

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СЛОЖНЫХ АГРОЭКОСИСТЕМ

**Ю.В. Чигарев**

Агрофизическое состояние почвы влияет на развитие агрофитоценоза, биоценоза и микробиоценоза агроэкосистемы, а следовательно, и на ее поведение ( равновесие), которое может быть устойчивым или не устойчивым по отношению к тем или иным внешним возмущениям ( механическим и климатическим воздействиям) [1].

Для оценки устойчивого (неустойчивого) состояния агроэкосистемы удобно ввести понятие экологической инвариантности.

Под экологической инвариантностью будем понимать неизменяемость компонентов агроэкосистемы в пределах нормированных границ в результате производственного сельскохозяйственного цикла связанного с возделыванием той или иной культуры или культур.

Нормированные границы определяют параметры экологодопустимого физического состояния агроэкосистемы, которое она приобретет в результате сельскохозяйственных процессов в течение определенного времени при использовании соответствующей технологии.

Нормированные границы обеспечивают агроэкосистеме на данной ступени ее развития устойчивый уровень состояния.

Если обозначить определяющую функцию состояния агроэкосистемы, экологический потенциал, через  $\epsilon_{AC}$ , то ее локальная изменимость будет зависеть от компонентов структуры и плодородия почвы, агрофитоценоза, биоценоза и микробиоценоза, т.е.

$$\epsilon_{AC} = F \left\{ F \left[ \sum f_{C_i}(t) \right]; F_{\Phi} \left[ \sum f_{\Phi_i}(t) \right]; F_3 \left[ \sum f_{3_i}(t) \right]; F_M \left[ \sum f_{M_i}(t) \right] \right\},$$

где  $F_C, F_{\Phi}, F_3, F_M$  — интегральные характеристики состояния структуры почвы, фитоценоза, зооценоза и микробиоценоза. ( $i=1,2,\dots$ ).

Величина  $\epsilon_{AC}$  будет инвариантна, если функции  $F_C, F_{\Phi}, F_3, F_M$  в процессе производственного цикла изменяются в пределах жестко установленных границ, обеспечивая тем самым устойчивое состояние агроэкосистемы. Естественно, что интегральные характеристики зависят от техногенных процессов, которые связаны с механической и химической обработкой почвы, с общей культурой земледелия и с климатическими воздействиями.

Оценка устойчивости агроэкосистемы к техногенным механико-химическим и климатическим нагрузкам представляет весьма сложную инженерно-экологическую задачу [ 2].

Одно и тоже техногенное воздействие в разных агроэкосистемах, отличающихся по рельефу, природно-климатическим условиям, севообороту, типу почвы и т.д. приводит к различным последствиям. Поэтому нормативные значения допускаемых нагрузок и воздействий<sup>1</sup> на агроэкосистемы являются строго дифференцированными характеристиками.

Данные интегральные характеристики являются главными составляющими компонентами агроэкосистемы. Каждая из перечисленных компонент в свою очередь делится на отдельные составляющие. Например, структура почвы характеризуется такими параметрами, как плотность, пористость, воздухопроницаемость, влажность, упругость и т.д.

В литературе указанные параметры часто называют переменными состояния. Так переменными состояния фитоценоза могут быть масса сухого вещества растения и поверхность его листьев. Для построения агромоделей в число переменных состояния предпочтительно включать те количественные характеристики и свойства экосистемы, которые, во-первых, поддаются измерению и, во-вторых, представляют особый интерес для исследователя.

Если  $F_C, F_\Phi, F_3, F_M$  — являются независимыми переменными, то ни одна из них не может быть определена через значения остальных. Значения переменных  $F_C, F_\Phi, F_3, F_M$  определяют единственным образом состояние системы в момент времени  $t$ .

Возможны три формы представления агроэкосистемы: одномерное ( линейно выраженное)

$$A_1 = f_1(x),$$

двухмерное ( площадочно выраженное)

$$A_2 = f_2(x, y),$$

трехмерное ( объемно выраженное)

$$A_3 = f_3(x, y, z).$$

Выбор той или иной формы представления зависит от цели исследования.

Интегральная характеристика региональной агроэкосистемы  $\epsilon_{AC}$  выражает совокупные свойства как производные регионального антропогенеза

$$\epsilon_{AC} = \begin{cases} \sum_{i=1}^n e_i \\ f(e_1, e_2 \dots e_n) \end{cases},$$

где  $\sum_{i=1}^n e_i$  — линейно выраженные функциональные свойства

$f(e_1, e_2, e_3 \dots e_n)$  — нелинейно выраженные функциональные свойства.

Выражение  $\epsilon_{AC}$  носит символический характер и его конкретный вид зависит от специфики решаемой задачи и конкретных условий формирования и развития агроэкосистемы.

Составляющие свойства интегральной характеристики агроэкосистемы можно сгруппировать по различным признакам.

Обозначим через  $A$  группу показателей свойств атмосферы (состояние воздуха в почве);

$G$  — группу показателей свойств гидросферы (состояние поверхностных и грунтовых вод);

$L$  — группа показателей физико-механических свойств почвы (плотность, влажность, воздухопроницаемость и т.д.);

$\Phi$  — группа показателей свойств фитоценоза (выращиваемые сельскохозяйственные культуры);

$Z$  — группа показателей свойств зооценоза (сообщество животных, обитаемых на территории агроландшафта);

$M$  — группа показателей свойств микробиоценоза (сообщество микроорганизмов);

$H$  — группа показателей состояния человека.

Тогда показатель одной из возможных форм представления интегральной характеристики агроэкосистемы будет

$$\epsilon_{AC} = \sum_{i=1}^k e_{Ai} + \sum_{i=1}^l e_{Gi} + \sum_{i=1}^m e_{Li} + \sum_{i=1}^n e_{\Phi i} + \sum_{i=1}^r e_{Zi} + \sum_{i=1}^p e_{Mi} + \sum_{i=1}^{\lambda} e_{Hi};$$

Иногда составляющие агроэкосистемы группируют по другому: вместо фитоценоза, зооценоза и микробиоценоза рассматривают группы флоры ( $F_f$ ) и фауны ( $F_\phi$ ).

Будем считать, что показатели атмосферы  $A$ , гидросферы  $G$ , свойств почвы  $L$  равночувствительны (в экологическом смысле) к техногенным воздействиям со стороны с/хозяйственной техники, а показатели  $\Phi$  — фитоценоза,  $Z$  — зооценоза,  $M$  — микробиоценоза равночувствительны к антропогенным изменениям  $A$ ,  $G$  и  $L$ .

Общий экологический потенциал агроэкосистемы является функционалом параметров биосферы и геосферы и может быть выражен в виде [261/

$$\epsilon_{AC} = \phi[\epsilon_1, \epsilon_2], \quad (I)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \varphi(\varepsilon_A, \varepsilon_G, \varepsilon_L) \\ \varepsilon_2 &= \psi(\varepsilon_\phi, \varepsilon_3, \varepsilon_M) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Составляющие компоненты функций  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  зависят от времени, поэтому состояние объектов геосфер  $A, G, L$  описывается уравнением

$$\frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_A} \frac{d\varepsilon_A}{dt} + \frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_G} \frac{d\varepsilon_G}{dt} + \frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_L} \frac{d\varepsilon_L}{dt} \quad (3)$$

Показатели  $A, G, L$  функционально зависимы от параметров техногенеза со стороны с/хозяйственной техники и технологии обработки почвы (вес тракторов и агрегатов, частоты колеблющихся органов машин, жесткость шин и рисунка протектора, количества проходов по полю и т.д.). Эти параметры будем символически обозначать  $\omega_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Тогда, обозначая через  $\tau$  временную координату техногенного процесса можно записать

$$\begin{aligned} \varepsilon_A &= f_1'(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n, \tau) \\ \varepsilon_G &= f_2'(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n, \tau) \quad \text{и т.д.} \end{aligned}$$

Поэтому (3) можно представить в виде системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\varepsilon_1}{d\omega_1} &= \frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_A} \frac{d\varepsilon_A}{d\omega_1} + \frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_G} \frac{d\varepsilon_G}{d\omega_1} + \frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_L} \frac{d\varepsilon_L}{d\omega_1} + \frac{d\varepsilon_1}{dt} \frac{dt}{d\omega_1} \\ \frac{d\varepsilon_1}{d\omega_2} &= \frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_A} \frac{d\varepsilon_A}{d\omega_2} + \frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_G} \frac{d\varepsilon_G}{d\omega_2} + \frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_L} \frac{d\varepsilon_L}{d\omega_2} + \frac{d\varepsilon_1}{dt} \frac{dt}{d\omega_2} \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{d\varepsilon_1}{d\omega_n} &= \frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_A} \frac{d\varepsilon_A}{d\omega_n} + \frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_G} \frac{d\varepsilon_G}{d\omega_n} + \frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_L} \frac{d\varepsilon_L}{d\omega_n} + \frac{d\varepsilon_1}{dt} \frac{dt}{d\omega_n} \\ \frac{d\varepsilon_1}{d\tau} &= \frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_A} \frac{d\varepsilon_A}{d\tau} + \frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_G} \frac{d\varepsilon_G}{d\tau} + \frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_L} \frac{d\varepsilon_L}{d\tau} + \frac{d\varepsilon_1}{dt} \frac{dt}{d\tau} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Состояние объектов региональной биосферы  $\Phi, 3, M$  тоже можно представить в виде дифференциального уравнения

$$\frac{d\varepsilon_2}{d\tau} = \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_\phi} \frac{d\varepsilon_\phi}{dt} + \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_3} \frac{d\varepsilon_3}{dt} + \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_M} \frac{d\varepsilon_M}{dt} + \frac{d\varepsilon_2}{dt} \frac{dt}{d\tau} \quad (5)$$

Так как объекты региональной биосферы  $\Phi, 3, M$  зависят от объектов геосфер  $A, 3, L$ , то, очевидно, что

$$\varepsilon_{\phi} = f_1'(\varepsilon_A, \varepsilon_G, \varepsilon_L, \tau);$$

$$\varepsilon_3 = f_2'(\varepsilon_A, \varepsilon_G, \varepsilon_L, \tau);$$

$$\varepsilon_M = f_3'(\varepsilon_A, \varepsilon_G, \varepsilon_L, \tau)$$

и уравнение (5) трансформируется в систему дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_A} &= \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_{\phi}} \frac{d\varepsilon_{\phi}}{d\varepsilon_A} + \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_3} \frac{d\varepsilon_3}{d\varepsilon_A} + \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_M} \frac{d\varepsilon_M}{d\varepsilon_A} + \frac{d\varepsilon_2}{dt} \frac{dt}{d\varepsilon_A}; \\ \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_G} &= \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_{\phi}} \frac{d\varepsilon_{\phi}}{d\varepsilon_G} + \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_3} \frac{d\varepsilon_3}{d\varepsilon_G} + \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_M} \frac{d\varepsilon_M}{d\varepsilon_G} + \frac{d\varepsilon_2}{dt} \frac{dt}{d\varepsilon_G}; \\ \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_L} &= \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_{\phi}} \frac{d\varepsilon_{\phi}}{d\varepsilon_L} + \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_3} \frac{d\varepsilon_3}{d\varepsilon_L} + \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_M} \frac{d\varepsilon_M}{d\varepsilon_L} + \frac{d\varepsilon_2}{dt} \frac{dt}{d\varepsilon_L}; \\ \frac{d\varepsilon_2}{d\tau} &= \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_{\phi}} \frac{d\varepsilon_{\phi}}{d\tau} + \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_3} \frac{d\varepsilon_3}{d\tau} + \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_M} \frac{d\varepsilon_M}{d\tau} + \frac{d\varepsilon_2}{dt} \frac{dt}{d\tau} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Масштаб времени техногенного и антропогенного процесса в агроэкосистеме может совпадать, т.е.  $t = \tau$ .

Уравнения (3)–(6) описывают изменение параметров агроэкосистемы в зависимости от составляющих ее объектов и времени. Использование данных уравнений требует накопления и анализа большого массива информации о действительных формированиях и эксплуатации реальных агроэкосистем. Поэтому данная математическая модель агроэкосистемы не совсем удобна для практического использования, хотя имеет очень большие перспективы, т.к. учитывает почти все параметры влияющие на ее поведение. Уравнения (3) — (2) необходимо приводить к виду удобному для исследования устойчивости агроэкосистемы.

## Литература

1. Чигарев Ю.В. Термодинамический подход к исследованию критических уровней агроэкологических систем. *Весці АНБ. сер. фіз.-тэх.* №3, 1995.
2. Заславский В.Г., Полуэктов Р.А. *Управление экологическими системами.* М. 1988.