

УДК 551.583 + 581.524.3 + 581.586

## ИМИТАЦИОННЫЕ СЦЕНАРИИ ИЗМЕНЕНИЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ И СТОКА УГЛЕРОДА ПРИ КЛИМАТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ<sup>1</sup>

© 2014 г. Э.Г. Коломыц, Н.А. Сурова

*Институт экологии Волжского бассейна РАН*

Поступила в редакцию 18.05.2012 г.

Представлены результаты изучения функционального отклика лесных экосистем одного из регионов Среднего Поволжья на межгодовые колебания метеорологических условий, которые могут имитировать многолетние (внутривековые и вековые) изменения климата. Изложена процедура эмпирической имитации. Установлено, что гумидный сигнал оказывает более эффективное и разнообразное воздействие на функциональное состояние биогеоценозов и сток углерода в лесную фитобиоту, нежели сигнал термоаридный. Приведены также региональные сценарии изменений продуктивности лесных сообществ при различных климатических трендах, стока углерода, содержание влаги в почве и др.

**Введение.** Глобальное потепление, вызванное антропогенным изменением химического состава атмосферы, можно, по-видимому, считать начавшимся. В конце 50-х годов XX в. концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере равнялась 315 ppm, а к 2000 г. она достигла 368 ppm [4]. 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 [6]. Результаты анализа климатических временных рядов показывают, что среднегодовая температура на континентах в XX в. выросла на 0.7–1.6° [7, 12]. За это время на территории Европейской России, в том числе Волжского бассейна, средняя годовая температура воздуха выросла в среднем на 0.9–1.1°. В то же время годовое количество осадков здесь в течение XX в. почти не изменилось [16, 19]. Однако есть данные, что за последний 24-летний период этого столетия (1967–1990 гг.) оно выросло на 30% [3].

В свете изложенного все большую актуальность приобретает проблема прогнозирования наиболее вероятных, в том числе негативных, экологических последствий предстоящих глобальных изменений климата. Особое внимание привлекает

предстоящие климатогенные изменения хвойных и широколиственных маргинальных лесов, находящихся в южной полосе бореального пояса, где лесные сообщества уже в настоящее время находятся в состояниях, близких к критическим, и должны в первую очередь реагировать на неблагоприятные климатические изменения.

Разработанная нами система теоретических (расчетных) и ретроспективных (палеогеографических) прогнозных моделей природных экосистем [8, 10] позволила установить закономерности функциональных и структурных сдвигов зонально-региональных и локальных природных комплексов при глобальных климатических изменениях. Однако верификация этих моделей остается проблематичной задачей и до сих пор не найдены пути ее решения. В настоящем сообщении изложены результаты изучения реакции лесных экосистем одного из регионов Среднего Поволжья на межгодовые колебания метеорологических условий, которые могут в определенной степени имитировать многолетние (внутривековые и вековые) изменения климата. Погодичные метеорологические аномалии предоставляют своего рода окошки в будущие климатические ситуации, когда та или иная аномалия может стать многолетней нормой. Речь идет, таким образом об эмпирической имитации функционального отклика лесных гео(эко-)систем на длительнопериодные колебания климата.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 110-05-00575-а

**Таблица 1.** Сопоставление климатических параметров и запасов продуктивной влаги в почве открытого участка (луг) по ст. Выкса 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).

**Предпосылки научного поиска и объекты исследования.** Эмпирически было установлено, что основной пропускной канал связей региональных и локальных гео(эко-)систем с климатом проходит через летнее влагосодержание почвы, которое, с одной стороны, служит достаточно надежным геофизическим индикатором состояния систем, а с другой, – является наиболее сильным экологическим фактором, который определяет их территориальную организацию [8, 10]. Для лесных экосистем Волжского бассейна 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:

$$\begin{aligned} (W-20) &= \exp[2,281 + 0.8068K_{увл}]; \\ R &= 0.83; \quad R^2 = 0.69; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} (W-50) &= \exp[2.622 + 1.071K_{увл}]; \\ R &= 0.89; \quad R^2 = 0.79; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} (W-100) &= \exp[3.225 + 1.134K_{увл}]; \\ R &= 0.88; \quad R^2 = 0.77. \end{aligned} \quad (3)$$

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

$$\begin{aligned} K_{увл} &= 12.09 - 0.9095t_{июль} + 0.01744t_{январь}^2; \\ R &= 0.94; \quad R^2 = 0.88. \end{aligned} \quad (4)$$

С другой стороны, распределение лесных экосистем достаточно тесно связано с летним влагосодержанием почвы. Так, неморальные леса Среднего Поволжья имеют информационные коэффициенты сопряженности, по [17], с параметрами ( $W-20$ ), ( $W-50$ ) и ( $W-100$ ) соответственно

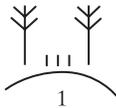
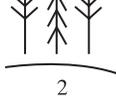
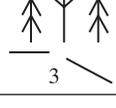
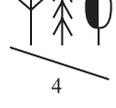
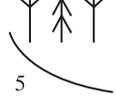
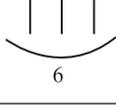
0.154–0.173, 0.128–0.162 и 0.139–0.200. Это существенно превышает критический порог значимости связей – 0.070 [10, 11].

Следует отметить, что временной лаг функционального прогноза достаточно мал. Обусловленные климатическими изменениями сдвиги в темпах продуцирования фитомассы, занимают в таежной зоне первые несколько лет, а в подзоне неморальных лесов – не более одного года [10]. Столь же быстро меняются и скорости разложения подстилки, хотя общая продолжительность пребывания углерода в лесной подстилке, мертвой древесине (скелетной массе), и лабильном гумусе почвы занимает до нескольких десятков лет [5, 20].

Объектом исследования послужила северная часть территории Окско-Мокшинского полесья, по низменному правобережью нижней Оки (юго-запад Нижегородской обл., Выксанский район). Район находится у северной границы подзоны широколиственных лесов, что подтверждается его основными климатическими характеристиками (табл. 1, см. также [10]). Однако почвенно-растительный покров здесь нетипичен для неморальной подзоны. Литолого-гидрологические факторы: наличие песчаных отложений и слабый в целом дренаж, – обуславливают преобладание хвойнолесных биогеоценозов с господством сосны (табл. 2). Здесь отчетливо выражено известное явление взаимозаменяемости климатических и литогенных экологических факторов: в северной полосе суббореального пояса песчаный субстрат имитирует бореальные условия – подтайги или даже южной тайги.

Вместе с тем, сосновые леса Окско-Мокшинского полесья имеют более южный характер по сравнению с сосняками подтаежной зоны. Это находит отражение, прежде всего, во флористическом составе напочвенного покрова, для которого

**Таблица 2.** Группы ландшафтных фаций района исследований (ст. в тексте) 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 (трансэлювиальные и элювиальные), с рыхлопесчаными дерново-подзолистыми слабо- и средне-дерновыми, иногда иллювиально-железистыми почвами	 1
2. Мезо-ксероморфные сосняки и елово-сосновые леса, майниково-брусничные на супесчано-песчаных склонах и полого-волнистых водоразделах (транзитные реже элювиальные и транс-элювиальные), с дерново-подзолистыми мелко- и среднеподзолистыми слабо-дерновыми супесчаными и связнопесчаными почвами, иногда подстилаемыми суглинком	 2
3. Мезоморфные и гидро-мезоморфные ельники и елово-сосновые леса, кисличные и кислично-моховые на полого-волнистых водоразделах их склонах (элювиальные и транзитные), с дерново-подзолистыми средне- и глубоко-дерновыми супесчаными и легкосуглинистыми почвами, с близким залеганием суглинка	 3
4. Гидро-мезоморфные и мезо-гидроморфные сосново-еловые (с липой) и дубово-сосново-еловые леса, неморальнотравяные (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	 4
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	 5
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	 6

характерен значительный процент южноборовых и лугово-степных видов, а также в повышенной продуктивности лесных сообществ, особенно на влажных местообитаниях.

Задача исследований состояла в том, чтобы на примере данной модельной территории выявить истоки и механизмы функциональных сдвигов лесных биогеоценозов в различные по климатическим параметрам годы. Такими оказались 1989 и 1990 гг., когда на экспериментальном полигоне Выкса в первых декадах июня были проведены крупномасштабные ландшафтно-экологические съемки (см. [10, 11]).

Первый (1989) год отличался общей положительной термической аномалией и относительной сухостью (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 многолетнему значению, 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  $K_{увл} = 0.76-1.03$  [8, 9]. Таким образом, по данному гидрологическому году был отчетливо выражен *термоаридный климатический сигнал*. При этом снижение запасов почвенной влаги определялось почти исключительно сдвигами в температурном режиме почвы.

Во второй (1990) год имела место, наоборот, весьма резкая пловивальная аномалия на фоне несколько более теплой зимы и умеренного летнего сезона (табл. 1). Годовое количество осадков превысило многолетнюю норму более чем на 65%. На такую же величину вырос  $K_{увл}$ , что

при относительно малой испаряемости не могло не вызвать общего увеличения весенне-летнего влагосодержания почвы. В данном году ярко проявился гумидный климатический сигнал, с почти 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  $K_{увл} = 1.62-1.88$  [8].

На территории экспериментального полигона было выделено шесть фациальных 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 транзювиальным (ТЭ) типам, далее через транзитные (Т) и трансаккумулятивные (ТА) типы до аккумулятивных (А) и супераккумулятивных (Саq). Эмпирическая информация, собранная на 32–35 пробных площадях (по каждой съемке), включала около 80 характеристик структурно-функционального состояния лесных экосистем [10]. Поскольку повторные исследования (1990 г.) проводились на новых пробных площадях, для последующего сравнительного анализа использовались осредненные данные по группам-аналогам изученных лесных участков.

**Методы анализа.** Схема, иллюстрирующая последовательность эмпирического имитационного моделирования, представлена на рис. 1. Для интерпретации почвенно-геофизических данных ландшафтно-экологических съемок использованы материалы Подмосковной водно-балансо-

вой станции, а также агрометстанций Нижний Новгород, Муром и Ардатов. Предварительная термо- и гидроэдафическая ординация метаболитических характеристик показала [10], что эти характеристики имеют наиболее тесные связи с двумя геофизическим параметрам: температурой почвы на глубине 50 см ( $t_{50}$ ) и запасами летней продуктивной влаги в слое почвы 0–50 см ( $W-50$ ). Эти корреляции не всегда достаточно высоки, однако вполне значимы (критерий значимости Пирсона  $P \ll 0.05$ ). При слабой связи последнюю можно интерпретировать как некоторую общую тенденцию изменений данного метаболитического параметра под влиянием геофизического тренда.

Поскольку многолетние нормы влагосодержания почвы известны больше для полевых (луговых) участков агрометстанций ( $W-50$ )<sub>луг</sub>, цепочка расчетных процедур включала неоднократные переходы от лесных влагозапасов ( $W-50$ )<sub>лес</sub> к луговому и обратно – как для данного ( $i$ -го) года, так и для многолетней нормы. Эти переходы осуществлялись по эмпирическим зависимостям (материалы водно-балансовой станции):

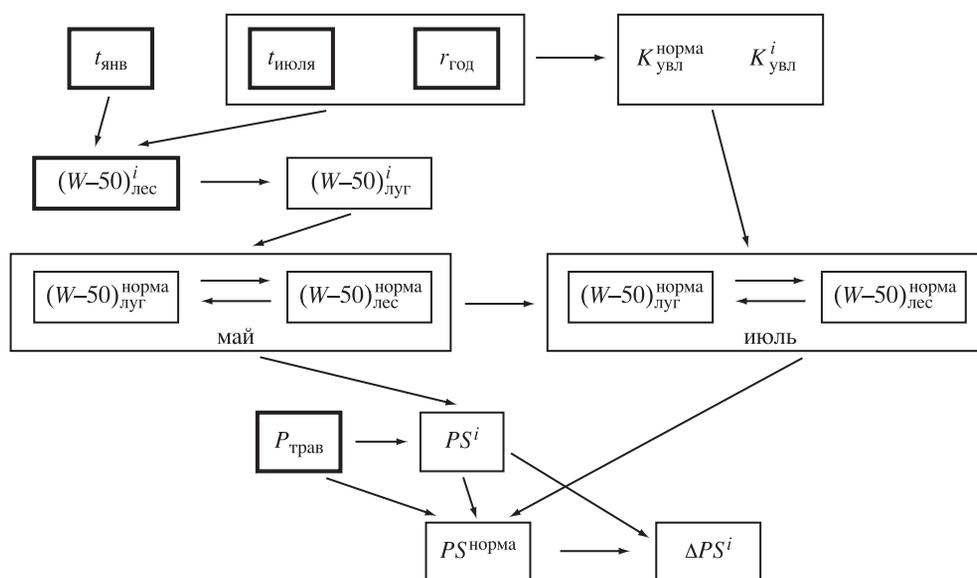
$$(W-50)_{луг} = 0.978 \cdot (W-50)_{лес} - 10.23; \quad (5)$$

$$(W-50)_{лес} = 1.4 + 0.996 \cdot (W-50)_{луг}. \quad (6)$$

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

$$a) (W-50) = \exp[2.425 + 1.11 \cdot K_{увл}^i];$$

$$R = 0.905; \quad R^2 = .828; \quad (7)$$



**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.

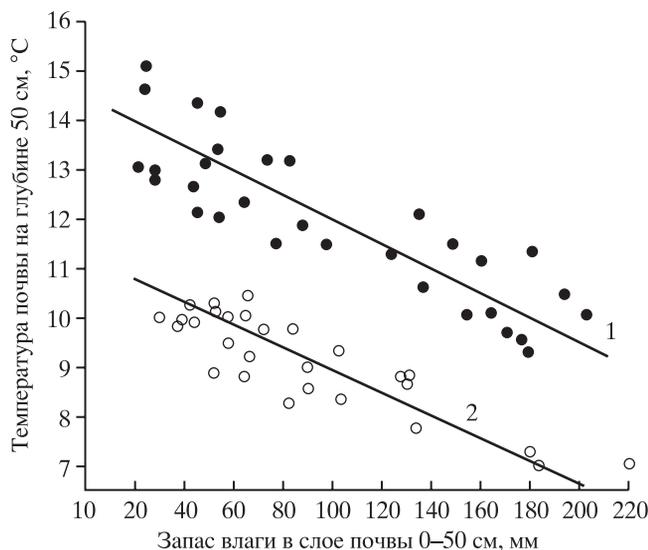


Рис. 2. Корреляционные связи влагосодержания и температуры почвы в периоды ландшафтно-экологических съемок. Годы: 1 – 1989; 2 – 1990.

$$\text{б) } (W-50) = \exp[2.099 + 1.355 \cdot K_{\text{увл}}];$$

$$R = 0.921; \quad R^2 = 0.848; \quad (8)$$

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

$$(W-50)_{\text{июль}} = 0.8107 \cdot (W-50)_{\text{май}} - 17.64;$$

$$R = 0.836; \quad R^2 = 0.699. \quad (9)$$

Разница в  $t_{50}$  между 1989 и 1990 гг. для одного и того же влагосодержания почвы ( $W-50$ ) составляет 3.0–3.2° (рис. 2). Эта цифра приближается к разности между среднеянварскими температурами воздуха в эти годы по ст. Выкса – 3.5° (см. табл. 1).

Поправочные коэффициенты, полученные при сопоставлении (по данным агрометстанций) средних многолетних весенне-летних запасов почвенной влаги и запасов влаги в год проведения съемок на данном полигоне, 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 ( $W-50$ ) (рис. 2) поправочный коэффициент 1.18 был применен также при расчете многолетней нормы температуры почвы.

В процедуре расчетов использованы три исходных эмпирических параметра: 1) запасы продуктивной влаги в почве в весенне-летний период (первая декада июня) на экспериментальном полигоне, а также по данным агрометстанций на

этот период в среднем многолетней режиме и в годы проведения съемок; 2) непосредственно измеренная зеленая масса травянистого покрова (в воздушно сухом состоянии) в лесу на пробных площадях полигона; 3) коэффициенты увлажнения, рассчитанные по данным ст. Выкса для  $t_{\text{июля}} < 19.5^\circ$  (а) и  $t_{\text{июля}} > 19.5^\circ$  (б) [8]:

$$\text{а) } K_{\text{увл}} = 0.001726 \cdot r_{\text{год}} - 0.1954 \cdot t_{\text{июля}} + 3.72;$$

$$R = 0.95; \quad R^2 = 0.90; \quad (10)$$

$$\text{б) } K_{\text{увл}} = 0.001362 \cdot r_{\text{год}} - 0.1069 \cdot t_{\text{июля}} + 2.25;$$

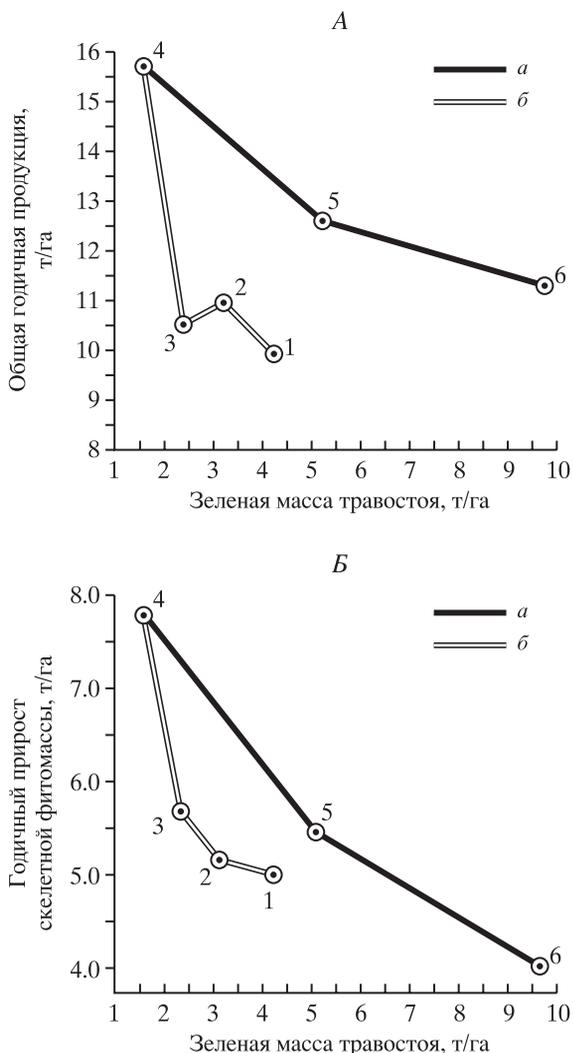
$$R = 0.96; \quad R^2 = 0.92. \quad (11)$$

В первом случае это был 1989 гидрологический год, во втором – 1990 г.

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 годичном 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, по [15].

**Индикация годичного прироста древесины по зеленой массе травостоя.** В целом по фациальным группам производство надземной массы травянистого покрова находится в обратно пропорциональной связи как с продуктивностью древесины, так и с общей годичной продукцией леса (рис. 3). Это означает, что если при увеличении весенне-летнего влагосодержания почвы надземная травянистая массы возрастает, то производство всех остальных частей фитомассы, 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 древесно-кустарниковой фитомассы (надземной + корневой) и рассчитать изменения стока углерода в фитоценоотическом пуле лесной гео(эко-)системы.

Для осуществления такой индикации необходимо было установить зависимость параметра  $P_{\text{трав}}$  от гидротермических условий почвы. Связи в целом оказались слишком “размытыми” при



**Рис. 3.** Корреляционные связи зеленой массы травянистого покрова с общей продуктивностью лесных экосистем (А) и годичным приростом скелетной фитомассы (Б). Звенья локальных ландшафтных сопряжений: а – верхние и средние (типы местоположений Э, ТЭ и Т); б – нижние (типы ТА, А и Саq). Пояснения в тексте.

“лобовом” континуально-статистическом анализе. Так, для модели Выхса-89 было получено:

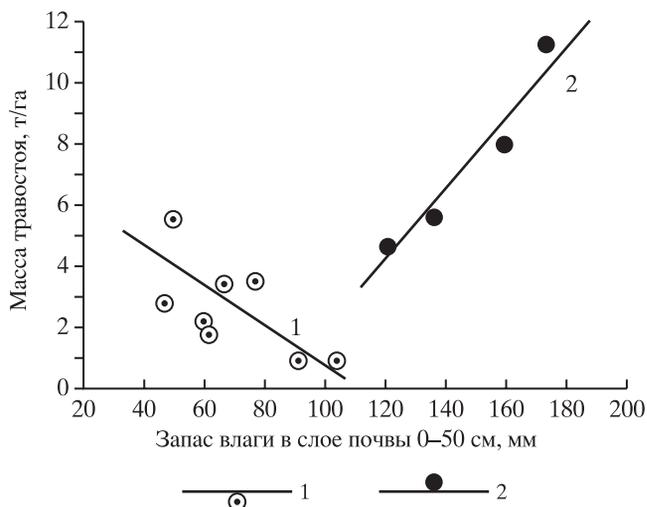
$$P_{\text{трав}} = 143.2 - 21.06 \cdot t_{50} + 0.791 \cdot t_{50}^2; \\ R = 0.454; R^2 = 0.206; \quad (12)$$

$$P_{\text{трав}} = 2.386 + 0.223 \cdot (W-50); \\ R = 0.329; R^2 = 0.108. \quad (13)$$

Модель Выхса-90 имела следующую парциальную связь:

$$P_{\text{трав}} = 5.43 - 0.077 \cdot (W-50) + 0.791 \cdot (W-50)^2; \\ R = 0.408; R^2 = 0.166. \quad (14)$$

Множественная корреляция по обеим моделям была вообще недостоверной. Согласно уравнениям



**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”).

(13) и (14), 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 катены выявляется и обратная картина – с отрицательной связью указанных параметров. Рассмотрим эти закономерности более подробно. При этом разделим каждую генеральную совокупность пробных площадей на выборки, соответствующие положению биогеоценозов в системе их катенарной дифференциации, то есть используем дискретно-статистический подход, оперируя (в целях получения упрощенной картины связей) осредненными по каждой выборке значениями функциональных параметров.

Система локальных ландшафтных сопряжений на полигоне отчетливо дифференцируется на два “этажа”, которые различаются по знаку корреляционной связи массы травостоя  $P_{\text{трав}}$  с параметром ( $W-50$ ). В верхний этаж, охватывающий наибольшие площади, входят Э (плакорные), ТЭ и Т типы МП, к которым приурочены 1–4 группы биогеоценозов (ГБ, рис. 3). Здесь выражена обратно пропорциональная связь  $P_{\text{трав}}$  с влагосодержанием почвы (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 ТА, А и Саq типы МП, с избыточным эдафиче-

ским увлажнением (ГБ 5 и 6), развитие древостоя и кустарников 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 (рис. 4).

Ранее было установлено [9, 11], что задровые полесья Среднего Поволжья на зональной границе подтайги и широколиственных лесов находятся в условиях атмосферного увлажнения от недостаточного до слабо избыточного ( $K_{\text{увл}} = 0.94-1.12$ ). Недостаток атмосферной влаги сказывается, прежде всего, на лесных сообществах наиболее дренированных типов МП, относящихся к верхнему этажу катен. По этой причине любое увеличение гидроморфности почв 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 этапе продуктивности травянистого покрова рост атмосферного (а с ним и эдафического) увлажнения ведет к еще большему снижению этой продуктивности.

Обрисованная закономерность проявляется также в пространственных связях  $P_{\text{трав}}$  с общей годичной продуктивностью ( $PC$ ) лесных сообществ, а также с продуктивностью ( $PS$ ) их древесной массы (рис. 3). Здесь прослеживаются два аналогичных катенарных этапа. В системе переходов в катене:  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$  снижение массы травостоя сопровождается повышением параметров  $PC$  и  $PS$ , особенно резким в интервале переходов от ТЭ местоположений к транзитным на ровных склонах междуречий. При дальнейших же переходах к местоположениям ТА–А и Саq, уже на нижнем этапе катены, значительное увеличение травянистой зеленой массы соответствует столь же резкому сокращению годичного прироста древесно-кустарниковой фитомассы и снижению суммарной продуктивности леса. Исходя из этого принято, что уменьшение зеленой травянистой массы в рассматриваемый летний сезон по сравнению с многолетней нормой будет адекватно (в процентном отношении) увеличению параметров  $PC$  и  $PS$  и – наоборот.

**Эмпирическая имитация экологических последствий климатических изменений.** Сдвиги в гидротермическом режиме и функционировании лесных экосистем под действием того или иного гидротермического сигнала достаточно четко дифференцируются по типам местоположений и

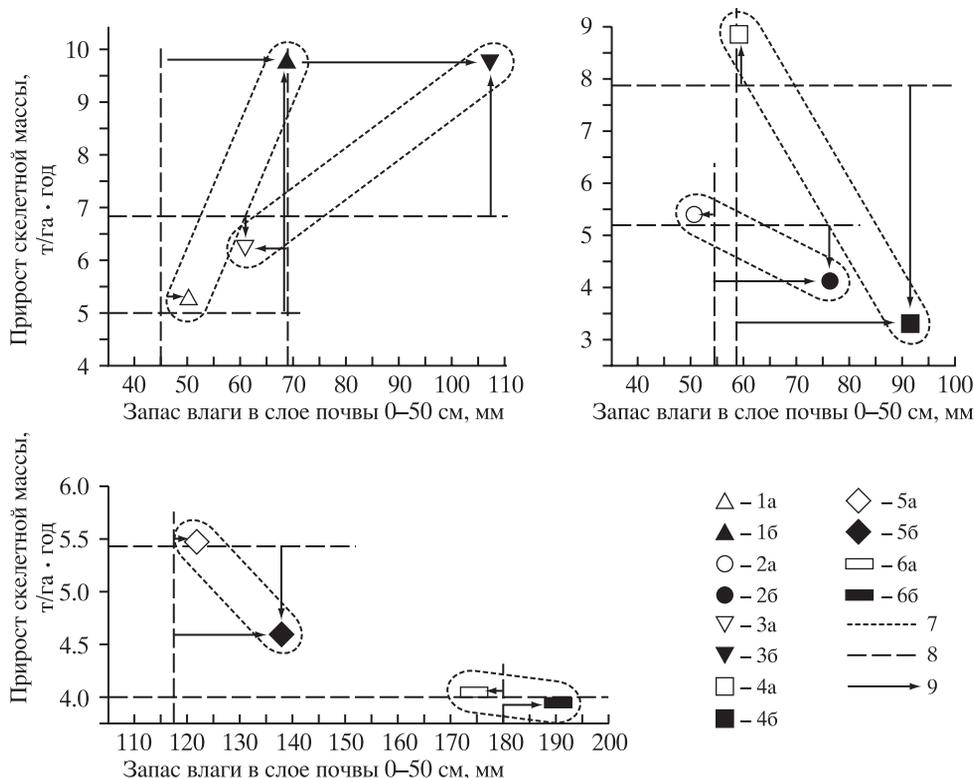
группам типов леса, в результате чего формируется целый спектр реакций лесных биогеоценозов на этот сигнал (рис. 5).

**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 ТЭ и Э местоположений (группа биогеоценозов 3): ( $W-50$ ) = 68  $\rightarrow$  61 мм. В остальных случаях  $\Delta(W-50) \leq 5$  мм, что не выходит за пределы самих измерений влагосодержания почвы. Тем не менее, можно отметить некоторое весенне-летнее иссушение заболоченных супераквальных лесов, а также мезо-ксероморфных сосняков, с елью, на полого-волнистых водоразделах (ГБ 6 и 2).

Температура почвы была на 2.1–2.4° выше многолетней весенне-летней нормы, однако это повышение частично нейтрализовалось дополнительным количеством осадков (табл. 1), поэтому сама температурная составляющая термо-аридного сигнала оказалась мало эффективной. В результате отклонения от средней многолетней нормы общей годичной продукции лесных сообществ и соответственно депонирования углерода в их скелетной массе имели в целом низкие, хотя и почти повсеместно положительные значения (рис. 5 и табл. 3). Содержание углерода  $B_C$  в живой древесной массе наиболее отчетливо увеличилось в транзитных дубово-сосново-еловых лесах (ГБ 4). Здесь оно могло составить 4.45 т/га, с превышением нормы на 14%. Гораздо слабее рост углеродного стока был выражен в ксероморфных и мезо-ксероморфных водораздельных (ТЭ и Э) сосняках (ГБ 1). Зеленая же масса травостоя здесь имела наибольшие положительные отклонения от нормы: 4.4  $\rightarrow$  5.5 т/га. Сток углерода практически не изменился на нижнем этапе катен – в переувлажненных мелколиственно-елово-сосновых лесах. Термическая составляющая климатического сигнала работала здесь слабо.

На этом фоне исключение составили элювиально-транзитные ельники-кисличники, где произошло уменьшение  $B_C$  в среднем на 9–10% (до 6.23 т/га), что было вызвано 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



**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: *a* – термо-аридный (модель Выхса-89); *б* – гумидный (модель Выхса-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.

углеродном балансе, если оно не сопровождается достаточным понижением или повышением самого атмосферного увлажнения. Данный эмпирический вывод подтверждает высказанное нами ранее [8] положение о том, что “смягчение” зимы не может служить решающим фактором сдвигов в функционировании и структуре гео(эко-)систем.

**Гумидный климатический сигнал** (модель Выхса-90) оказал гораздо более значительное воздействие на функциональное состояние лесных сообществ при сравнении 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 дефицит влаги выражен в наибольшей степени. При этом решающую роль сыграло значительное повышение весенне-летнего влагосодержания почвы (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, усилился сток углерода в древесную фитомассу. Динамика стока здесь имела следующий вид:  $B_C(1) = 2.50 \rightarrow 4.92$  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 термоаридных условиях. Это свидетельствует о незначительной роли отключений термической составляющей данного климатического сигнала в локальных условиях изначально повышенного дефицита влаги.

Однако при умеренном и ослабленном дренаже картина совершенно иная. Резкое сокращение стока углерода из атмосферы в скелетную фитомассу произошло в слабо дренируемых неморально-травяных дубово-сосново-еловых лесах ТА и А местоположений, то есть на пологих склонах и у подножий (ГБ 4). Здесь средние изменения (*W-50*) составили 71 мм → 107 мм, что сопровождалось снижением температуры почвы (рис. 2). Это привело к значительному ослаблению автотрофного

**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)					
		 1	 2	 3	 4	 5	 6
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.

биогенеза и соответственно – к уменьшению  $B_C$  с 3.90 до 1.68 т/га.

Значительно меньшую потерю углеродного депозита испытали элювиальные мезо-ксероморфные майниково-брусничные сосняки с елью на пологоволнистых междуречьях (ГБ 2), а также аккумулятивные долгомошно-черничные сосново-еловые леса полого вогнутых 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 Saq 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. Можно говорить лишь о незначительном снижении здесь депозита углерода.

Критическое значение весенне-летнего влагосодержания почвы, при котором приращение углеродного депозита в древесине лесов сменяется его убылью, существенно зависит от формы микрорельефа, которая определяет степень дренажа и температурный режим данного местоположения. Так, в более дренируемых ельниках-кисличниках волнистых водоразделов увеличение  $B_C$  продолжалось вплоть до значений ( $W-50$ )  $\approx 110$  мм, между тем как в широколиственно-хвойных неморальнотравяных 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 эдафического 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.

Выявляется 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. Положительная динамика стока углерода свойственна тем лесам, где гумидный сигнал ликвидирует изначальный дефицит почвенно-грунтовой влаги, при индифферентной роли температурного режима. В условиях же нормального и тем более избыточного начального увлажнения дальнейший рост влагосодержания почвы сопровождается снижением ее температуры, вызывая отрицательную динамику стока углерода.

**Региональные сценарии изменения первичной биопродуктивности в системе фоновых климатических колебаний.** Полученные связи параметра  $PC$  с гидротермическими условиями

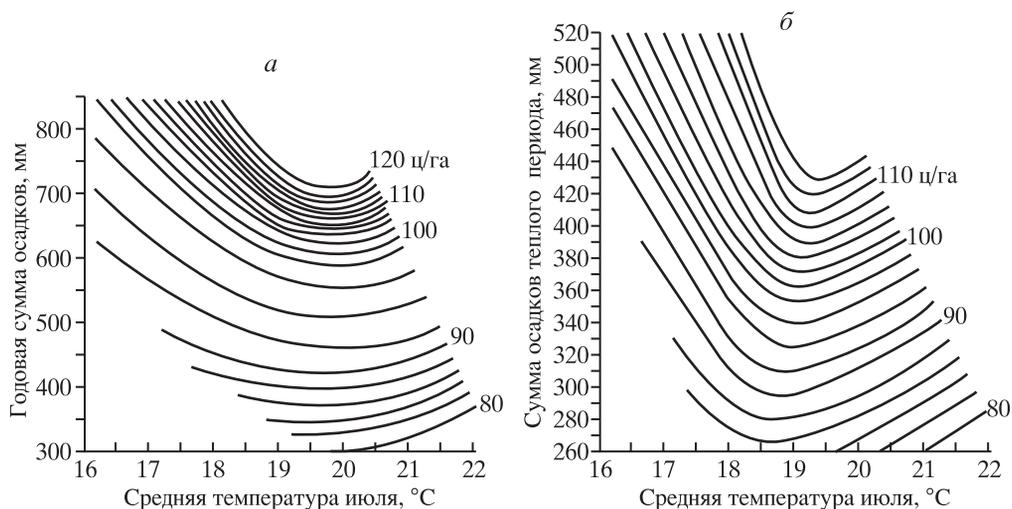


Рис. 6. Зависимости первичной биопродуктивности от средней температуры июля и количества осадков – годовых (а) и теплого периода (б).

(через посредство  $P_{\text{трав}}$ ) позволяют провести его региональный сценарный анализ для различных вариантов гидротермического тренда. Обратимся к номограммам зависимостей фоновой биопродуктивности от основных климатических характеристик:  $t_{\text{июля}}$ , годового количества осадков  $r_{\text{год}}$  и суммы осадков теплого периода  $r_{\text{тп}}$  (рис. 6). Для построения каждой номограммы использованы климатические нормы по 120 метеостанциям Волжского бассейна и его окружения, с соответствующими пунктами эмпирических и расчетных данных по первичной биопродуктивности [8, 9].

На номограммах отчетливо видна резкая смена знака связей в диапазоне  $t_{\text{июля}} = 19\text{--}20^\circ$ , причем для годового количества осадков критическое значение  $t_{\text{июля}} \approx 19.5^\circ$ . При  $t_{\text{июля}} < 19.5^\circ$  рост летней температуры сопровождается уменьшением осадков, а при  $t_{\text{июля}} > 19.5^\circ$  – их увеличением. С переходом через критическую температуру меняется сама гидротермическая структура коэффициента увлажнения (см. формулы 10 и 11). Оказалось, что изолинии критической  $t_{\text{июля}}$  проходит на Восточно-Европейском субконтиненте в полосе перехода от бореального пояса к суббореальному [1, 11] и во многих местах сближается с Главным ландшафтным рубежом Русской равнины, по [13]. В этой сравнительно узкой переходной полосе, происходят резкие изменения в природных экосистемах зонального типа, обусловленные важнейшим климатическим рубежом – переходом  $K_{\text{увл}}$  через 1. Бореальный пояс отличается от северной (лесостепной и степной) части пояса суббореального по характеру миграции веществ (преимущественно абиотической в первом случае и биогенной – во втором), по типу фонового

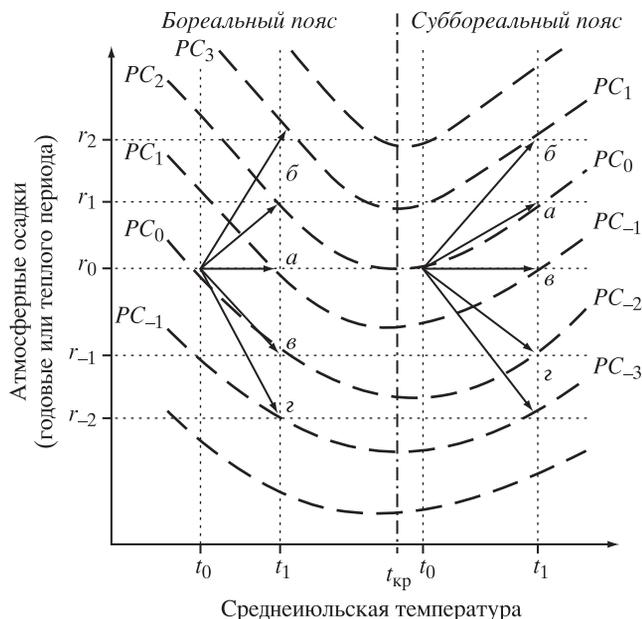
процесса почвообразования (соответственно подзолистого и дернового), наконец, по запасам органического вещества и первичной биопродуктивности [1].

Исходя из эмпирических номограмм (рис. 6) и используя эргодические свойства климатической системы [18], удалось получить модельные представления об изменениях продуктивности при повышении среднеиюльской температуры  $t$  с шагом ( $t_0 \rightarrow t_1$ ) и одновременном изменении количества осадков  $r$  (рис. 7). Учитывалось, что потепление может сопровождаться как увеличением осадков ( $r_0 \rightarrow r_1 \rightarrow r_2 \rightarrow \dots$ ), так и их уменьшением ( $r_0 \rightarrow r_{-1} \rightarrow r_{-2} \rightarrow \dots$ ). Рассмотрим модельные ситуации соотношений рассматриваемых параметров ( $\Delta t$ ,  $\Delta r$  и  $\Delta PC$ ) отдельно для каждого биоклиматического пояса, привлекая примеры из данных на рис. 6. Подчеркнем, что эти ситуации относятся главным образом к зональным (и подзональным) типам (и подтипам) растительного покрова, локальными представителями которых являются биогеоценозы элювиального (плакорного) ряда.

В **бореальном поясе** при повышении средней температуры июля ( $+\Delta t = t_1 - t_0$ ) возможны следующие сценарии:

а) если количество осадков остается неизменным ( $\Delta r = 0$ ), первичная биопродуктивность растет, хотя и сравнительно мало ( $+\Delta(PC) = PC_0 \rightarrow PC_1$ ); например, в диапазоне  $r_{\text{год}} = 700\text{--}800$  мм рост  $t_{\text{июля}}$  на  $1^\circ$  ( $17^\circ \rightarrow 18^\circ$ ) дает прибавку продуктивности в 6–9 ц/га, а при годовых осадках 570–630 мм эта прибавка не превышает 2–3 ц/га;

б) гораздо больший рост продуктивности бореальных лесов будет происходить при тер-



**Рис. 7.** Модельные представления динамики первичной биопродуктивности при различных вариантах изменений среднеиюльской температуры и количества осадков (годовых или теплого периода). Пояснения в тексте.

могумидном тренде, когда летнее потепление сопровождается прогрессирующим увеличением осадков ( $+\Delta r = r_0 \rightarrow r_1 \rightarrow r_2$ ;  $+\Delta(PC) = PC_0 \rightarrow PC_2 \rightarrow PC_3$ );

в) биопродуктивность может остаться на первоначальном уровне ( $\Delta(PC) = 0$ ), если с повышением температуры будет сокращаться количество осадков ( $-\Delta r = r_0 \rightarrow r_{-1}$ ), причем весьма значительно; тот же рост  $t_{июль}$  на  $1^\circ$  должен компенсироваться уменьшением годовой суммы осадков от 40–50 до 100–110 мм, а осадков теплого периода – до 80 мм;

з) в условиях явной термоаридизации, когда потепление сопровождается заметным сокращением атмосферной влаги ( $-\Delta r = r_0 \rightarrow r_{-1}$ ), продуктивность будет существенно падать ( $-\Delta(PC) = PC_0 \rightarrow PC_{-1}$ ).

**Суббореальному поясу** свойственны следующие сценарии:

а) относительно небольшое увеличение количества осадков ( $+\Delta r = r_0 \rightarrow r_1$ ) не вызывает сколько-нибудь заметного изменения первичной биопродуктивности ( $\Delta PC \approx 0$ ), несмотря на рост летней температуры; так, при  $\Delta t_{июль} = 1^\circ$  ( $20^\circ \rightarrow 21^\circ$ ) для сохранения первоначальной продуктивности необходимо увеличение  $r_{год}$  на 25–50 мм и  $r_{тп}$  – на 10–20 мм;

б) продуктивность может возрастать ( $+\Delta(PC) = PC_0 \rightarrow PC_1$ ) только при более значительном уве-

личении количества осадков ( $+\Delta r = r_0 \rightarrow r_2$ ), то есть в условиях существенного термогумидного тренда;

в) если повышение летних температур не сопровождается прибавкой атмосферной влаги ( $\Delta r \approx 0$ ), то начинает развиваться термоаридный тренд, вызывающий снижение первичной биопродуктивности ( $-\Delta(PC) = PC_0 \rightarrow PC_{-1}$ ); при неизменных годовых осадках в среднем на каждые  $1^\circ$  повышения  $t_{июль}$  приходится снижение продуктивности на 2–8 ц/га;

з) дальнейшее развитие термоаридного тренда, вызванное прогрессирующим сокращением осадков ( $-\Delta r = r_0 \rightarrow r_{-1} \rightarrow r_{-2}$ ) на фоне роста температур, ведет к еще большему падению биопродуктивности суббореальных лесов ( $-\Delta(PC) = PC_0 \rightarrow PC_{-2} \rightarrow PC_{-3}$ ).

Таким образом, бореальный и суббореальный пояса даже вблизи разделяющей их границы резко отличаются друг от друга по реакции основного функционального параметра лесных экосистем – их первичной продуктивности на фоновые климатические колебания. Отмеченные закономерности, выявленные ранее качественным анализом [1, 9], находят определенную количественную интерпретацию, с раскрытием детальных механизмов экологических связей и зависимостей.

**Закключение.** Эмпирическая имитация экологических последствий климатических изменений позволила выявить конкретные сдвиги в гидротермическом режиме и первичной продуктивности лесных экосистем под действием двух альтернативных атмосферных гидротермических сигналов. В полосе зонального перехода от смешанных к широколиственным лесам гумидный климатический сигнал оказывает более эффективное и разнообразное воздействие на функциональное состояние лесных экосистем, нежели сигнал термоаридный. Соответственно в первом случае возникает более ярко выраженная и территориально более контрастная картина изменений стока углерода в живую древесную фитомассу, играющую, как уже было показано ранее [10], решающую роль в углеродном балансе лесных экосистем.

На основе выявленных биоклиматических связей даны региональные сценарии изменений первичной биопродуктивности при различных климатических трендах и установлены количественные показатели, характеризующие известный “экологический” перелом в зоне перехода от бореального пояса к поясу суббореальному.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базилевич Н.И., Гребенчиков О.С., Тишков А.А.* Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. М.: Наука, 1986. 297 с.
2. *Глазовская М.А.* Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1964. 230 с.
3. *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.
4. Изменение климата, 2001 г. Обобщенный доклад МГЭИК / Д. Л. Албриттон, Т. Баркер, И. Башмаков и др. / Под ред. Уотсона Р.Т. Geneva: World Meteorological Organization, 2003. 220 p.
5. *Исаев А.С., Коровин Г.Н.* Углерод в лесах Северной Евразии // *Круговорот углерода на территории России*. НТП “Глобальные изменения природной среды и климат”. М.: Мин-во науки и технологий РФ, 1999. С. 63–95.
6. *Кислов А.В.* Изменения и изменчивость глобального климата // *Современные глобальные изменения природной среды*. Т. 1. М.: Научный мир, 2006. С. 118–129.
7. *Клиге Р.К.* Глобальные гидроклиматические изменения // *Глобальные и региональные изменения климата и их природные и социально-экономические последствия*. М.: ГЕОС, 2000. С. 6–23.
8. *Коломыц Э.Г.* Региональная модель глобальных изменений природной среды. М.: Наука, 2003. 371 с.
9. *Коломыц Э.Г.* Бореальный экотон и географическая зональность. Атлас-монография. М.: Наука, 2005. 390 с.
10. *Коломыц Э.Г.* Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. М.: Наука, 2008. 427 с.
11. *Коломыц Э.Г., Юнина В.П., Сидоренко М.В., Воронников В.П.* Экосистемы хвойного леса на зональной границе. Организация, устойчивость, антропогенная динамика. Нижний Новгород: Ин-т экологии Волж. бассейна РАН, 1993. 346 с.
12. *Кондратьев К.Я., Демирчян К.С.* Глобальные изменения климата и круговорот углерода // *Изв. Русск. географич. об-ва*. 2000. Вып. 4. С. 1–20.
13. *Мильков Ф.Н.* Физическая география: современное состояние, закономерности, проблемы. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1981. 398 с.
14. *Общесоюзные нормативы для таксации лесов*. Справочник / Ред. Загребеев В.В., Сухих В.И., Швиденко А.З., Мошкалев А.Г. М.: Колос, 1992. 495 с.
16. *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.
17. *Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С.* Структура растительности лесной зоны СССР: Системный анализ. М.: Наука, 1981. 275 с.
18. *Раунер Ю.Л.* Климат и урожайность зерновых культур. М.: Наука, 1981. 163 с.
19. *Состояние и комплексный мониторинг природной среды и климата. Пределы изменений / Отв. ред. Израэль Ю.А.* М.: Наука, 2001. 242 с.
20. *Экосистемы теллермановского леса / Отв. ред. Осипов В.В.* Институт лесоведения РАН. М.: Наука, 2004. 340 с.

## Modelled Scenarios of Changes of Forest Ecosystem Productivity and Carbon Accumulation under Climate Fluctuations

E.G. Kolomyts, N.A. Surova

*Institute of Ecology of the Volga River Basin, RAS*

This article presents the results of studying the functional response of forest ecosystems in one of the ecoregions of the Middle Volga area on the inter-year change in meteorological conditions, which may to a certain degree simulate multi-year (intra-century and century-long) climatic changes. The procedure of empirical simulation using generalized thermo-hydro-edaphic and production parameters of local ecosystems was developed. The two alternative climatic signals (thermo-arid and humid) were considered. It was shown that the humid signal more effectively and diversely influences the functional state of forest ecosystems and carbon accumulation in the forest compared to the thermo-arid signal. Regional scenarios for primary productivity of forest ecosystems under various climate trends are presented as well.