЭ) типам, далее через транзитные (Т) и трансаккумулятивные (ТА) типы до аккумулятивных (А) и супераккумулятивных (Саq).

Собранная в каждый год соответственно на 35 и 32 пробных площадях эмпирическая информация включала около 80 характеристик структурно-функционального состояния лесных экосистем (см. [14]). Поскольку повторные исследования (1990 г.) проводились на новых пробных площадях, для последующего сравнительного анализа использовались уже осредненные данные по группам-аналогам лесных биогеоценозов.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Схема, иллюстрирующая последовательность эмпирического имитационного моделирования, представлена на рис. 1. Для интерпретации почвенно-геофизических данных ландшафтно-экологических съемок использованы материалы Подмосковной водно-балансовой станции, а также агрометстанций Нижний Новгород, Муром и Ардамов. Предварительная термо- и гидроэдафическая ординация метаболических характеристик топозистем показала [14], что эти характеристики имеют наиболее тесные связи с двум геофизическим параметрам: температурой почвы на глубине 50 см (t_{50}) и запасами летней продуктивной влаги в слое почвы 0–50 см ($W-50$). Хотя эти корреляции не всегда достаточно высоки, но вполне значимы (критерий значимости Пирсона $P \ll 0,05$). При слабой связи последнюю можно интерпретировать лишь как некоторую общую тенденцию изменений данного метаболического параметра под влиянием геофизического тренда.

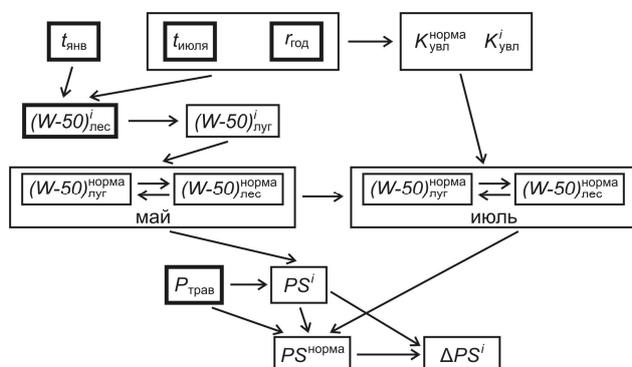


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая процедуру эмпирической имитации экологических последствий климатических изменений.

В утолщенных рамках помещены признаки, исходные для последующих расчетов. Остальные обозначения см. в тексте.

Поскольку многолетние нормы влагосодержания почвы известны только для полевых (луговых) пространствах ($W-50$)_{луг}, цепочка аналитических связей включала неоднократные переходы от лесных влагозапасов ($W-50$)_{лес} к луговым и обратно – как для данного (i -го) года, так и для многолетней нормы. Эти переходы осуществлялись по эмпирическим зависимостям:

$$(W-50)_{\text{луг}} = 0,978 \cdot (W-50)_{\text{лес}} - 10,23; \quad (5)$$

$$(W-50)_{\text{лес}} = 1,4 + 0,996 \cdot (W-50)_{\text{луг}}. \quad (6)$$

Расчеты влагосодержания почвы на конец третьей декады мая по годовому коэффициенту увлажнения производились отдельно для песков и супесей (а), а также легких и средних суглинков (б):

$$\text{а) } (W-50) = \exp[2,425 + 1,11 \cdot K_{\text{увл}}]; \quad R = 0,905; \quad R^2 = 0,828; \quad (7)$$

$$\text{б) } (W-50) = \exp[2,099 + 1,355 \cdot K_{\text{увл}}]; \quad R = 0,921; \quad R^2 = 0,848; \quad (8)$$

Для перехода гидроэдафического параметра от позднеймайских значений к среднеиюльским использовалась эмпирическая связь:

$$(W-50)_{\text{июль}} = 0,8107 \cdot (W-50)_{\text{май}} - 17,64; \quad R = 0,836; \quad R^2 = 0,699. \quad (9)$$

Разница в t_{50} между 1989 и 1990 г.г. для одного и того же влагосодержания почвы ($W-50$) составляет 3,0–3,2° (рис. 2). Эта цифра приближается к разнице между среднеянварскими температурами воздуха в эти годы по ст. Выкса – 3,5° (см. табл. 1). Следует признать полученные расчетные характеристики как самое грубое приближение, поскольку цепочки связей имеют корреляционный, а не функциональный характер.

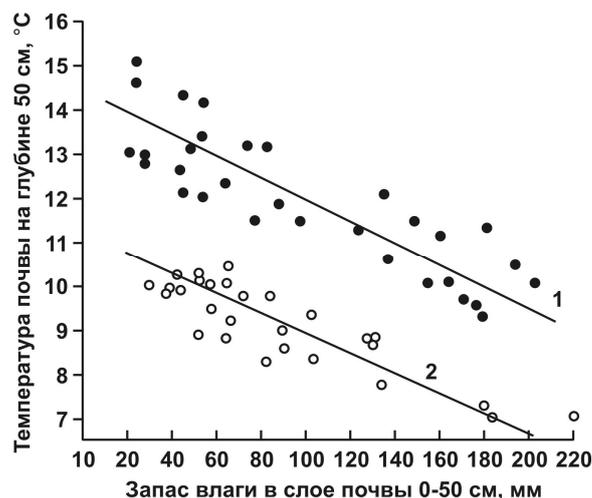


Рис. 2. Корреляционные связи влагосодержания и температуры почвы в периоды ландшафтно-экологических съемок. Годы: 1 – 1989; 2 – 1990.

Поправочные коэффициенты, полученные при сопоставлении (по данным агрометстанций) средних многолетних весенне-летних запасов почвенной влаги и запасов влаги в год проведения ландшафтно-экологических съемок на данном полиго-

не, были использованы для расчетов многолетней нормы влагосодержания почвы по всем пробным площадям и по всем группам биогеоценозов изучаемой территории. Для 1989 г. этот коэффициент был равен 1,18, а для 1990 г. – 0,74. На основе линейной эмпирической связи t_{50} с $(W-50)$ (см. рис. 2) оказалось правомерным также использовать поправочный коэффициент 1,18 для расчета многолетней нормы температуры почвы.

В процедуре расчетов использованы три исходных эмпирических параметра: 1) запасы продуктивной влаги в почве в весенне-летний период (май–июнь), по данным агрометстанций в среднем многолетней режиме и в годы проведения ландшафтно-экологических съемок на экспериментальном полигоне; 2) непосредственно измеренная зеленая масса травянистого покрова (в воздушно сухом состоянии) в лесу на пробных площадях полигона; 3) коэффициенты атмосферного увлажнения, рассчитанные по данным метеостанций по значениям среднеиюльской температуры и годовой суммы осадков и характеризующие фоновые гидротермические условия данного полигона в многолетнем режиме и в годы проведения съемок.

Зеленая масса травостоя ($P_{\text{трав}}$) – ключевой эмпирический параметр, практически мгновенно реагирующий на изменение гидротермических условий воздуха (под пологом леса) и почвы. Через него удалось выйти на количественные оценки общей ежегодной продуктивности лесной экосистемы (PC) и депонирования углерода в скелетной массе древесно-кустарникового яруса при соответствующем годовом приросте (PS) этой массы. Параметры PS и PC определялись расчетным путем по материалам таксации леса на пробных площадях и с последующим использованием известных таблиц хода роста древостоев [17].

ИНДИКАЦИЯ ГОДИЧНОГО ПРИРОСТА СКЕЛЕТНОЙ ФИТОМАССЫ ПО ЗЕЛЕННОЙ МАССЕ ТРАВСТОЯ

В целом по фаціальным группам производство надземной массы травянистого покрова для данных зонально-региональных климатических условий находится в обратно пропорциональной связи как с продуктивностью скелетной (главным образом древесной) фитомассы (рис. 3), так и с общей годичной продукцией лесного биогеоценоза. Это означает, что если при увеличении весенне-летнего влагосодержания почвы надземная травянистая масса возрастает, то производство всех остальных фитомасс, как надземных, так и подземных, соответственно снижается. Выявленные достаточно четкие взаимоотношения $P_{\text{трав}}$ с PC и PS и эмпирически установленные зависимости первого параметра от весенне-летних запасов продуктивной влаги в почве (рис. 4) позволяют использовать зеленую массу травостоя в качестве индикатора продуктивности скелетной древесно-кустарниковой фитомассы (надземной + корневой) и в конечном

итоге рассчитать изменения стока углерода в основном (фитоценоотическом) пуле лесной экосистемы.

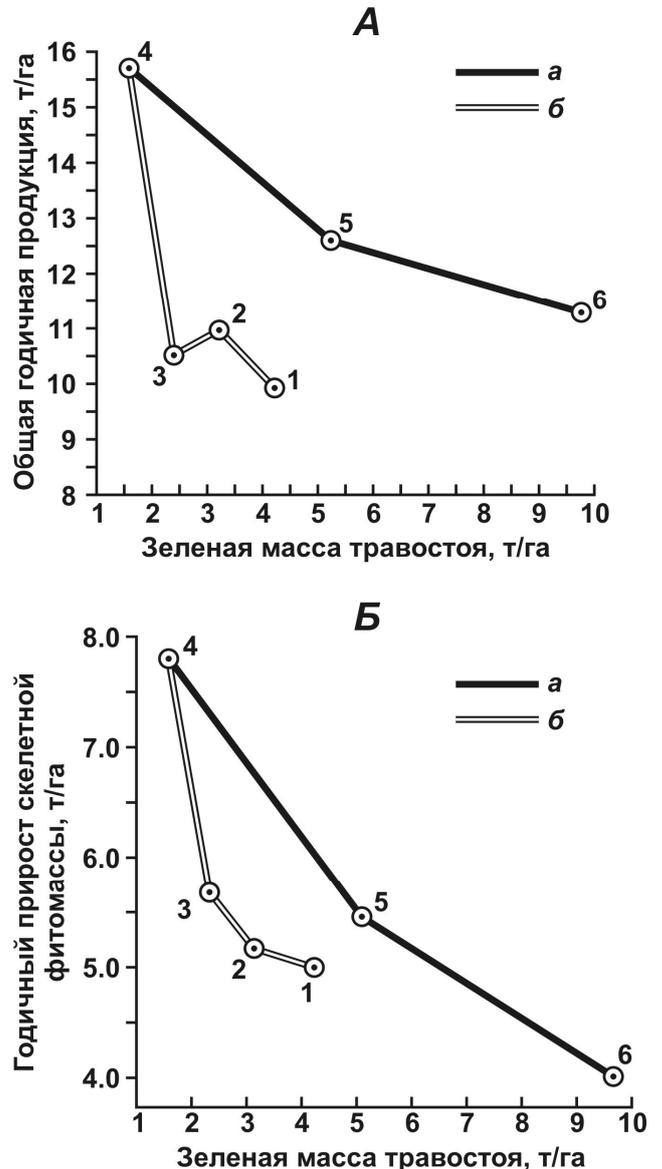


Рис. 3. Корреляционные связи зеленой массы травянистого покрова с общей продуктивностью лесных экосистем (А) и годичным приростом скелетной фитомассы (Б).

Звенья локальных катен: а – верхние и средние (типы местоположений Э, ТЭ и Т); б – нижние (типы ТА, А и Саq). Пояснения в тексте.

В этой связи важно было получить связь параметра $P_{\text{трав}}$ с гидротермическими характеристиками почвы. Связи в целом оказались слишком «размытыми» при «лобовом» континуально-статистическом анализе. Так, для модели Вькса-89 было получено:

$$P_{\text{трав}} = 143,2 - 21,06 \cdot t_{50} + 0,791 \cdot t_{50}^2; \quad R = 0,454; \quad R^2 = 0,206; \quad (10)$$

$$P_{\text{трав}} = 2,386 + 0,223 \cdot (W-50); \quad R = 0,329; \quad R^2 = 0,108. \quad (11)$$

Модель Вькса-90 имела следующую парциальную связь:

$$P_{\text{трав}} = 5,43 - 0,077 \cdot (W-50) + 0,791 \cdot (W-50)^2; R = 0,408; R^2 = 0,166. \quad (12)$$

Множественная корреляция по обеим моделям была вообще недостоверной. В парциальной связи (10) максимум зеленой массы травостоя (до 8–10 т/га) соответствует двум крайним значениям температуры почвы: 10–10,5° и 15–15,2°. В промежуточном температурном диапазоне имеется обширная зона толерантности с низкой продуктивностью напочвенного покрова (1–5 т/га).

Согласно уравнениям (11) и (12), зеленая масса травостоя в целом возрастает при увеличении весенне-летних влагозапасов в почве, однако это всего лишь обобщенная и весьма слабо выраженная тенденция, которая прослеживается главным образом при взгляде на общий размах изменений продуктивности – от минимальных значений до максимальных. На фоне этой тенденции в определенных звеньях локальной катены выявляется и обратная картина – с отрицательной связью указанных параметров. Рассмотрим эти закономерности более подробно. При этом разделим генеральную совокупность пробных площадей на выборки, соответствующие положению биогеоценозов в системе их катенарной дифференциации, т.е. используем дискретно-статистический подход, оперируя (в целях получения упрощенной картины связей) только осредненными по каждой выборке значениями функциональных параметров.

Система локальных ландшафтных сопряжений (катен) на экспериментальном полигоне достаточно четко дифференцируется на два «этажа», которые различаются по знаку корреляционных связей массы травостоя $P_{\text{трав}}$ с параметром $(W-50)$. В верхний этаж, охватывающий наибольшие площади, входят разнообразные типы местоположений (МП): элювиальный (Э), трансэлювиальный (ТЭ) и транзитный (Т), – к которым приурочены 1–4 группы биогеоценозов (ГБ, см. рис. 3). Здесь выражена обратно пропорциональная связь $P_{\text{трав}}$ с влагосодержанием почвы (см. рис. 4) и связь эта проявляется, очевидно, через посредство древесно-кустарниковых ярусов, развитие которых оказывает прямое негативное воздействие на травянистый покров.

На нижнем же этаже катены, который включает трансаккумулятивные (ТА), аккумулятивные (А) и супераккумулятивные (Саq) типы МП, с достаточным и избыточным эдафическим увлажнением (ГБ 5 и 6), развитие древесно-кустарниковых ярусов ослаблено и лесной полог оказывается разреженным, что способствует формированию достаточно высокого и густого травостоя со значительной зеленой массой. В этих локальных гидроэдафических условиях связь параметров $P_{\text{трав}}$ и $(W-50)$ оказывается прямо пропорциональной (см. рис. 4).

Как было уже нами установлено [13, 15], задровые полесья Среднего Поволжья на зональной границе подтайги и широколиственных лесов находятся в условиях фонового коэффициента увлажнения, колеблющегося от недостаточного до

слабо избыточного ($K_{\text{увл}} = 0,94–1,12$). Недостаток атмосферной влаги сказывается, прежде всего, на лесных сообществах, приуроченных к наиболее дренированным типам МП, т.е. относящихся к верхнему этажу катен. По этой причине любое увеличение почвенно-грунтового увлажнения ведет к активизации продукционного процесса во взрослом древостое, подросте и кустарниках, что в свою очередь угнетающе действует на напочвенный покров. В итоге оказывается, что при общей пониженной на данном катенарном этаже продуктивности травянистого покрова рост атмосферного (а с ним и эдафического) увлажнения ведет к еще большему снижению этой продуктивности.

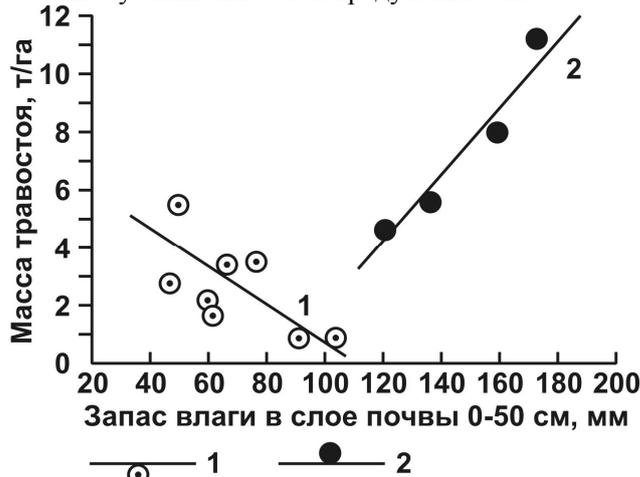


Рис. 4. Корреляционные связи зеленой массы травостоя с весенне-летними запасами продуктивной влаги в почве.

Звенья локальных ландшафтных сопряжений: 1 – Э, ТЭ и Т (верхний «этаж» катены); 2 – ТА, А и Саq (нижний «этаж»).

Обрисованная закономерность проявляется также в пространственных связях $P_{\text{трав}}$ с общей годичной продуктивностью (PC) лесных сообществ, а также с продуктивностью (PS) их скелетной массы (см. рис. 3). Здесь так же прослеживается два катенарных «этажа». В системе биогеоценологических переходов: 1 → 2 → 3 → 4 снижение массы травостоя сопровождается повышением параметров PC и PS, особенно резким в интервале переходов от ТЭ типа местоположений к транзитному типу на ровных склонах междуречий. При дальнейших же переходах к типам ТА–А и Саq местоположений, уже на нижнем «этаже» катены, значительное увеличение травянистой зеленой массы соответствует столь же резкому сокращению годичного прироста древесно-кустарниковой фитомассы и снижению суммарной продуктивности лесного фитоценоза.

В целом, чем больше надземная масса травянистого покрова, тем ниже общая годичная продукция лесного фитоценоза, в которой до 40–50% и более занимает прирост скелетной массы древостоя, и тем соответственно меньше величина депонирования углерода в живой надземной фитомассе. Исходя из этого соотношения принято, что уменьшение зеленой травянистой массы в рассматриваемом

мый летний сезон по сравнению с многолетней нормой будет адекватно (в процентном отношении) увеличению параметров PC и PS и – наоборот.

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ЭМПИРИЧЕСКОЙ ИМИТАЦИИ

Экологические следствия атмосферного гидротермического сигнала вполне отчетливо дифференцируются по типам местоположений и группам типов леса, в результате чего формируется целый спектр функциональных реакций лесных биогеоценозов на этот сигнал (рис. 5). Структура такого спектра определяется характером самого гидротермического тренда.

Термо-аридный климатический сигнал (модель Выкса-89) вызвал в целом незначительные

сдвиги в весенне-летнем влагосодержании почвы. Наибольшие отрицательные аномалии по сравнению с многолетней нормой прослеживались в мезоморфных и гидро-мезоморфных ельниках кисличниках соответственно трансэлювиальных и элювиальных местоположений (группа биогеоценозов 3): $(W-50) = 68 \rightarrow 61$ мм. В остальных случаях $\Delta(W-50)$ был близок к нулю, либо остался в пределах самих измерений и расчетов влагосодержания почвы (± 5 мм). Тем не менее, можно отметить некоторое весенне-летнее иссушение заболоченных супераквальных лесов, а также мезоксероморфных сосняков, с елью, на пологоволнистых водоразделах (ГБ 6 и 2).

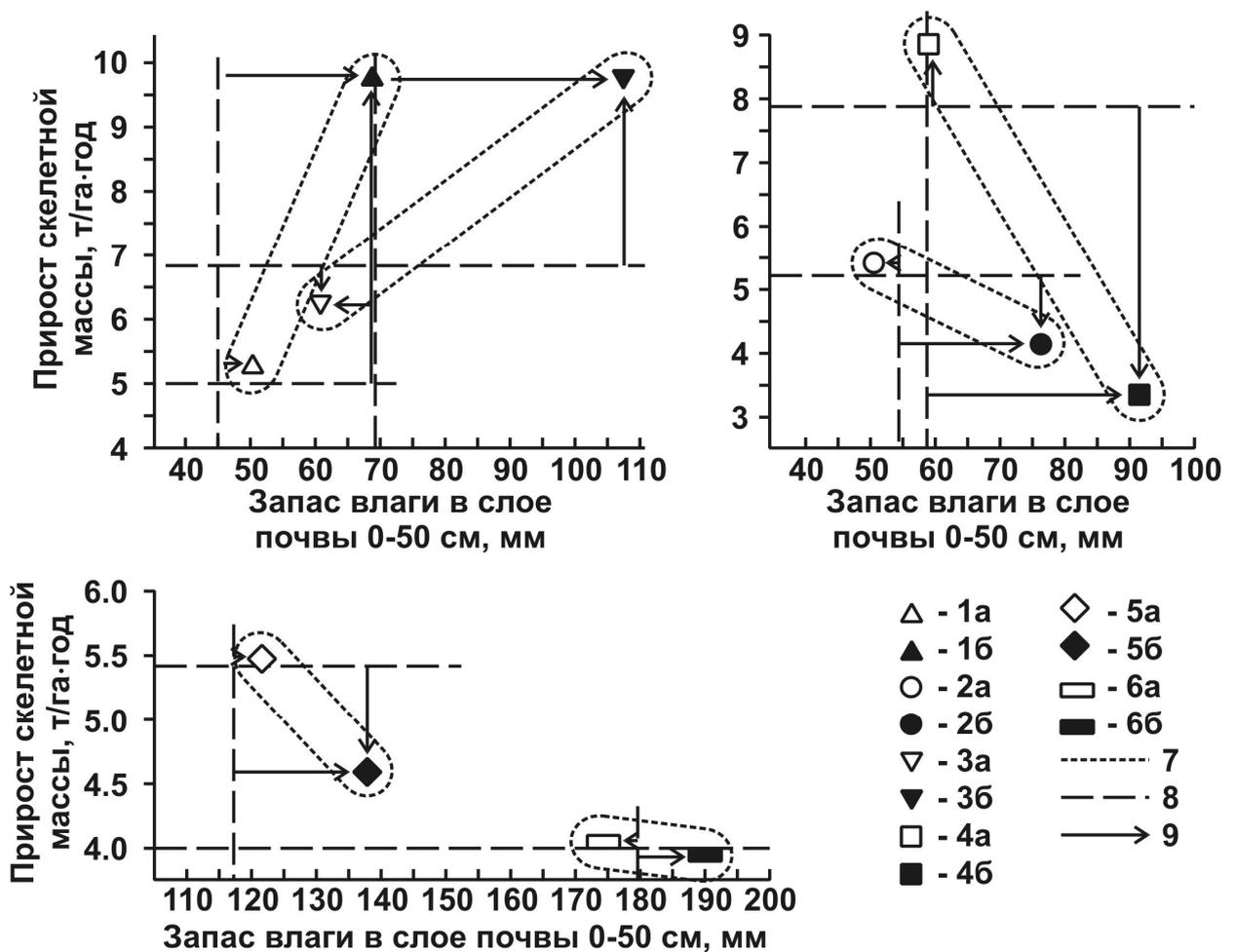


Рис. 5. Соотношения влагосодержания почвы ($W-50$) и продуктивности скелетной фитомассы PS в различных лесных экосистемах при двух альтернативных климатических сигналах.

1–6 – группы биогеоценозов (см. табл. 1). Гидротермические сигналы: а – термо-аридный (модель Выкса-89); б – гумидный (модель Выкса-90). 7 – «ареалы», описывающие амплитуду между сигналами. 8 – многолетние нормы ($W-50$) и PS . 9 – направление и условная величина отклонения указанных параметров от их нормы.

Температура почвы была на 2,1–2,4° выше многолетней весенне-летней нормы, однако это повышение частично нейтрализовалось дополнительным количеством осадков (см. табл. 1), поэтому сама температурная составляющая термоаридного сигнала оказалась мало эффективной. В результате отклонения от средней многолетней нормы общей

годовой продукции лесных сообществ и соответственно депонирования углерода в их скелетной массе имели в целом низкие, хотя и почти повсеместно положительные значения (см. рис. 5 и табл. 3). Годовой сток углерода наиболее отчетливо увеличился в дубово-сосново-еловых неморально-транзитных местоположениях (ГБ 4).

Здесь он мог составить 4,45 т/га, с превышением многолетней нормы на 14%. Гораздо слабее рост углеродного депозита был выражен в ксероморфных и мезо-ксероморфных водораздельных (ТЭ и Э) сосняках (ГБ 1). Зеленая же масса травостоя здесь имела наибольшие положительные отклонения от многолетней нормы: 4,4 → 5,5 т/га. Сток

углерода практически не изменился на нижнем этаже локальных катен – в переувлажненных и заболоченных мелколиственно-елово-сосновых лесах А и Саq местоположений. Очевидно, термическая составляющая климатического сигнала сработала здесь наименее эффективно.

Таблица 3. Отклонения влагосодержания почвы от многолетней нормы и изменение стока углерода в группах лесных биогеоценозов при различном климатическом сигнале

Модель	Параметры *)	Типы местоположений и группы биогеоценозов (см. табл. 2)					
		ТЭ-Э 	Э-ТЭ 	Э-Т 	Т-ТА 	ТА-А 	ЭА-Саq 
Выкса-89	$\Delta(W-50)$	3	-4	-9	2	1	-6
	$\Delta(B_C)$	0,14	0,15	0,27	0,56	0,02	0,02
Выкса-90	$\Delta(W-50)$	25	28	36	32	23	10
	$\Delta(B_C)$	2,43	-0,54	2,06	-2,22	-0,28	0

*) $\Delta(W-50)$ – отклонение влагосодержания почвы в слое 0–50 см (в мм) в год ландшафтно-экологической съемки от многолетней нормы влагозапасов; $\Delta(B_C)$ – изменение депозита углерода (т/га) в скелетной (надземной и корневой) древесно-кустарниковой фитомассе в год ландшафтно-экологической съемки по сравнению с многолетней нормой его аккумуляции.

Плюсовые значения $\Delta(B_C)$ указывают на положительный углеродный баланс, минусовые – на баланс отрицательный.

На этом фоне исключение составили элювиально-транзитные ельники-кисличники, где произошло уменьшение депозита углерода в среднем на 9–10% (до 6,23 т/га), что было вызвано несколько более интенсивным иссушением почвы в поздневесенний период (см. выше). Одновременно снизилась и зеленая масса травостоя (в среднем с 2,3 до 1,75 т/га).

Таким образом, само зимнее потепление, даже весьма значительное, не сказывается сколько-нибудь существенно на функционировании лесных экосистем, в том числе на их продуктивности и углеродном балансе, если оно не сопровождается достаточным понижением или повышением самого атмосферного увлажнения. Данный эмпирический вывод подтверждает высказанное нами ранее [12] положение о том, что «смягчение» зимы не может служить решающим фактором экологических сдвигов в структуре и функционировании экосистем, как это предполагается в известных палеогеографических сценариях [2, 3, 11].

Гумидный климатический сигнал (модель Выкса-90) оказал гораздо более значительное воздействие на функциональное состояние лесных сообществ по сравнению с описанной выше термоаридизацией. В этом случае и локальные контрасты в динамике этих состояний были выражены особенно ярко. С максимальной положительной эффективностью плювиальный сигнал проявился в наиболее дренированных водораздельных биогеоценозах, где базовый дефицит влаги выражен в наибольшей степени. При этом решающую роль сыграло значительное повышение весенне-летнего влагосодержания почвы (см. табл. 1). Так, в ТЭ, Э и Т ксероморфных бруснично-зеленомошных сосняках и мезоморфных кисличных ельниках (ГБ 1 и 3) сдвиги параметра ($W-50$) равнялись соответственно

43 мм → 68 мм и 59 мм → 91 мм. В связи с этим существенно активизировался продукционный процесс в лесных сообществах, усилился сток углерода из атмосферы в скелетную древесно-кустарниковую фитомассу. Содержание углерода в живой скелетной фитомассе (B_C) здесь : $B_C(1) = 2,50 \rightarrow 4,92$ т/га; $B_C(3) = 2,85 \rightarrow 4,91$ т/га.

Важно подчеркнуть, что в верхних и средних звеньях катены рост углеродного депозита происходил вопреки более низким температурам почвы, которая оказалась в среднем на 2,7° холоднее, нежели при прошлогодних термо-аридных условиях. Это свидетельствует о незначительной роли термической составляющей данного климатического сигнала в локальных условиях изначально повышенного дефицита эдафического увлажнения.

Однако при умеренном и ослабленном дренаже картина совершенно иная. Резкое ослабление стока углерода из атмосферы в скелетную фитомассу произошло в слабо дренируемых неморально-травяных дубово-сосново-еловых лесах ТА и А местоположений, т.е. на пологих склонах и у подножий (ГБ 4). Здесь средние изменения ($W-50$) составили 71 мм → 107 мм, что сопровождалось снижением температуры почвы (см. рис. 2). Это привело к значительному ослаблению автотрофного биогенеза и соответственно – к уменьшению стока углерода с 3,90 до 1,68 т/га.

Значительно меньшую потерю углеродного депозита испытали элювиальные мезо-ксероморфные майничково-брусничные сосняки с елью на пологоволнистых междуречьях (ГБ 2), а также аккумулятивные долгомошно-черничные сосново-еловые леса пологовогнутых склонов (ГБ 5). В этих лесных сообществах сдвиги параметра ($W-50$) составили соответственно: 49 мм → 77 мм и 114 мм → 137 мм, а температура почвы снизилась на 2,8–

3,1° по сравнению с предыдущим годом. В результате здесь произошло следующее снижение стока углерода: $B_C(2) = 5,18 \rightarrow 4,11$ т/га; $B_C(5) = 5,46 \rightarrow 4,60$ т/га.

В избыточно увлажненных Саг долгомошно-сфагновых сосняках и ельниках междуречных западин дальнейший прирост запасов почвенной влаги не оказывал сколько-нибудь существенного влияния на общий продукционный процесс и углеродный баланс. Однако можно говорить о незначительном снижении здесь депозита углерода.

Интересно отметить, что критическое значение весенне-летнего влагосодержания почвы, при котором приращение депозита углерода в скелетной фитомассе лесов сменяется его убылью, существенно зависит от формы микрорельефа, которая определяет степень дренированности и температурный режим данного местоположения. Так, в более дренируемых ельниках-кисличниках волнистых водоразделов увеличение стока углерода продолжалось вплоть до значений $(W-50) \approx 110$ мм, между тем как в широколиственно-хвойных неморально-травяных лесах пологих склонов, с их более слабым дренажом, уже при $(W-50) \leq 90$ мм отмечалось резкое снижение углеродного депозита (см. ГБ 3 и 4 на рис. 5). При этом почвы по механическому составу были почти одинаковыми – супесчаными и легкосуглинистыми.

В первом случае достаточно длительной активизации автотрофного биогенеза и соответствующему росту стока углерода способствовало сокращение дефицита почвенно-грунтового увлажнения на фоне пониженной температуры почвы. Во втором же случае произошло излишнее обводнение гидроэдафотопов при таких же относительно низких температурах, что и привело к ослаблению продукционного процесса, с соответствующим снижением параметра B_C на более раннем этапе гумидного тренда.

Итак, вырисовывается достаточно сложная картина функциональной реакции лесных экосистем топологического уровня на один и тот же фоновый плювиальный сигнал. Соответствующим пространственным многообразием отличаются также механизмы аккумуляции углерода в древесно-кустарниковой фитомассе. Реакция лесных биогеоценозов на увеличение количества осадков определяется двумя факторами. Во-первых, следует учитывать, насколько выражен в них исходный (базовый) дефицит или, наоборот, избыток эдафического увлажнения. Во-вторых, необходимо оценить роль одновременных температурных сдвигов в увеличении или, напротив, уменьшении стока углерода.

Положительная динамика стока углерода свойственна тем лесным сообществам, где гумидный сигнал ликвидирует изначальный дефицит почвенно-грунтового увлажнения, при индифферентной роли температурного режима. В условиях же нормального и тем более избыточного начального ув-

лажнения дальнейший рост влагосодержания почвы сопровождается снижением ее температуры, вызывая отрицательную динамику стока углерода.

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ

Если вычислить разницу в параметрах t_{50} ($W-50$) и PS между 1990 и 1989 г.г., то получим картину сдвигов в гидротермическом режиме лесных биогеоценозов, в их продуктивности, а также в стоке углерода по некоторому, гораздо более ярко выраженному варианту термоаридного климатического тренда (рис. 6), который характеризуется не только повышением зимних и летних температур, но и значительным сокращением осадков. По средним многолетним условиям атмосферного увлажнения ($K_{увл.}$) данная гипотетическая модель как бы относит Нижнеокское полесье в его начальном, т.е. современном, состоянии (аналог 1990 г.) к более западным территориям бассейнов Средней Оки и Верхней Волги. Конечное же состояние выксунских лесов (аналог 1989 г.) в некоторой перспективе будет обусловлено их определенным экологическим сдвигом. Такой сдвиг можно ожидать примерно в середине нашего столетия, согласно одной из экстремальных климатической модели $NadCM3$, версия A2 [10].

Модель «Выкса 1990→1989» имитирует весьма значительный размах возможных экологических последствий термоаридного тренда. На территории выксунского полигона t_{50} повышается на 2,7–4,2°, а величина снижения $(W-50)$ составляет от 6–18 до 31–46 мм. При этом модель демонстрирует резко выраженную дифференциацию лесных термогидроэдафотопов на один и тот же фоновый климатический сигнал (см. рис. 6). В целом наибольшие гидротермические сдвиги свойственны лесным экосистемам средних звеньев ландшафтных сопряжений – Т и ТА типов МП (ГБ 3, 4 и 2). Минимальными изменениями температуры и влагосодержания почвы будут отличаться биогеоценозы двух противоположных «полюсов» катены, приуроченных, с одной стороны, к Э–ТЭ местоположениям, а с другой, – к аккумулятивным и супераквальным. Поскольку пространственная связь между t_{50} ($W-50$) обратно пропорциональна, их распределение по вектору катены носит зеркальный характер.

Рассмотрим локальную мозаику функциональной реакции лесных экосистем на данный климатический сигнал. Наименее чувствительными к этому сигналу оказываются переувлажненные хвойно-мелколиственные леса междуречных западин и слабо дренируемых подножий склонов (ГБ 6 и 5). Соответственно здесь мало изменяется продуктивность лесного сообщества и величина стока углерода в скелетную фитомассу, с незначительными положительными значениями ($\Delta PS \leq 0,9$ т/га).

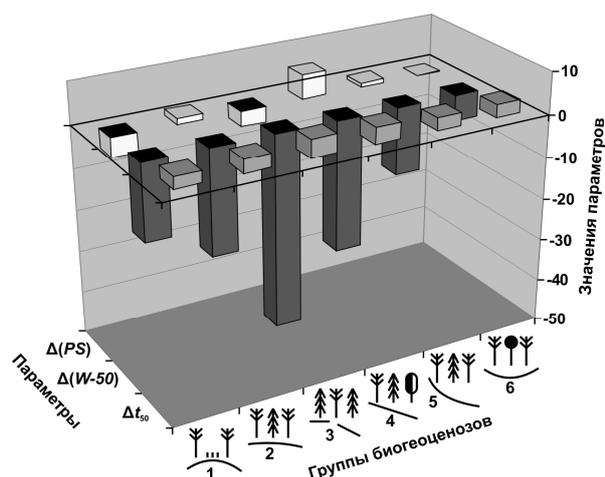


Рис. 6 Проявления экстремального термоаридного климатического тренда и соответствующих изменений стока углерода в лесных экосистемах, расположенных по вектору локальных ландшафтных сопряжений (катен).
Условные обозначения см. в табл. 2 и в тексте.

На противоположном «полюсе» катены: в ксероморфных вересково-вейниковых сосняках крутосклонных песчаных дюн и гряд (ГБ 1) почти такая же термоаридизация ($\Delta t_{50} = 2,7^\circ$, $\Delta(W-50) = -18$ т/га) вызовет максимальное для данного экорегиона снижение первичной биопродуктивности, с соответствующим резким сокращением стока углерода (на 4,6 т/га). На плоских же междуречьях мезоксероморфные майниково-брусничные елово-сосновые леса будут отличаться некоторым увеличением стока углерода $\Delta PS = 1,4$ т/га).

Существенный отрицательный термоаридный эффект (с $\Delta t_{50} = 4,2^\circ$ и $\Delta(W-50) = -46$ т/га) проявится в мезоморфных плакорных кисличных ельниках и елово-сосновых лесах на Э–Т пологоволнистых водоразделах (ГБ 3), где ожидается $\Delta PS = -3,6$ т/га. В то же время ниже по склонам в более увлажненных гидро-мезоморфных дубово-сосново-еловых неморально-травяных лесах Т и ТА местоположений (ГБ 4) ненамного меньшая термоаридизация ($\Delta t_{50} = 3,8^\circ$, $\Delta(W-50) = -31$ т/га) вызовет, наоборот, существенную активизацию продукционных процессов и увеличение стока углерода на 5,6 т/га – максимальное для всего ансамбля биogeоценологических групп (см. рис. 6). В первом случае термоаридный климатический сигнал вызывает удаление лесных сообществ от их состояния с оптимальным соотношением тепла и влаги, а во втором – приближение к этому состоянию, что и приводит соответственно к отрицательному и положительному изменениям стока углерода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эмпирическая имитация экологических последствий климатических изменений позволила выявить конкретные сдвиги в гидротермическом режиме и первичной продуктивности лесных экосистем под действием двух альтернативных атмо-

сферных гидротермических сигналов. В обширной полосе зональных переходов от смешанных лесов к лесам широколиственным в условиях низменных задровых полесий, широко представленных на Русской равнине, гумидный климатический сигнал оказывает более эффективное и разнообразное воздействие на функциональное состояние лесных сообществ, нежели сигнал термо-аридный. Соответственно в первом случае возникает более ярко выраженная и территориально более контрастная картина изменений стока углерода в живую скелетную фитомассу, играющую, как уже было показано ранее [14], решающую роль в углеродном балансе лесных экосистем. Наиболее яркую и разнообразную картину функциональных сдвигов в лесных экосистемах при ожидаемом глобальном потеплении дает построенная по тем же эмпирическим данным экстремальная имитационная модель, учитывающая одновременно повышение зимней и летней температуры и существенное сокращение годовых осадков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 110-05-00575-а

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арманд А.Д., Ведюшкин М.А. Триггерные геосистемы. М.: Ин-т географии АН СССР, 1989. 51 с.
2. Величко А.А. Устойчивость ландшафтной оболочки и ее био- и георазнообразие в свете динамики широтной зональности // Изв. АН. Сер. географич. 2002. № 5. С. 7–21.
3. Величко А.А., Гричук В.П., Гуртовая Е.Е., Зеликсон Э.М. Палеоклимат территории СССР в оптимум последнего (микулинского) межледниковья // Изв. АН СССР. Сер. географич. 1983. № 6. С. 30–45.
4. Глазковская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1964. 230 с.
5. Ефимова Н.А., Строкина Л.А., Байкова И.М., Малкова И.В. Изменения основных элементов климата на территории СССР в 1967-1990 гг. // Метеорология и гидрология. 1996. № 4. С. 34–41.
6. Изменение климата, 2001 г. Обобщенный доклад МГЭИК / Д. Л. Албриттон, Т. Баркер, И. Башмаков и др. / Под ред. Р.Т. Уотсона. Geneva: World Meteorological Organization, 2003. 220 p.
7. Исаев А.С., Коровин Г.Н. Углерод в лесах Северной Евразии // Круговорот углерода на территории России. НТП «Глобальные изменения природной среды и климата». М.: Мин-во науки и технологий РФ, 1999. С. 63–95.
8. Кислов А.В. Изменения и изменчивость глобального климата // Современные глобальные изменения природной среды. Т. 1. М.: Научный мир, 2006. С. 118–129.
9. Клизе Р.К. Глобальные гидроклиматические изменения // Глобальные и региональные изменения климата и их природные и социально-экономические последствия. М.: ГЕОС, 2000. С. 6–23.
10. Климатический режим Арктики на рубеже XX и XXI вв. / Под ред. Б.А. Крутских. СПб.: Гидрометеоздат, 1991. 133 с.
11. Климаты и ландшафты Северной Евразии в условиях глобального потепления. Ретроспективный анализ и

- сценарии (Атлас-монография) / Отв. ред. А.А. Величко. М.: ГЕОС, 2010. 219 с.
12. Коломыц Э.Г. Региональная модель глобальных изменений природной среды. М.: Наука, 2003. 371 с.
 13. Коломыц Э.Г. Бореальный экотон и географическая зональность. Атлас-монография. М.: Наука, 2005. 390 с.
 14. Коломыц Э.Г. Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. М.: Наука, 2008. 427 с.
 15. Коломыц Э.Г., Юнина В.П., Сидоренко М.В. Воротников В.П. Экосистемы хвойного леса на зональной границе. Организация, устойчивость, антропогенная динамика. Нижний Новгород: Ин-т экологии Волж. бассейна РАН, 1993. 346 с.
 16. Кондратьев К.Я., Демирчян К.С. Глобальные изменения климата и круговорот углерода // Изв. Русск. географич. об-ва. 2000. Вып. 4. С. 1–20.
 17. Общесоюзные нормативы для таксации лесов. Справочник / В.В. Загребев, В.И. Сухих, А.З. Швиденко, А.Г. Мошкалев. М.: Колос, 1992. 495 с.
 18. Переведенцев Ю.П., Верецагин М.А., Наумов Э.П., Шанталинский К.М. Многолетние колебания основных показателей гидрометеорологического режима волжского бассейна // Метеорология и гидрология. 2001. № 10. С. 16–22.
 19. Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С. Структура растительности лесной зоны СССР: Системный анализ. М.: Наука, 1981. 275 с.
 20. Состояние и комплексный мониторинг природной среды и климата. Пределы изменений / Отв. ред. Ю.А. Израэль. М.: Наука, 2001. 242 с.
 21. Экосистемы теллермановского леса / Отв. ред. В.В. Осипов. Институт лесоведения РАН. М.: Наука, 2004. 340 с.

EMPIRICAL SIMULATION OF THE PRIMARY PRODUCTIVITY AND CARBON ACCUMULATION IN FOREST ECOSYSTEMS UNDER DIFFERENT CLIMATE CHANGE SCENARIOS

© 2012 E.G. Kolomyts, N.A. Surova

Institute of Ecology of the Volga River Basin, Russian Academy of Sciences, Togliatti

This article gives an account of the experience of studying the functional response of forest ecosystems in one of the ecoregions of the Middle Povolzhye to inter-year fluctuations of meteorological conditions, which may to a certain extent simulate multi-year (intra-century and century) climatic changes. The procedure of empirical simulation using generalized thermo-hydro-edaphic and production parameters of local ecosystems has been developed. The two alternative climatic signals (thermo-arid and humid) have been considered. The humid signal was shown to more effectively and diversely influence the functional state of forest ecosystems compared to the thermo-arid signal. Accordingly, in the former case there is a more marked and rather contrast spatial pattern of changes in carbon accumulation in the forest phytobiota.

Key words: forest ecosystem, primary productivity, weather conditions, the empirical simulation of climatic signal, changing carbon sinks.