

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 ϵ_{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_{Φ}, F_3, F_M — интегральные характеристики состояния структуры почвы, фитоценоза, зооценоза и микробиоценоза. ($i=1,2,\dots$).

Величина ϵ_{AC} будет инвариантна, если функции F_C, F_{Φ}, 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 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 состояниями. Так переменными состояниями фитоценоза могут быть масса сухого вещества растения и поверхность его листьев. Для построения агромоделей в число переменных состояний 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_Φ, F_3, F_M — являются независимыми переменными, то ни одна из них не может быть определена через значения остальных. Значения переменных F_C, F_Φ, F_3, F_M определяют единственным образом состояние системы в момент времени t .

Возможны три формы представления агроэкосистемы: одномерное (линейно выраженное)

$$A_1 = f_i(x),$$

двухмерное (площадочно выраженное)

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

трехмерное (объемно выраженное)

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

Выбор той или иной формы представления зависит от цели исследования.

Интегральная характеристика региональной агроэкосистемы ϵ_{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 ϵ_{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.);

Φ — 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_ϕ).

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 Φ — 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 ε_1 и ε_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 ω_i ($i = 1, 2, \dots, n$). Тогда, обозначая через τ 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.