



GLOBAL JOURNAL OF SCIENCE FRONTIER RESEARCH: H  
ENVIRONMENT & EARTH SCIENCE  
Volume 19 Issue 3 Version 1.0 Year 2019  
Type : Double Blind Peer Reviewed International Research Journal  
Publisher: Global Journals  
Online ISSN: 2249-4626 & Print ISSN: 0975-5896

# A Dynamic Model of the Interaction of Biomass and Phytocenoses Resources in a Cyclic Change in External Influences and the Possibilities of its Use

By M V Zilberman & M V Cherepanov

**Abstract-** The results of studies are presented in the framework of an extended dynamic model that describes the interaction of the biomass of the ecological system and resources in a situation of cyclically changing levels of negative impact (seasonal changes), which are an integral feature of the existence of phytocenoses.

At the heart of this model is the perception that an environmental system is capable of accumulating the resources necessary for its own existence in the area of space in which the system is located. It is shown that in the conditions of cyclically repetitive changes in living conditions (seasonal changes), when the increase in biomass density occurs in the spring-summer period and is limited, and the increase in resource density occurs in the autumn-winter period due to the humification of the fall, this model is able to qualitatively display some typical cases of the evolution of phytocenoses.

**Keywords:** *environmental system, biomass, resources, negative impact, dynamic model, seasonal changes.*

**GJSFR-H Classification:** *FOR Code: 059999*



*Strictly as per the compliance and regulations of:*



# A Dynamic Model of the Interaction of Biomass and Phytocenoses Resources in a Cyclic Change in External Influences and the Possibilities of its Use

M V Zilberman <sup>α</sup> & M V Cherepanov <sup>ο</sup>

**Abstract-** The results of studies are presented in the framework of an extended dynamic model that describes the interaction of the biomass of the ecological system and resources in a situation of cyclically changing levels of negative impact (seasonal changes), which are an integral feature of the existence of phytocenoses.

At the heart of this model is the perception that an environmental system is capable of accumulating the resources necessary for its own existence in the area of space in which the system is located. It is shown that in the conditions of cyclically repetitive changes in living conditions (seasonal changes), when the increase in biomass density occurs in the spring-summer period and is limited, and the increase in resource density occurs in the autumn-winter period due to the humification of the fall, this model is able to qualitatively display some typical cases of the evolution of phytocenoses.

Solutions of the model equation system are presented, describing the accumulation of resources during biomass activities, the redistribution of power supplies between resources and biomass, and the loss of resources through abiotic processes that take into account how the system's sustainability and the degradation of the system in light of changing weather conditions.

It has been shown that the correlation between the parameters of the proposed model and the physically measured characteristics of phytocenoses is possible, at least theoretically.

**Keywords:** *environmental system, biomass, resources, negative impact, dynamic model, seasonal changes.*

## I. INTRODUCTION

В настоящее время наблюдается возрастающее внимание к вопросам устойчивости экологических систем. Одним из свидетельств этого является Конвенция по климату [1] и ряд международных документов, принятых в целях ее развития (Киотский протокол, Парижское соглашение).

*Author α: Doctor of Chemical Sciences, Leading Researcher of FGAO Ural scientific research Institute «Ecology», the avenue Komsomolskiy, Perm, Russia. e-mail: zilberman@ecology.perm.ru*

*Author ο: Head of department of FGAO Ural scientific research Institute «Ecology», the avenue Komsomolskiy, Perm, Russia. e-mail: cherepanov@ecology.perm.ru*

Фитоценозы можно рассматривать как индикатор состояния окружающей среды [2].

К настоящему времени накоплен и систематизирован значительный объем фактических данных о состоянии природных объектов. Например, в [3] представлены сведения о первичной продуктивности экосистем Северной Евразии (территории бывшего СССР) более чем для 2500 пробных площадок, расположенных в различных природно-климатических зонах.

Современные технологии дистанционного зондирования Земли позволили накопить огромный и постоянно пополняющийся объем мультиспектральных снимков земной поверхности. Эти снимки позволяют вычислять вегетационные индексы, которые содержат весьма полезную информацию о растительном покрове [4].

Постоянно ведущиеся метеорологические наблюдения позволяют, с одной стороны, сопоставлять данные о растительном покрове с погодными условиями, а с другой – оценивать границы возможных изменений погодных условий. В то же время, следует помнить о том, что современная методология исследования природных объектов во многом наследует те черты, которые сложились в период, когда основной целью исследований было определение ресурсного потенциала окружающей среды, а не ее охрана. В рамках этой методологии относительно просто решаются задачи обнаружения сходства и различия отдельных объектов, выделения отдельных групп объектов и т.п. Представления же об устойчивости природных объектов носят, в основном, качественный характер. В частности, считается, что экосистема может быть описана комплексной схемой положительных и отрицательных обратных связей, поддерживающих гомеостаз системы в некоторых пределах параметров окружающей среды [5].

При этом выделяют два типа гомеостаза: резистентный — способность экосистем сохранять структуру и функции при негативном внешнем воздействии и упругий — способность экосистемы

восстанавливать структуру и функции при утрате части компонентов экосистемы [6].

В предыдущей работе [7] нами была предложена динамическая модель экосистемы, учитывающая взаимодействие биомассы и ресурсов. Существо этой модели состояло в том, что изменение плотности биомассы определялось наличием ресурсов, которые биомасса использует для своего роста, а изменение плотности ресурсов – процессами накопления ресурсов в системе, обусловленными жизнедеятельностью биомассы, и абиотическими процессами потери ресурсов.

Модель представляла собой систему из двух дифференциальных уравнений, первое из которых описывало изменение плотности биомассы, а второе – плотности ресурсов. Анализ свойств этой модели показал, что все возможное множество состояний системы разбивается на два подмножества. Если начальные условия принадлежат первому подмножеству, решение асимптотически сходится к стационарному состоянию с ненулевой плотностью биомассы и ресурсов. Это подмножество было названо областью устойчивости. Если начальные условия принадлежат второму подмножеству, эволюция приводит систему к полной потере биомассы и ресурсов. Это подмножество было названо областью деградации.

Схематически эта ситуация представлена на Рис. 1.

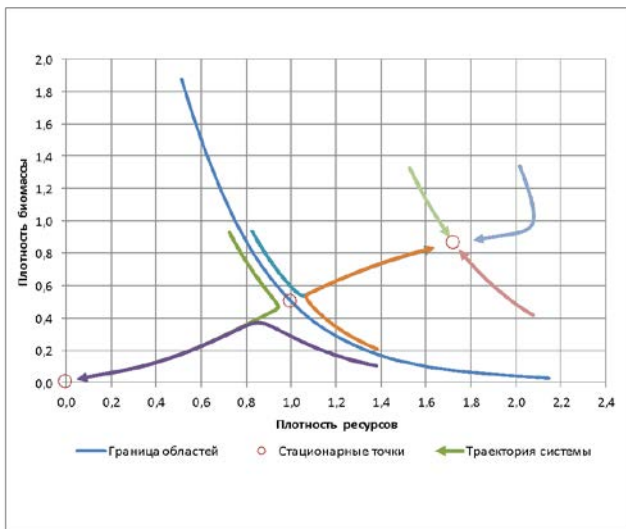


Рис. 1: Траектории эволюции системы

Положение границы, разделяющей эти подмножества, зависит от параметров, определяющих решение системы, к которым относятся скорости накопления и расходования ресурсов системой, уровень негативного воздействия и форма зависимости максимально достижимой плотности биомассы от плотности ресурсов.

В работе [3] параметры системы уравнений считались постоянными. В настоящей работе

ранее разработанный подход распространен на случай циклически меняющегося уровня негативного воздействия (сезонных изменений), которые являются неотъемлемой чертой существования фитоценозов.

## II. Модель

При разработке модели мы исходили из того, что объект моделирования (фитоценоз) находится в условиях циклически повторяющихся изменений условий существования (сезонных изменений).

Рост плотности биомассы происходит в весенне-летний период и носит ограниченный характер, а эти ограничения связаны как с наличием ресурсов, в частности, элементов питания, так и природно-климатическими особенностями. Поэтому для описания скорости изменения плотности биомассы использовали модификацию известного уравнения логистического роста [8]. При этом выражение, определяющее скорость изменения плотности биомассы, было сконструировано так, что для каждого сочетания плотности ресурсов и фактора воздействия имелось такое значение плотности биомассы, при котором скорость изменения биомассы равнялась нулю. Отметим, что это выражение можно рассматривать и как вариант традиционного представления продукции нетто-фотосинтеза, которая определяется как разность между приростом массы растения за счет ассимиляции углерода и его расходом за счет дыхания [9]

При описании скорости изменения плотности ресурсов учитывали три процесса. Первый процесс – это накопление ресурсов в ходе жизнедеятельности биомассы. Скорость этого процесса принята пропорциональной плотности биомассы. Второй процесс описывает перераспределение элементов питания между ресурсами и биомассой. Так, в весенне-летний период плотность ресурсов уменьшается за счет потребления этих ресурсов растущей биомассой, а в осенне-зимний период плотность ресурсов растет за счет гумификации опада. Скорость этого процесса принята пропорциональной скорости изменения плотности биомассы. Третий процесс описывает потерю ресурсов за счет абиотических процессов (вымывание элементов питания в подземные воды, водная и ветровая эрозия и т.д.). Скорость этого процесса принята равной плотности ресурсов.

С учетом сказанного уравнения модели представлены выражением (1)

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = \alpha \cdot u \cdot (g(t) \cdot f(v) - u) \\ \frac{dv}{dt} = \beta \cdot u - \delta \cdot u \cdot (g(t) \cdot f(v) - u) - \gamma \cdot v \end{cases} \quad (1)$$

где  
 $u$  - относительная плотность биомассы  
 $g(t)$  - фактор воздействия  
 $f(v)$  - зависимость максимально достижимой плотности биомассы от плотности ресурсов  
 $v$  - относительная плотность ресурсов  
 $\alpha$  - скорость роста биомассы  
 $\beta$  - скорость накопления ресурсов за счет жизнедеятельности биомассы  
 $\delta$  - скорость взаимного превращения ресурсов и биомассы  
 $\gamma$  - скорость потери ресурсов системы за счет абиотических процессов

По сравнению с работой [7] при описании скорости изменения плотности ресурсов в систему уравнений (1) добавлено выражение  $\delta \cdot u \cdot (g(t) \cdot f(v) - u)$  которое обеспечивает более точное описание сезонной динамики содержания элементов минерального питания в почвах, но не влияет на стационарные решения, вычисленные для среднего по периоду значения фактора воздействия.

Плотности биомассы и ресурсов выражались в относительных единицах. Для определения относительной плотности биомассы использовалось выражение (2).

$$u = \frac{U}{U_{max}} \quad (2)$$

где  
 $U$  - текущая плотность биомассы  
 $U_{max}$  - максимально достижимая плотность биомассы при полном обеспечении ресурсами и наиболее благоприятных внешних условиях.

Для определения относительной плотности ресурсов использовали выражение (3)

$$v = \frac{V}{V_{0.5}} \quad (3)$$

Где  
 $V$  - текущая плотность ресурсов  
 $V_{0.5}$  - плотность ресурсов, обеспечивающая плотность биомассы, равную половине максимально достижимой при наиболее благоприятных внешних условиях.

Как видно из выражения (1), аргументами, определяющими решение этой системы уравнений, являются две функциональные зависимости  $g(t)$ ,  $f(v)$  и четыре скалярных параметра. Рассмотрим эти аргументы более подробно.

Функциональная зависимость  $g(t) \in 0, 1$  характеризует влияние погодных условий на

протекающие процессы. В настоящей работе считалось, что эта зависимость может содержать в себе две составляющие – детерминированную и случайную. В соответствии с этим положением моделирование зависимости  $g(t)$  осуществлялось в следующем порядке.

Вычисляли вспомогательную функцию  $p(t)$ , которую представляли как сумму детерминированного и случайного процессов (4).

$$p(t) = p_{det}(t) + p_{stoh}(t) \quad (4)$$

где  
 $p_{det}(t)$  - детерминированная составляющая  
 $p_{stoh}(t)$  - случайная составляющая

Детерминированная составляющая обусловлена сменой времен года и по своему смыслу соответствует понятию «климатической нормы» которая, согласно [10] является «той или иной характеристикой климата, статистически полученной из многолетнего ряда, чаще всего средняя многолетняя величина». Исходя из такого определения, следует, что такая функция может быть представлена суммой периодических функций, например, рядом Фурье. На текущем этапе исследования для описания детерминированной составляющей использовали функцию (5).

$$p_{det}(t) = -\cos(2 \cdot \pi \cdot t) \quad (5)$$

где  
 $t \in 0, 1$  - доля периода (года)

Эта функция имеет минимальное значение в начале и конце периода и максимальное значение в его середине, что делает ее похожей на тенденцию изменения температур в течение года, характерную для умеренных широт северного полушария.

Случайную составляющую представляли как случайный процесс с нулевым средним значением, характеризуемый своей автокорреляционной функцией. В качестве автокорреляционной функции в настоящей работе использовали выражение (6)

$$K(\tau) = \exp(-|\alpha \cdot \tau|) \quad (6)$$

где  
 $\alpha$  - коэффициент затухания

При моделировании случайного процесса использовали метод нерекуррентной фильтрации [11].

Для преобразования вспомогательной функции в интенсивность негативного воздействия использовали выражение (7).

$$g(t) = \text{NormDistr}(p(t), x_0, \sigma_p) \quad (7)$$

где

*NormDist*- интегральная функция нормального распределения

$x_0$  - смещение

$\sigma_p$  - дисперсия

Использование выражения (7) обеспечивало локализацию значений фактора негативного воздействия в интервале от 0 до 1. Вариация параметра  $x_0$  позволяла варьировать среднее значение фактора воздействия, а вариация параметра  $\sigma_p$  – контраст значений фактора воздействия между «зимним» и «летним» периодами.

Функциональная зависимость  $f(v)$  определяет плотность биомассы, для которой при заданном значении плотности ресурсов  $v$  и значении  $g(t)=1$  скорость изменения плотности биомассы равна нулю. Функция  $f(v)$  представляет собой монотонную невыпуклую гладкую функцию, меняющуюся в интервале от 0 до 1. В данной работе в качестве функции  $f(v)$  использовалась

интегральная функция логнормального распределения (8), удовлетворяющая всем вышеперечисленным требованиям.

$$f(v) = \text{LogNorm}(v, \mu, \sigma_v) \quad (8)$$

где

$\mu$  - логарифм медианы логнормального распределения

$\sigma_v$  - дисперсия логнормального распределения

Отметим, что функция  $f(v)$  по сути дела описывает реакцию биомассы на изменение плотности ресурсов, то есть типичную зависимость доза – эффект, и известны описания подобных зависимостей с применением логнормальной функции [12].

Параметры,  $\alpha, \beta, \gamma$  и  $\delta$  определяют скорости протекания отдельных процессов, учитываемых моделью. Смысл этих параметров и факторы, которые преимущественным образом их определяют, представлены в Табл. 1

Табл. 1: Физический смысл кинетических параметров и факторы, определяющие их значения

Параметр	Физический смысл	Факторы, определяющие значение параметра
$\alpha$	Скорость роста биомассы в условиях отсутствия ограничений роста	Тип фитоценоза
$\beta$	Скорость накопления ресурсов за счет жизнедеятельности биомассы	Тип фитоценоза
$\delta$	Скорость взаимного превращения ресурсов и биомассы	Тип фитоценоза
$\gamma$	Скорость потери ресурсов системы за счет абиотических процессов	Характеристики почвенного покрова (преимущественно гранулометрический состав и промывной режим)

Значения всех этих параметров являются безразмерными, то есть определяют скорости соответствующих процессов относительно периода детерминированной составляющей циклического изменения воздействия.

#### а) Свойства решений

В том случае, если фактор воздействия является постоянной величиной  $g(t) \equiv g_0$ , а зависимость  $f(v)$  представлена логнормальным распределением, система (1) может иметь два стационарных решения с ненулевой плотностью биомассы и ресурсов. Значения плотностей биомассы и ресурсов, соответствующих этим состояниям определяются алгебраической системой уравнений (9) или уравнением (10), являющимся решением этой системы.

$$\begin{cases} g_0 \cdot f \cdot v - u = 0 \\ \beta \cdot u - \gamma \cdot v = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$f(v) = \frac{\gamma}{g_0 \cdot \beta} \cdot v \quad (10)$$

Отметим, что необходимое условие существования таких стационарных решений определяется неравенством (11).

$$\max \left( \frac{f(v)}{v} \right) > \frac{\gamma}{g_0 \cdot \beta} \quad (11)$$

Как следует из выполненных модельных расчетов стационарное состояние, соответствующее большей плотности ресурсов, является устойчивым, а стационарное состояние, соответствующее меньшей плотности ресурсов – неустойчивым.

В соответствии со сказанным, можно предположить, что при циклическом изменении фактора воздействия фазовый портрет асимптотического решения системы (1) будет представлять собой замкнутую траекторию, расположенную вблизи устойчивого стационарного состояния, положение которого определяется выражением (10) при условии, что фактор воздействия в этом выражении (10) равен среднему значению фактора воздействия, то есть  $g_0 = \bar{g}(t)$ . Действительно, с формальной точки зрения при уменьшающейся амплитуде колебания фактора воздействия поведение решения должно приближаться к решению для постоянного значения фактора воздействия, то есть сходиться в

точку верхнего стационарного состояния, вычисленного для среднего значения фактора воздействия. Отметим, что с физической точки зрения замкнутая траектория фазового портрета характеризует состояние системы, в которой происходят периодические повторения изменения плотности биомассы и ресурсов.

Для проверки этого предположения нами были проведены модельные расчеты с целью поиска асимптотических решений системы уравнений (1).

При проведении этих расчетов предполагалось, что изменение фактора воздействия определяется только детерминированной составляющей. Поскольку значения плотностей биомассы и ресурсов, принадлежащие хотя бы одной точке асимптотического решения заранее не были известны, расчеты выполнялись в следующем порядке.

Для заданного сочетания параметров рассчитывались положения стационарных точек, соответствующих среднему значению фактора воздействия. В качестве начальных условий для плотности биомассы и ресурсов принимались значения этих величин в верхней стационарной точке. Проводился расчет плотностей биомассы и ресурсов за период времени, соответствующий времени цикла изменения фактора воздействия. Сравнивали значения плотностей биомассы и ресурсов в начале и конце периода. В том случае, если эти значения различались более чем на заданную величину, расчет повторяли, используя в качестве начальных условий значения плотностей биомассы и ресурсов, вычисленные для конца периода.

Результаты расчетов, выполненных для различных величин смещения, что повлекло за собой и различия средних значений фактора воздействия, представлены на Рис. 2.

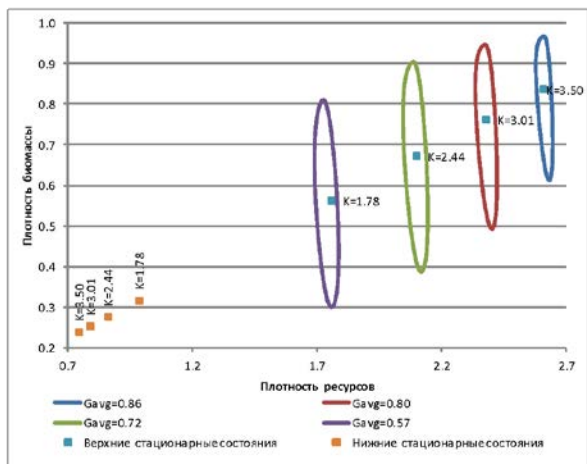


Рис. 2: Результаты расчетов, выполненных для различных величин смещения

Как видно из Рис. 2, центр траектории фазового портрета асимптотического решения во всех случаях остается вблизи верхней стационарной точки. По мере ухудшения условий существования фитоценоза (уменьшения среднего значения фактора воздействия  $g$ ) наблюдается смещение асимптотического решения в направлении сокращения плотности биомассы и ресурсов. Одновременно происходит сближение точек, соответствующих верхнему и нижнему стационарному состоянию. Для оценки расстояния между этими точками использовалось отношение плотностей ресурсов в верхней и нижней стационарных точках ( $K$ ), вычисленное для среднего значения фактора воздействия.

Учитывая тот факт, что нижняя стационарная точка принадлежит границе области устойчивости, отношение плотности ресурсов в верхней и нижней стационарных точках можно рассматривать как количественную меру удаленности асимптотического решения от границы области устойчивого существования фитоценоза.

В данной серии расчетов было обнаружено, что форма зависимости скорости изменения плотности биомассы от времени изменяется в зависимости от положения асимптотического решения относительно границы области устойчивости.

Результаты этих расчетов приведены на Рис. 3 в виде зависимостей скорости роста биомассы для вегетационного периода, то есть для периода, когда биомасса фитоценоза увеличивается. Отдельные кривые, изображенные на Рис. 3, относятся к разным значениям смещения.

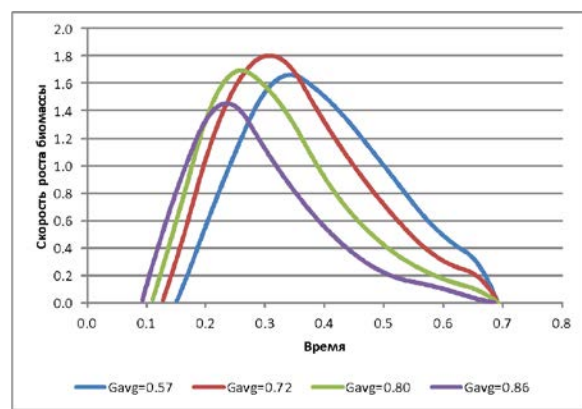


Рис. 3: Количественная мера удаленности асимптотического решения от границы области устойчивого существования фитоценоза

Как видно из Рис. 3 по мере улучшения условий существования фитоценоза для асимптотического решения наблюдается смещение начала периода роста биомассы в сторону

меньших значений времени и смещение пика скорости роста плотности биомассы, в этом же направлении. В качественном отношении форма кривых, изображенных на Рис. 3, весьма похожа на кривые суточной продуктивности фотосинтеза для растительных сообществ, определяемой в полевых условиях.

Решение системы уравнений (1) в том случае, если при моделировании учитывается случайная составляющая изменения фактора воздействия и начальное состояние системы близко к асимптотическому решению, приводит к фазовому портрету, представляющему собой спиралевидную кривую, расположенную вблизи от асимптотического решения, как это показано на Рис. 4.

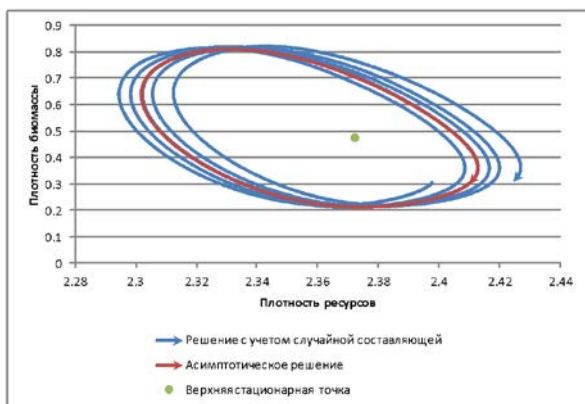


Рис. 4: Фазовый портрет решений при случайном изменении фактора воздействия при начальном состоянии системы, близком к асимптотическому.

Физическим аналогом решения, изображенного на Рис. 4, может быть луг, который в течение долгого времени не подвергался хозяйственному использованию, вследствие чего уровень обеспеченности почвы элементами питания стабилизировался на уровне баланса между процессами накопления питательных веществ за счет жизнедеятельности растений и расхода этих веществ за счет биотических процессов.

В том случае, если начальное состояние объекта далеко от асимптотического решения, например, зарастающая лесная вырубка, модель предсказывает приближение к асимптотическому решению, как это показано на Рис. 5.

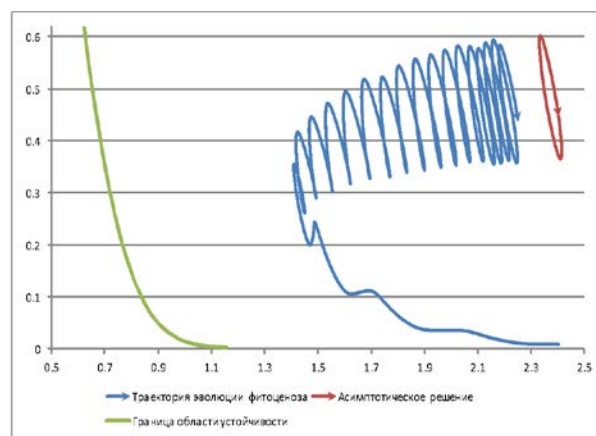


Рис. 5: Фазовый портрет решений при случайном изменении фактора воздействия при начальном состоянии системы, далеком от асимптотического

Характерной особенностью процесса, изображенного на Рис. 5, является то, что рост плотности биомассы на начальных этапах сопровождается уменьшением плотности ресурсов. В дальнейшем плотность ресурсов начинает возрастать, а состояние системы приближается к асимптотическому решению. При этом на этом начальном участке решения траектория системы проходит вдоль границы области устойчивости, а потом начинает удаляться от нее в сторону асимптотического решения.

#### б) К вопросу о калибровке модели

Из представленных данных следует, что система уравнений (1) может использоваться для описания разнообразных случаев поведения фитоценозов, в том числе и для прогнозирования их поведения при различных гипотезах об изменении фактора воздействия. При этом одновременно с прогнозом поведения системы могут быть получены сведения о том, насколько текущее состояние моделируемого объекта далеко от асимптотического решения и границы области устойчивости.

Однако, совершенно очевидно, что практическое применение этой модели возможно только в том случае, если известны значения параметров, входящих в состав предложенного математического описания, и имеется набор экспериментальных данных о состоянии исследуемого фитоценоза.

В настоящее время мы, к сожалению, можем только описать подход, который по нашему мнению может привести к оценке параметров, входящих в состав модели. Оценки параметров предложенной модели не могут быть получены из непосредственных измерений. Поэтому единственным путем получения таких оценок вариация этих параметров с целью минимизации различий между результатами расчетов и

экспериментальным оценками годичной и/или дневной продуктивности фитоценозов.

Несмотря на значительное количество параметров, подлежащих определению, эта задача не представляется более сложной, чем успешно решенная задача определения стехиометрических и кинетических коэффициентов в модели очистки сточных вод [13].

Определенную трудность представляет то, что внешние и внутренние факторы, определяющие решение системы (1) представлены в модели в виде обобщенных оценок  $g_t$  и  $f_v$ , соответственно, в то время как каждый из этих факторов представляет собой совокупность воздействий, различных по своей природе.

В частности, внешние факторы, обобщенные функцией  $g_t$  в предложенной модели, по сути, совпадают с потенциальными пределами чистой первичной продукции, обусловленными физиологическими ограничениями по таким факторам как, солнечная радиация, водный баланс, температура и т.д.

Каждый из этих факторов может представлять собой либо монотонную зависимость, как, например, солнечная радиация, либо унимодальную зависимость, если существуют оптимальные значения фактора, как в случае температуры и условий увлажнения.

В обоих случаях есть возможность преобразовать интервал изменения реального воздействия в интервал значений от 0 до 1, который и является интервалом значений функции  $g_t$ , определяющей уровень воздействия.

При этом, для преобразования физических значений параметра, оказывающего монотонное воздействие, необходимо иметь как минимум два параметра, один из которых определяет значение физического параметра, при котором наблюдается наиболее быстрое изменение формального параметра, а второй – определяет чувствительность формального параметра к изменению физического параметра.

Для представления унимодальных зависимостей необходимы как минимум четыре параметра, при этом первая пара должна соответствовать области, в которой физический параметр стимулирует жизнедеятельность фитоценоза, а вторая пара – области, в которой физический параметр угнетает эту жизнедеятельность.

Один из возможных способов такого преобразования для монотонной зависимости использован в настоящей работе в выражении (7).

Результатом решения системы (1) кроме плотности биомассы, которая может быть напрямую сопоставлена с оценками продуктивности фитоценоза, полученными в результате полевых исследований, или с

использованием данных дистанционного зондирования Земли, является и плотность ресурсов, которая может быть сопоставлена с содержанием элементов питания в почве. Такие сопоставления могут проводиться на основе известных шкал обеспеченности растений элементами питания и представляются весьма полезными с точки зрения оценки соответствия модельных расчетов реальным характеристикам фитоценозов.

### III. Заключение

Предложена динамическая модель, описывающая взаимодействие биомассы и ресурсов фитоценоза в условиях циклических негативных воздействий. Показано, что данная модель способна отобразить некоторые типичные случаи эволюции фитоценозов, по крайней мере, в качественном плане. При этом использование предложенной модели позволяет получить количественные оценки устойчивости фитоценоза как положение траектории эволюции системы относительно границы области устойчивости.

Показано, что установление корреляции между параметрами предложенной модели и физически измеряемыми характеристиками фитоценозов возможно, по крайней мере, теоретически.

Существенным является то, что данная модель является не только моделью роста биомассы, который описывается первым уравнением системы (1), но и, в определенном смысле, моделью процесса почвообразования, поскольку второе уравнение этой же системы описывает процессы накопления и расходования ресурсов в почве. Это обстоятельство, в сочетании с тем, что модель использует обобщенные оценки воздействия, определяемые погодными условиями, позволяет рассматривать эту модель как потенциальную платформу для объединения метеорологических данных, данных о продуктивности фитоценозов и результатов почвоведческих исследований.

### REFERENCES RÉFÉRENCES REFERENCIAS

1. Framework Convention on Climate Change, UN FCCC
2. Isaev A S (editor) 2012 The diversity and dynamics of forest ecosystems in Russia. Vol. 1 (Moscow: Federal State Budgetary Institution of Science Center for Ecology and Forest Productivity RAS. Partnership of scientific publications of KMK) p 461
3. Bazilevich N I 1993 Biological productivity of ecosystems of Northern Eurasia (Moscow: Science) p 293
4. Huete, Alfredo & Ponce-Campos, Guillermo & Zhang, Yongguang & Restrepo-Coupe, Natalia &





Ma, Xuanlong & Moran, Mary. (2015). Monitoring Photosynthesis from Space.

5. Odum U 1986 Ecology (Moscow: Mir)
6. The homeostasis of ecosystems. Scientific and Information portal All-Russian Institute of scientific and technical information, RAS.
7. Zilberman M V, Cherepanov M V 2017 The sustainability of the ecosystems in the framework of the dynamic model of interaction of biomass and resources vol 5 (Moscow: Problems of regional ecology) p 9 – 20
8. Verhulst P.F. Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement //Corresp. Math et Phys. – 1838. – №10 – P. 113-121.
9. Poluektov R A, Topaj A G, Mirshel V 1998 Comparison of empirical and theoretical approaches in mathematical modeling of agricultural systems using the example of a description of the photosynthesis process Tom 10 Vol. 7 (Moscow: Math modeling.) p 25 – 36
10. <http://meteorologist.ru/klimaticheskaya-norma.html>
11. Prohorov S A 2001 Dynamic description and simulation of random processes (Uralsk) p 208
12. Berezin I I, Suchkov V V 2014 Formula for plotting the dose-effect curve Tom 16 Vol. 5 (Samara: Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences) p 1790 – 1792
13. [https://www.researchgate.net/publication/289927816\\_Activated\\_Sludge\\_Models\\_ASM1\\_ASM2\\_ASM2D\\_ASM3](https://www.researchgate.net/publication/289927816_Activated_Sludge_Models_ASM1_ASM2_ASM2D_ASM3)