

Шведовский П.В., Лукаш В.В.

## ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АГРО- И ЭКОСИСТЕМ МЕТОДОМ ПРОГНОЗОВ РАЗВИТИЯ БИОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

В настоящее время теория и методы моделирования функционирования агро- и экосистем через взаимодействие вещественно-энергетических параметров среды и факторов формирования геоландшафтных систем, с учетом их возможных переходов в различные состояния через главные связи короткого цикла, либо длительного цикла и второстепенные связи, достаточно хорошо разработана [1, 2, 3, 4].

Однако, большинство этих моделей фрагментарны, что и определяет актуальность исследований особенностей моделирования функционирования агро- и экосистем через прогноз хода и направления развития основных биосферных процессов в трех аспектах:

- эколого-биологическом, определяющем техногенное изменение параметров среды;
- эколого-экономическом, обуславливающим возможность истощения и деградации природных ресурсов;
- социально-политическом, характеризующем эффективность мониторинга и законодательства в области охраны биосферных комплексов и их компонент.

Известно, что стохастическими дифференциальными уравнениями типа

$$dx = \mu(x(t), t)dt + \sigma(x(t), t)dw(t), \quad x(0) = x_0, \quad (1)$$

где  $\mu$  и  $\sigma$  – математическое ожидание и дисперсия процесса  $x(t)$ ,  $w(t)$  – стохастически независимый винеровский процесс, которыми, в принципе, могут быть описаны модели большинства биосферных и социально-экономических процессов, реализующихся по одному из следующих типов: случайного блуждания (а); линейных с проявлением увеличивающейся неопределенности (б); экспоненциальных с проявлением увеличивающейся неопределенности (в); стабилизирующихся (регулируемые) с тенденцией возвращения к среднему (рис. 1).

Стохастические уравнения для описания процессов с вышеуказанными типами реализаций имеют соответственно вид

$$\left. \begin{aligned} dx &= \mu(t)dt + \sigma(t)dw(t) \\ dx &= \mu dt + \sigma dw(t) \\ dx &= \alpha \cdot x \cdot dt + \sigma \cdot x \cdot dw(t) \\ dx &= k(\mu - x)dt + \sigma \cdot x^\gamma dw(t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При этом для первого типа процесса характерны независимые случайные приращения и нормальное распределение вероятностей с нулевым математическим ожиданием ( $\mu$ ) и дисперсией ( $\sigma$ ), для второго – нормальное распределение с условным средним  $x(t) + \alpha(T - t)$  и стандартным отклонением –  $\sigma\sqrt{T - t}$ , для третьего – логнормальное распределение с условным средним –  $\ln(x(t)) + \alpha(T - t) - 0,5 \cdot \sigma^2(T - t)$  и стандартным отклонением –  $\sigma\sqrt{T - t}$ , для четвертого – нормальное распределение с условным средним –

$(x(t) - \mu) \cdot \exp[-k(T - t)] + \mu$  и дисперсией –  $[\sigma^2 / (2k)](1 - \exp[-2k(T - t)])$ .

Такая представимость обуславливает возможность описания этих процессов с помощью построения триномиального дерева с альтернативами – процесс ветвления предрасположен к изменениям от узла к узлу, а вероятность на ветвях различна в различных частях дерева.

Альтернативы процесса ветвления показаны на рис. 2.

На рис. 2 представлены нормальные процессы ветвления, т.е. с отсутствием изменений величины  $x$  или с изменениями ее на постоянную величину  $\pm \Delta x$  (а); однонаправленные с изменениями на переменные величины  $\pm 2\Delta x$ ,  $\pm 3\Delta x$  (б и в); экстремальные – с изменениями на переменные величины  $\pm 4\Delta x$ ,  $\pm 5\Delta x$  и т.д. (г и д).

Как показывают исследования [5, 6] значительная часть как региональных гео- и экосистем, так и агросистем может быть смоделирована через системы симметрично ветвящиеся централизованного действия с простыми переходами (рис. 3а), а большинство локальных – требует моделирования через изотропноветвящиеся системы со сложными переходами (рис. 3 б).

На рис. 4 показаны сконструированные типовые деревья со следующими параметрами: распределение – нормальное или логнормальное; асимметрия – (-0,3 ... +0,7); эксцесс – (-1,1 ... +1,5); коэффициент корреляции – (-0,34 ... +0,96); временной интервал – (0,08 ... 1 год); начальное значение – условно-нулевое; временная структура – положительная, положительно-переменная, отрицательная, отрицательно-переменная.

В качестве исходных рядов приняты ряды осредненных для европейского региона гидрологических характеристик (атмосферные осадки, солнечная активность, величина речного стока и уровни подземных вод).

Вероятности переходов базировались на удовлетворении следующей системы уравнений:

а) для типичных переходов

$$\left. \begin{aligned} P_n + P_m + P_\alpha &= 1 \\ S \cdot P_n - S \cdot P_\alpha &= \Delta x_{\Delta t} \\ S^2 \cdot P_n + (-S)^2 \cdot P_\alpha &= \sigma_0^2 + (\Delta x_{\Delta t})^2 \end{aligned} \right\}; \quad (3)$$

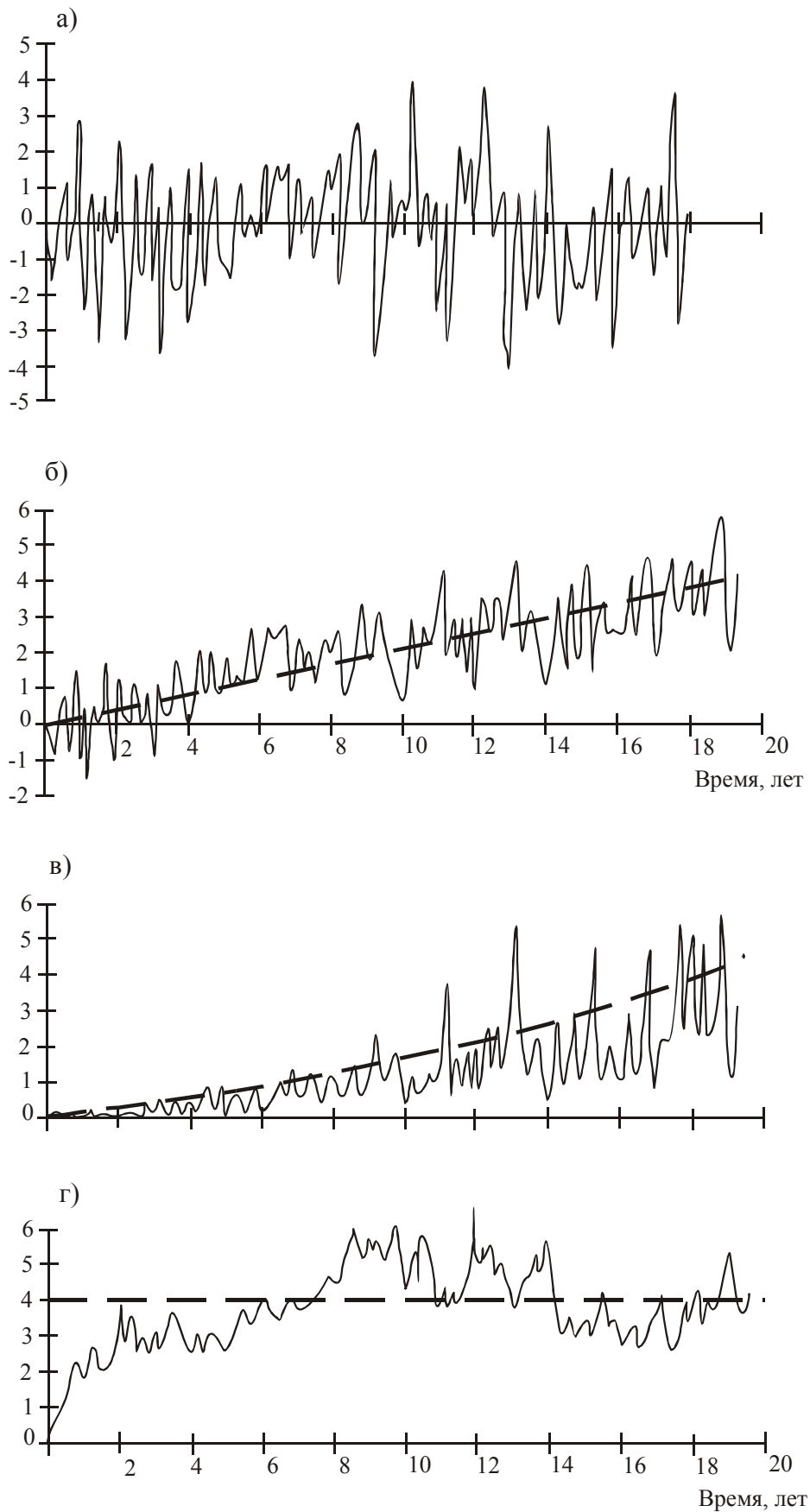
б) для нетипичных переходов

$$\left. \begin{aligned} P_n + P_m + P_\alpha &= 1 \\ S \cdot P_n + (1 - S) \cdot P_m &= \Delta x_{\Delta t} \\ S^2 \cdot P_n + (1 - S)^2 \cdot P_m &= \sigma_0^2 + (\Delta x_{\Delta t})^2 \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где  $s = (\sigma_0 + \Delta x_{\Delta t})$ ;  $\sigma_0$  – ожидаемое отклонение;  $\Delta x_{\Delta t}$  – ожидаемое изменение;  $P_n$ ,  $P_m$  и  $P_\alpha$  – соответственно, переходы по верхним, средним и нижним ветвям.

*Шведовский Петр Владимирович. К.т.н., профессор каф. оснований, фундаментов, инженерной геологии и геодезии Брестского государственного технического университета.*

*Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.*



**Рис. 1.** Характер изменения процессов во времени: а- типа случайного блуждания; б- линейного типа с проявлением увеличивающейся неопределенности; в- экспоненциального типа с проявлением увеличивающейся неопределенности; г- стабилизационного типа с тенденцией возвращения к среднему

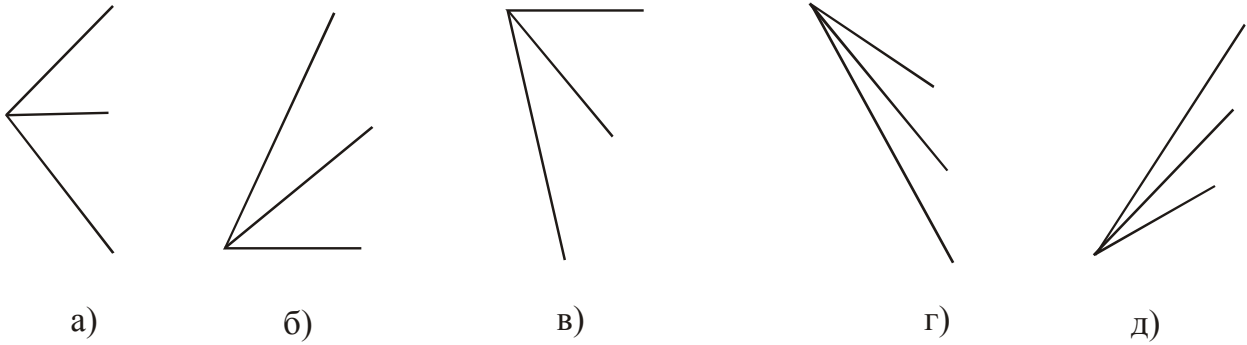


Рис. 2. Альтернативы процесса ветвления

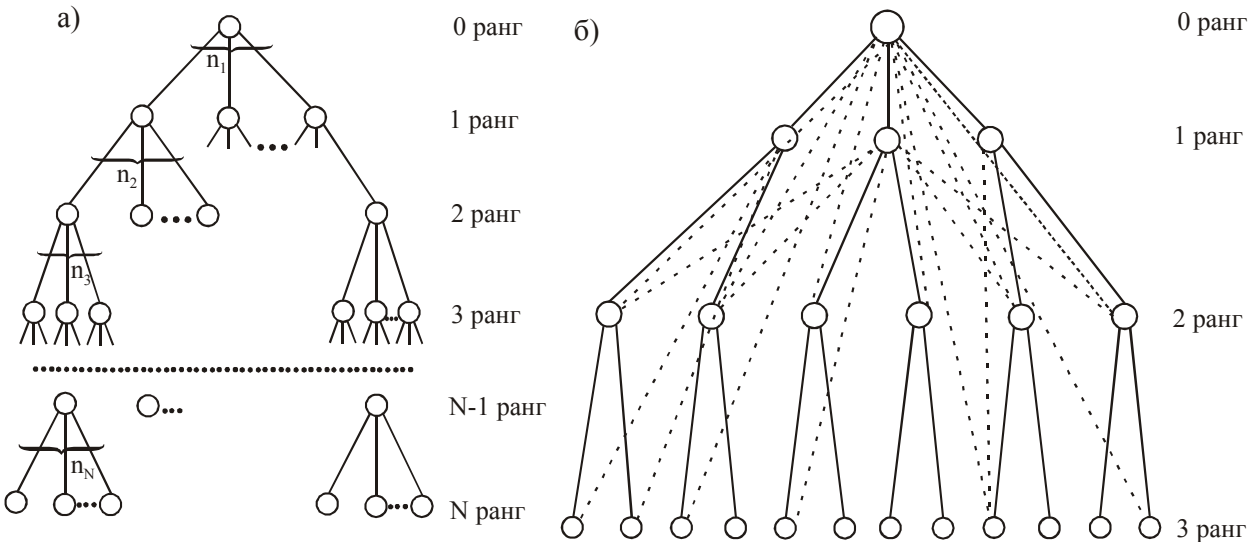


Рис. 3. Структура ветвления систем: а – с простыми, б – со сложными переходами

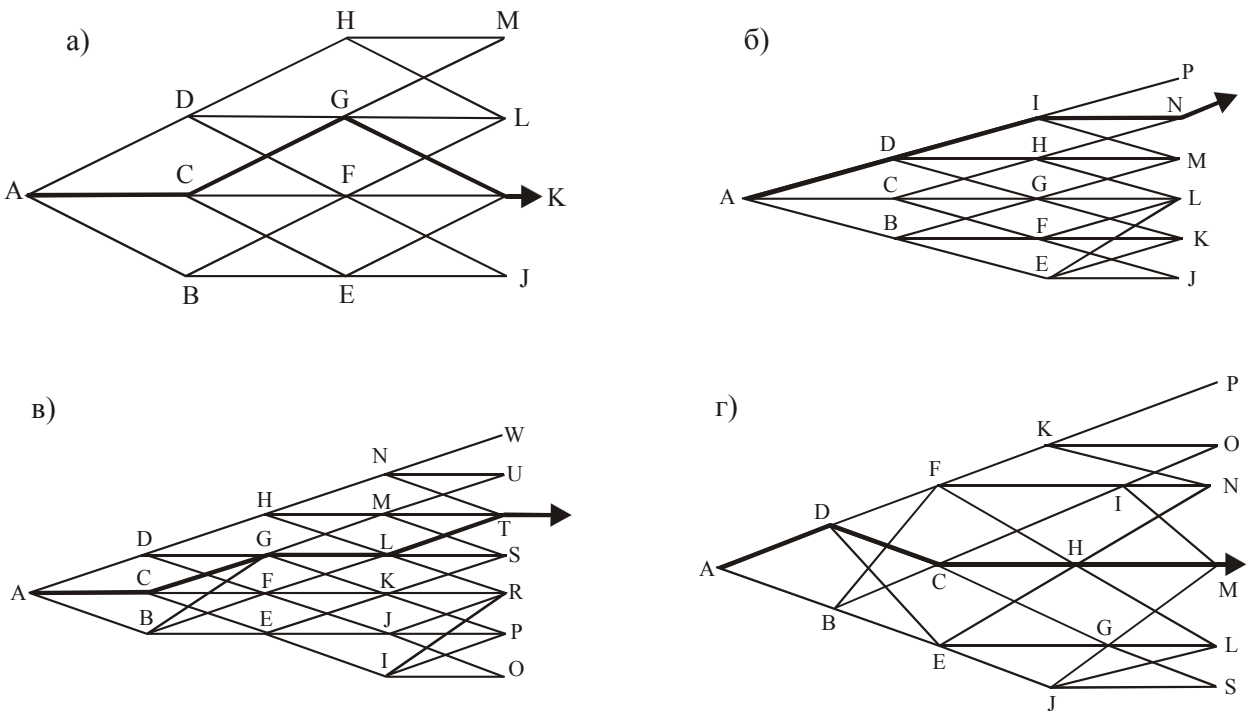


Рис. 4. Тринომальное дерево, сконструированное для различных типов процессов: а – случайное блуждание; б – линейный, с проявлением увеличивающейся неопределенности; в – экспоненциальный, с проявлением увеличивающейся неопределенности; г – стабилизирующийся, с тенденционным средним; **—** – наиболее вероятное развитие процесса.

Таблица 1. Типы процессов, формирующие статистические ряды гидролого-климатических и биоэкологических характеристик

Расчетный период	Характеристики и регион								
	Полесье			Центральная часть			Северная часть		
	$\frac{PC}{UB}$	$\frac{A_0}{T}$	$\frac{ПЦ}{ПЗ}$	$\frac{PC}{UB}$	$\frac{A_0}{T}$	$\frac{ПЦ}{ПЗ}$	$\frac{PC}{UB}$	$\frac{A_0}{T}$	$\frac{ПЦ}{ПЗ}$
короткий (<20лет)	$\frac{2}{1}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{2}{1}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{2}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{2}{1}$
средний (<100 лет)	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{1}$	$\frac{4}{2}$	$\frac{1}{2}$
длинный ( $\geq 100$ лет)	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{2}{4}$

Примечание: *PC* — речной сток; *UB* — уровни водотоков; *A<sub>0</sub>* — атмосферные осадки; *T* — температура воздуха; *ПЦ* — биологическая продуктивность; *ПЗ* — повторяемость засух. *1* — тип случайного блуждания; *2* — линейный тип с проявлением увеличивающейся неопределенности; *3* — экспоненциальный тип с проявлением увеличивающейся неопределенности; *4* — стабилизационный тип с тенденцией возвращения к среднему.

Таблица 2. Многолетний ход и направление развития процессов в расчетные и прогнозные периоды

Характеристики	Периоды								
	Расчетные						Прогнозные		
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
	<b>Белорусское Полесье</b>								
PC	Б	А	А	В	В	Б	А	В	А
UB	Б	Б	А	А	В	А	А	В	Б
АО	А	В	Б	В	А	А	В	А	Б
ТВ	Б	Б	Б	В	Б	Б	Б	В	А
ПЦ	А	А	А	Б	Б	В	Б	В	А
ПЗ	Б	Б	Б	В	А	А	Б	В	А
	<b>Центральная часть</b>								
PC	А	А	В	Б	В	А	А	В	А
UB	А	А	В	А	А	Б	В	А	А
АО	А	В	Б	В	В	А	В	А	Б
ТВ	Б	Б	Б	В	Б	Б	А	В	Б
ПЦ	А	А	Б	Б	В	А	А	Б	Б
ПЗ	В	А	А	Б	В	А	Б	Б	В
	<b>Северная часть</b>								
PC	А	Б	Б	Б	В	В	В	А	А
UB	Б	Б	А	А	В	А	А	В	Б
АО	А	В	Б	Б	В	А	В	А	Б
ТВ	Б	Б	Б	В	А	Б	Б	В	А
ПЦ	А	Б	Б	В	А	А	Б	В	А
ПЗ	Б	Б	Б	В	А	А	Б	Б	В

Отметим также, что в основу теории всех этих переходов положено допущение, что, эволюция состояний зависит только от числа изменений и не зависит от того, в какой последовательности они встречаются. А это эквивалентно наложению ограничений на функции возмущения (*h*, *h<sup>0</sup>*) и биномиальную псевдовероятность (*π*), т.е. в любой момент времени, в любом состоянии уменьшение расчетных параметров может быть также часто после их уменьшения, как и после их увеличения.

Это позволяет записать условие независимости траектории перехода в виде

$$\frac{1}{h(T+1)} = \frac{\delta}{h(T)} + \gamma, \quad (5)$$

где  $\delta$  — такая константа, что  $h(1) = \frac{1}{(\pi + (1-\pi) \cdot \delta)}$  и  $\gamma = \pi \cdot h(1) / ((1-\pi) \cdot h(1))$ .

Общее решение уравнения (5) имеет вид

$$h(T) = \frac{1}{(\pi + c \cdot \delta^T)}, \quad (6)$$

где *c* — константа.

При  $h(0)=1$  имеем

$$h(T) = (\pi + (1-\pi) \cdot \delta^T), \quad T \geq 0 \quad (7)$$

и, соответственно,  $-h^0(T) = \frac{\delta^T}{(\pi + (1-\pi) \cdot \delta^T)}$ . (8)

Таблица 3. Ход и направление развития сопутствующих процессов в расчетные и прогнозные периоды

Характеристики	Периоды								
	Расчетные						Прогнозные		
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
	<u>Белорусское Полесье</u>								
УМТ	Б	Б	Б	В	А	В	А	В	Б
СА	Б	Б	Б	В	А	А	А	В	Б
СУР	Б	Б	Б	В	А	А	А	Б	В
	<u>Центральная часть</u>								
УМТ	Б	Б	Б	Б	В	В	Б	В	В
СА	Б	Б	Б	В	А	А	А	Б	В
СУР	Б	Б	В	А	А	Б	А	Б	В
	<u>Северная часть</u>								
УМТ	Б	Б	Б	В	А	В	А	В	Б
СА	Б	Б	Б	В	А	А	А	Б	В
СУР	Б	Б	Б	А	В	А	А	Б	В

Примечание: УМТ – уровни мелиорированности территории; СА – уровень хозяйственного антропогенеза; СУР – степень урбанизации региона.

Анализ статистических рядов гидролого-климатических и биоэкологических характеристик, составленных на основании длительных мониторинговых наблюдений и восстановления, позволил определить тип процессов, формирующих статистические ряды (табл. 1).

В качестве статистических рядов по гидролого-климатическим характеристикам использованы данные Отдела проблем Полесья НАН Беларуси [1], а по биоэкологическим – результаты дендроклиматических и дендрохронологических исследований проведенных БГУ [7] и др. [8].

В соответствии с типом процесса было осуществлено компьютерное прогнозирование развития некоторых биосферных процессов, состоящее в определении (оценке) в конце расчетных (прогнозных) периодов вероятности того, что в следующем периоде:

- продолжится ранее сформировавшаяся серия повышения или понижения расчетного показателя процесса (А);
- сохранятся те же показатели, что были в текущем расчетном периоде (Б);
- появится новая серия, т. е. при текущей серии повышения начнется серия понижения (В).

В качестве расчетных взяты следующие периоды: I – 1880-1900 гг.; II – 1900-1920 гг.; III – 1920-1940 гг.; IV – 1940-1960 гг.; V – 1960-1980 гг.; VI – 1980-2000 гг. В качестве прогнозных рассмотрены три периода: VII – 2000-2010 гг.; VIII – 2010-2020 гг.; IX – 2020-2025 гг.

Рассчитанные многолетний ход и направления развития процессов в эти периоды представлены в табл. 2.

Были также выявлены и спрогнозированы сопутствующие процессы, которые в значительной мере обуславливают многолетний ход и направление развития исследуемых биосферных процессов (табл. 3).

Значения характеристик сопутствующих процессов интерпретировались в одной системе: очень низкие; низкие; средние; высокие; очень высокие.

## ВЫВОДЫ

Бесспорно, что полученные результаты имеют во многом ориентировочный характер и отражают только эколого-биологический аспект. Но они могут быть хорошей основой как для разработки моделей функционирования агро- и экосистем в эколого-экономическом и социально-политическом аспектах, так и разработки моделей функционирования агро- и экосистем с гарантированной достоверностью.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Волчек А.А., Лукша В.В. Оценка антропогенного воздействия на водные ресурсы рек Белорусского Полесья// Матер. межд. конф. “Природное асяродзе Полесья: сучасны стан і яго змены” Люблин-Шацк-Брест, 2002, ч. I, с. 177-182.
2. Дроздов О.А. Колебания естественного увлажнения в связи с анализом антропогенных изменений климата и увлажнения// Водные ресурсы. — 1990, №2, с. 5-15.
3. Логинов В.Ф. Климатическое опустынивание в Беларуси// Матер. межд. конф. “Природное асяродзе Полесья: сучасны стан і яго змены” Люблин-Шацк-Брест, 2002, ч. I, с. 28-32.
4. Шведовский П.В. Особенности исследований процесса натурализации деградированных мелиорированных земель. Вестник БПИ, 2000, №2, с. 38-41.
5. Лукша В.В., Акулич Я.А., Шведовский П.В. Особенности оптимизации структуры и моделирования генетической эволюции гео-, эко-, и агроэкологических систем. Сб. трудов регион. конф. “Современные проблемы математики и вычислительной техники” — Брест, БПИ, 1999, с. 43-47.
6. Федоров В.М. Структура многолетней изменчивости климатических элементов и ее локализация// Известия АК. Сер. геогр., 2001, №2, с. 25-31.
7. Киселев В.Н., Киселева Е.В., Яротов А.Е. Результаты дендрохронологических и дендроклиматических исследований в Прибужье// Матер. межд. конф. “Природное асяродзе Полесья: сучасны стан і яго змены” Люблин-Шацк-Брест, 2002, ч. II, с. 374-376.
8. Логинов В.Ф. Влияние мелиорации на региональный климат Беларуси. — Природные ресурсы, №2, 1997, с. 6-12.