

УДК 004.8:330.4:631.1

4.1.1. Общее земледелие и растениеводство

**РАЗРАБОТКА ОБЩЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ВАРИАЦИОННОГО ПРИНЦИПА**

Орешкин Михаил Вильевич

доктор сельскохозяйственных наук, профессор

РИНЦ AuthorID: 591918

dosogn@bk.ru

*ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», г. Луганск, Россия*

Луценко Евгений Вениаминович

доктор экономических наук, кандидат технических наук, профессор

РИНЦ SPIN-код: 9523-7101

prof.lutsenko@gmail.com

*ФГБОУ ВО Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, г. Краснодар, Россия*

Статья посвящена разработке общей математической теории сельскохозяйственных процессов (ОТСП) на единой метатеоретической основе – универсального информационного вариационного принципа (УИВП). Показано, что аграрное производство как взаимодействие социума с педосферой, ландшафтом и биосферой в целом подчиняется закону максимизации системной информации при заданных энергетических и ресурсных ограничениях. Выведено единое уравнение ОТСП, связывающее входящие и исходящие энергетические потоки через эксергетический функционал. Получено вариационное уравнение динамики почвенного плодородия, описывающее эволюцию педона под воздействием агрогенных и природных факторов. Сформулированы математические условия продовольственной безопасности в терминах информационного функционала. Предложена интерпретация агросферы как анизотропного информационного пространства, что открывает путь к построению алгоритмов оптимального управления сельскохозяйственными системами шестого технологического уклада

**Ключевые слова:** ОТСП, УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ВАРИАЦИОННЫЙ ПРИНЦИП, ЭКСЕРГИЯ, ПОЧВЕННОЕ ПЛОДОРОДИЕ, АГРОСФЕРА, ИНФОРМАЦИОННЫЙ ФУНКЦИОНАЛ, ПЕДОН, ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ,

UDC 004.8:330.4:631.1

4.1.1. General agriculture and crop production

**MATHEMATICAL MODELING OF STRUCTURAL AND DYNAMIC PROPERTIES OF AGRICULTURAL SYSTEMS BASED ON THE UNIVERSAL INFORMATION VARIATION PRINCIPLE**

Oreshkin Mikhail Vilievich

Doctor of Agricultural Sciences, Professor

RSCI AuthorID: 591918

dosogn@bk.ru

*Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk, Russia*

Lutsenko Evgeny Veniaminovich

Doctor of Economics, Candidate of Technical Sciences, Professor

RSCI SPIN code: 9523-7101

prof.lutsenko@gmail.com

*Kuban State Agrarian University named after I.T. Trublin, Krasnodar, Russia*

The study is devoted to the development of a General Theory of Agricultural Processes (GTAP) on a unified metatheoretical basis – the Universal Informational Variational Principle (UIVP). It is shown that agricultural production, as an interaction of society with the pedosphere, landscape, and biosphere, obeys the law of maximization of systemic information under given energy and resource constraints. A unified GTAP equation is derived linking input and output energy flows through an exergy functional. A variational equation for soil fertility dynamics is obtained, describing the evolution of the pedon under agrogenic and natural influences. Mathematical conditions for food security are formulated in terms of the information functional. The agrosphere is interpreted as an anisotropic information space, opening the way for constructing optimal control algorithms for agricultural systems of the sixth technological paradigm

**Keywords:** GTAP, UNIVERSAL INFORMATIONAL VARIATIONAL PRINCIPLE, EXERGY, SOIL FERTILITY, AGROSPHERE, INFORMATION FUNCTIONAL, PEDON, FOOD SECURITY, EULER-LAGRANGE EQUATION, SIXTH TECHNOLOGICAL PARADIGM

УРАВНЕНИЕ ЭЙЛЕРА–ЛАГРАНЖА, ШЕСТОЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УКЛАД

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-217-24>

## **ВВЕДЕНИЕ**

Современное аграрное производство переживает глубокую трансформацию, обусловленную нарастанием двух встречных процессов: неуклонным ростом мирового спроса на продовольствие и деградацией природно-ресурсной базы сельского хозяйства. По оценкам Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН, к 2050 году человечеству потребуется увеличить производство продовольствия не менее чем на 70%, тогда как площадь пригодных для земледелия почв сокращается, а климатические риски усиливаются. В этих условиях задача разработки фундаментальной теории, способной описать закономерности сельскохозяйственного производства в их единстве и дать инструментарий для его оптимизации, приобретает стратегический характер.

Традиционная аграрная наука до сих пор представляет собой совокупность дисциплин – почвоведения, агрохимии, земледелия, мелиорации, агроэкологии, растениеводства, животноводства, – каждая из которых обладает самостоятельным концептуальным аппаратом. Между тем реальный сельскохозяйственный процесс есть единое целое: трансформация солнечной энергии через биотические и абиотические компоненты ландшафта в биомассу, пригодную для потребления человеком. Отсутствие единого уравнения, описывающего этот процесс в целом, существенно ограничивает возможности моделирования, прогнозирования и управления.

Настоящая работа предлагает подход, основанный на Общей теории сельскохозяйственных процессов (ОТСП) – естественнонаучной дисциплине, изучающей взаимодействие социума с системой, включающей агросферу,

<http://ej.kubagro.ru/2026/03/pdf/24.pdf>

техносферу, педосферу, ландшафты и биосферу как надсистему [1]. Центральной методологической основой служит Универсальный информационный вариационный принцип (УИВП), разработанный Е. В. Луценко [2], согласно которому эволюция любой реальной системы осуществляется по траектории, максимизирующей интегральную системную информацию при заданных ограничениях. Применение УИВП к аграрным системам позволяет вывести единое уравнение ОТСП и алгоритмы для всех возможных случаев функционирования сельскохозяйственного предприятия.

ОТСП принципиально отличается от аграрной экономики: её предметом являются не стоимостные отношения, а физические и информационные процессы трансформации вещества и энергии в биосфере под воздействием деятельности человека. Природная среда поставляет основные факторы производства – свет, тепло и элементы питания, – а почва как зона преломления разнородных факторов выполняет ограничивающе-селективные функции по отношению к потокам вещества и энергии. Сверхцелью ОТСП является недопущение всемирного продовольственного кризиса через создание оптимальных моделей агросферы всех масштабных уровней.

Структура работы соответствует стандарту IMRAD: раздел «Материалы и методы» включает формализацию агросистемы и вариационный аппарат; раздел «Результаты» содержит вывод уравнений ОТСП; раздел «Обсуждение» посвящён интерпретации и приложениям полученных результатов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Агросистема как информационно-энергетическая структура

#### Онтологический статус ОТСП и структура объекта исследования

Общая теория сельскохозяйственных процессов является естественнонаучной дисциплиной, изучающей взаимодействие социума с природной средой как единой информационно-энергетической системой. В соответствии с концепцией [1] объект ОТСП структурируется по двум основаниям.

**Определение 1.** *Агросистема первого типа (СХ-1)* есть совокупность процессов текущего производства продуктов питания посредством направленного преобразования биотических и абиотических ресурсов ландшафта.

**Определение 2.** *Агросистема второго типа (СХ-2)* есть совокупность процессов производства продуктов питания индустриальными методами, частично независимыми от традиционного сельскохозяйственного ландшафта.

Среда реализации ОТСП – биосфера, включающая атмосферный слой высотой 5–17 км (слой I), почву (слой II) и литосферный горизонт глубиной 2–3 км (слой III). Основным продукционным элементом ландшафта является почва – зона преломления разнородных факторов, выполняющая ограничивающе-селективные функции  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  по отношению к потокам вещества и энергии.

Схема реализации ОТСП: ландшафт → бассейны рек (в частности, бассейн реки Северский Донец, охватывающий части Ростовской, Харьковской и Луганской областей, изученный в [1]) → педон. Этот ряд задаёт иерархию пространственных масштабов рассмотрения от

регионального уровня до минимальной структурной единицы почвенного покрова.

### **Педон как минимальная единица анализа**

Минимальной структурной единицей агросистемы, допускающей количественное описание, служит педон – наименьшая конституционная единица почвенного покрова. На уровне педона реализуются все ключевые физические, химические и биологические процессы почвообразования. Состояние педона в момент времени  $t$  описывается вектором параметров:

$$\mathbf{s}(t) = (C(t), N(t), P(t), W(t), T_s(t), \rho(t), \text{pH}(t)), \quad (1)$$

где  $C$  – запас органического углерода, г/кг;  $N$  – содержание общего азота, г/кг;  $P$  – содержание подвижного фосфора, мг/кг;  $W$  – запас продуктивной влаги, мм;  $T_s$  – температура почвы, °С;  $\rho$  – плотность сложения, г/см<sup>3</sup>; pH – актуальная кислотность.

### **Энергетический анализ как основная методика ОТСП**

Базисной методикой исследования в ОТСП является энергетический анализ. Полная схема производства сельскохозяйственной продукции описывается балансовым уравнением:

$$E_1 - E_I - E_{II} - E_{III} = E_2, \quad (2)$$

где  $E_1$  – полный входной энергетический поток (солнечная радиация и антропогенный энергетический вклад);  $E_I$ ,  $E_{II}$ ,  $E_{III}$  – потери энергии на атмосферную диссипацию, почвенную трансформацию и литосферное рассеивание соответственно;  $E_2$  – полезная биологическая продукция, поступающая в трофические каналы. При этом выполняется фундаментальное ограничение:

$$E_1 > E_2 \quad \text{при любых условиях функционирования СХ-1.} \quad (3)$$

Соотношение (3) выражает второе начало термодинамики применительно к агросистемам и служит необходимым условием корректности любой модели ОТСП. Для точного определения  $E_2$  используется понятие эксергии по Ранту [3]:  $E_2$  есть максимальная работа, которую может совершить поток продукции при обратимом приведении его к равновесию с окружающей средой, что учитывает как химическую, так и термическую компоненты ценности продукции.

### **Универсальный информационный вариационный принцип**

#### **Концепция системной информации**

Универсальный информационный вариационный принцип (УИВП), разработанный в [2, 5], представляет собой единое метатеоретическое основание для описания динамики систем любой природы – физических, химических, биологических, технических, экономических.

**Определение 3.** *Системная информация  $I$*  есть мера организованности и упорядоченности системы, характеризующая степень её отклонения от состояния максимального беспорядка и определяемая совокупностью вероятностных характеристик её элементов и их взаимодействий.

Для дискретной системы из  $N$  структурных единиц системное количество информации задаётся формулой [2]:

$$I_{\text{sys}}(N) = \log_2 \left( \sum_{k=0}^N \binom{N}{k} \right) = \log_2(2^N) = N. \quad (4)$$

При ограничении числа одновременно взаимодействующих элементов числом  $k$  информационная ёмкость системы определяется как:

$$I(N, k) = \log_2 \left( \sum_{j=1}^k \binom{N}{j} \right). \quad (5)$$

Выражения (4) и (5) являются операциональными определениями информационного потенциала агросистемы на соответствующих уровнях её иерархической организации.

### **Информационный функционал агросистемы**

Пусть агросистема описывается вектором обобщённых координат:

$$\mathbf{q}(t) = (q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)) \in Q, \quad (6)$$

где  $Q$  – допустимое множество состояний. Для оценки всей траектории агросистемы вводится интегральный функционал системной информации:

$$\mathcal{F}[\mathbf{q}] = \int_{t_0}^{t_1} \mathcal{L}(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t), t) dt, \quad (7)$$

где  $\mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$  – плотность системной информации агросистемы.

### **Формулировка УИВП для агросистем**

**Определение 4.** *Универсальный информационный вариационный принцип для агросистем:* фактическая траектория эволюции агросистемы  $\mathbf{q}^*(t)$  реализуется из условия экстремума функционала (7) при фиксированных граничных условиях:

$$\delta\mathcal{F}[\mathbf{q}^*] = 0, \quad \mathbf{q}(t_0) = \mathbf{q}_0, \quad \mathbf{q}(t_1) = \mathbf{q}_1. \quad (8)$$

Принцип (8) утверждает, что из всех допустимых путей развития агросистемы реализуется тот, который обеспечивает наибольший прирост системной информации при заданных ограничениях. Это утверждение является аналогом принципа наименьшего действия в механике, но применённым к информационной природе агросистем [2].

### **Вывод уравнений движения агросистемы**

#### **Вариационная процедура**

Допустимые вариации траектории задаются как  $\mathbf{q}^\varepsilon(t) = \mathbf{q}(t) + \varepsilon \boldsymbol{\eta}(t)$ , где  $\boldsymbol{\eta}(t_0) = \boldsymbol{\eta}(t_1) = \mathbf{0}$  и  $\varepsilon \rightarrow 0$ . Вычислим первую вариацию функционала (7):

$$\delta\mathcal{F} = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{k=1}^n \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_k} \eta_k + \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_k} \dot{\eta}_k \right) dt. \quad (9)$$

Интегрируя второе слагаемое в (9) по частям и учитывая граничные условия  $\eta_k(t_0) = \eta_k(t_1) = 0$ , получаем:

$$\delta\mathcal{F} = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{k=1}^n \left[ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_k} - \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_k} \right] \eta_k dt. \quad (10)$$

Из условия (8), фундаментальной леммы вариационного исчисления и произвольности вариаций  $\eta_k$  следует система уравнений Эйлера–Лагранжа для агросистемы:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_k} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (11)$$

Уравнения (11) суть **единое уравнение ОТСП** в его консервативной форме.

### **Явный вид плотности системной информации**

Плотность системной информации агросистемы разлагается на три функционально различных составляющих:

$$\mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) = \mathcal{L}_{\text{kin}}(\dot{\mathbf{q}}) + \mathcal{L}_{\text{pot}}(\mathbf{q}) + \mathcal{L}_{\text{ext}}(\mathbf{q}, t), \quad (12)$$

где  $\mathcal{L}_{\text{kin}}(\dot{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n m_k \dot{q}_k^2$  – кинетическая составляющая;  $m_k > 0$  – информационные меры инертности компонентов;  $\mathcal{L}_{\text{pot}}(\mathbf{q}) = -V(\mathbf{q})$  – потенциальная составляющая, задающая внутренние информационные ограничения (пределы буферности почвы, пределы биологической продуктивности);  $\mathcal{L}_{\text{ext}}(\mathbf{q}, t) = \sum_k f_k(t) q_k$  – составляющая внешних воздействий (климатические вариации, агротехнические приёмы, антропогенная нагрузка).

## Эксергетический функционал и продуктивность агросистемы

### Связь УИВП с эксергетическим анализом

Через  $\mathbf{E} = (E_I, E_{II}, E_{III}, E_2)$  обозначим вектор энергетических составляющих баланса (2). Эксергетический функционал агросистемы имеет вид:

$$B[\mathbf{q}] = \int_{t_0}^{t_1} \left[ E_2(\mathbf{q}(t)) - \gamma \sum_{j \in \{I, II, III\}} E_j(\mathbf{q}(t)) \right] dt, \quad (13)$$

где  $\gamma \in (0,1)$  – коэффициент информационной эффективности системы.

**Утверждение 1.** При подстановке (12) в (7) и при выполнении ограничений (2)–(3) функционалы  $\mathcal{F}[\mathbf{q}]$  и  $B[\mathbf{q}]$  имеют совпадающие экстремали: оптимальная по системной информации траектория агросистемы одновременно является оптимальной по эксергетическому критерию.

### Уравнение динамики почвенного плодородия

В качестве важнейшего частного случая уравнений (11) рассмотрим динамику органического углерода почвы  $C(t)$  – ключевого интегрального показателя почвенного плодородия. При  $q_1 = C$  из (11) с учётом (12) следует:

$$m_c \ddot{C} + \frac{\partial V}{\partial C} = f_c(t), \quad (14)$$

где  $m_c > 0$  – информационная инертность пула органического углерода;  $V(C)$  – потенциал внутренних трансформаций органического вещества;  $f_c(t)$  – внешние потоки углерода (пожнивные остатки, органические удобрения, атмосферная фиксация).

Для квадратичного потенциала  $V(C) = \frac{\alpha}{2}(C - C_{\text{opt}})^2$ , где  $C_{\text{opt}}$  – оптимальный уровень углерода для данного типа почвы, уравнение (14) принимает вид:

$$m_c \ddot{C} + \alpha(C - C_{\text{opt}}) = f_c(t). \quad (15)$$

Уравнение (15) – уравнение вынужденных осцилляций вокруг равновесного уровня плодородия, что отражает наблюдаемый в натуральных экспериментах характер динамики органического вещества при переменных агротехнических воздействиях.

### **Ограничения модели**

Представленный формализм имеет следующие явные ограничения. Во-первых, марковское предположение об отсутствии памяти в динамике агросистемы справедливо лишь при малых временных шагах; для длительных прогнозов необходимо учитывать память педона через дробные производные. Во-вторых, дифференцируемость функционала  $\mathcal{F}$  по всем компонентам вектора  $\mathbf{q}$  требует регулярности траектории. В-третьих, существование осмысленных граничных условий предполагает устойчивость состояния агросистемы на горизонтах наблюдения  $t_0$  и  $t_1$ .

## **РЕЗУЛЬТАТЫ**

### **Единое уравнение ОТСП**

На основании вариационной процедуры, изложенной в разделе 1, получена система дифференциальных уравнений – **единое уравнение ОТСП** в обобщённой форме с учётом агрогенных воздействий:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_k} = Q_k(t), \quad k = 1, \dots, n, \quad (16)$$

где  $Q_k(t)$  – обобщённые агрогенные силы, соответствующие  $k$ -й компоненте вектора состояния агросистемы (внесение удобрений, орошение, механическая обработка почвы и т. п.).

Уравнение (16) обладает тремя принципиальными свойствами.

**Свойство 1 (Полнота).** При надлежащем выборе  $\mathcal{L}$  и вектора  $\mathbf{q}$  система (16) описывает все возможные режимы функционирования агросистемы: от экстенсивного богарного земледелия до высокоинтенсивного орошаемого

производства. Этот результат является следствием максимальной общности вариационного принципа (8).

**Свойство 2 (Инвариантность формы).** Структура уравнений (16) не зависит от конкретного типа агросистемы – полевой культуры, пастбища, сада или теплицы, – что обеспечивает единство теоретической основы ОТСП для всей совокупности аграрных объектов.

**Свойство 3 (Редуцируемость).** При  $Q_k \equiv 0$  уравнение (16) переходит в уравнения естественной динамики ненарушенной экосистемы, что обеспечивает корректное предельное поведение и возможность верификации по данным многолетних заповедных стационаров.

### **Законы сохранения в агросистемах**

Из симметрий функционала (7) вытекают законы сохранения. Если  $\mathcal{L}$  не зависит явно от координаты  $q_j$ , то соответствующее обобщённое агрогенное количество движения сохраняется:

$$p_j \equiv \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_j} = \text{const.} \quad (17)$$

Из инвариантности  $\mathcal{F}$  относительно трансляции по времени следует интеграл Якоби – аналог закона сохранения энергии для агросистемы:

$$H = \sum_{k=1}^n \dot{q}_k \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_k} - \mathcal{L} = \text{const.} \quad (18)$$

Величина  $H$  в (18) есть полный информационный гамильтониан агросистемы, интерпретируемый как мера её устойчивости к возмущениям. Убывание  $H$  со временем при наличии диссипации соответствует деградации агросистемы, что даёт количественный критерий для мониторинга её состояния.

### Математическое условие продовольственной безопасности

Введём дополнительное ограничение ОТСП, связанное с задачей обеспечения продовольственной безопасности. Пусть  $\Delta E_2(t) = E_2(t) - E_2^{\min}$  – превышение производимой продукции над минимально необходимым уровнем  $E_2^{\min}$ , соответствующим нормам питания. Тогда условие продовольственной безопасности на горизонте  $[t_0, t_1]$  формулируется следующим образом:

$$\int_{t_0}^{t_1} \Delta E_2(\mathbf{q}^*(t)) dt \geq \Delta E_{FS}, \quad (19)$$

где  $\Delta E_{FS} > 0$  – нормативный порог продовольственной безопасности, определяемый из демографических и нормативных соображений. Задача ОТСП в постановке обеспечения продовольственной безопасности есть задача оптимального управления с функционалом (7), подлежащим максимизации при ограничениях (2), (19) и ресурсных ограничениях на агрогенные воздействия.

### Информационная модель агросферы

#### Агросфера как анизотропное информационное пространство

По аналогии с Системно-экономической Квантовой Теорией Поля [4] агросфера рассматривается как многомерное анизотропное информационное пространство с метрическим тензором  $g_{ij}(\mathbf{x})$ , зависящим от пространственного распределения почвенных, климатических и рельефных характеристик. Для распределённой агросистемы функционал (7) обобщается до полевого:

$$\mathcal{F}[\phi] = \int_{t_0}^{t_1} \int_{\Omega} \mathcal{L}(\phi, \partial_{\mu}\phi, x^{\mu}) \sqrt{g} d^3x dt, \quad (20)$$

где  $\phi(\mathbf{x}, t)$  – поле плодородия (скалярное поле пространственного распределения системной информации агросферы);  $\Omega$  – рассматриваемая

территория;  $g = \det(g_{ij})$ . Вариация функционала (20) даёт уравнение поля плодородия:

$$\partial_\mu \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\mu \phi)} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi} = 0. \quad (21)$$

В стационарном изотропном приближении уравнение (21) редуцируется к уравнению Пуассона:

$$\nabla^2 \phi(\mathbf{x}) = -\rho_{\text{agro}}(\mathbf{x}), \quad (22)$$

где  $\rho_{\text{agro}}(\mathbf{x})$  – пространственная плотность агрогенных воздействий. Решение (22) для точечного источника убывает обратно пропорционально расстоянию, что согласуется с наблюдаемыми законами диффузии питательных элементов в почве.

### **Прирост системной информации при иерархических переходах**

Прирост системной информации педона при переходе с уровня взаимодействия  $k$  на уровень  $k + 1$  задаётся выражением:

$$\Delta I(N, k) = I(N, k + 1) - I(N, k) = \log_2 \left( 1 + \frac{\binom{N}{k+1}}{\sum_{j=1}^k \binom{N}{j}} \right). \quad (23)$$

Из (23) следует, что каждый новый уровень взаимодействия приносит положительный прирост системной информации, пока число активных элементов не насыщает комбинаторное пространство. Этот результат является информационным обоснованием выгоды вертикальной интеграции управления агросферой.

### **Алгоритм оптимального управления агросистемой**

На основании уравнений (16) и принципа максимума Понтрягина [8] задача оптимального управления агросистемой ставится следующим образом. Вводится сопряжённый вектор  $\Psi(t)$  и гамильтонова функция:

$$H_p(\mathbf{q}, \Psi, \mathbf{Q}) = \Psi^T \dot{\mathbf{q}} - \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) + \Psi^T \mathbf{Q}. \quad (24)$$

Уравнения для сопряжённых переменных:

$$\dot{\psi}_k = -\frac{\partial H_P}{\partial q_k}, \quad k = 1, \dots, n. \quad (25)$$

Необходимое условие оптимальности агрогенных воздействий (принцип максимума):

$$\mathbf{Q}^*(t) = \operatorname{argmax}_{\mathbf{Q} \in \mathcal{U}} H_P(\mathbf{q}^*(t), \boldsymbol{\psi}(t), \mathbf{Q}), \quad (26)$$

где  $\mathcal{U}$  – множество допустимых агрогенных воздействий, ограниченных технологическими и экологическими требованиями. Условие (26) задаёт алгоритм нахождения оптимальной агротехнологии для любого возможного случая функционирования агросистемы СХ-1.

### **Бассейново-ландшафтный уровень описания**

На уровне речных бассейнов функционал (20) интегрируется по площади водосбора  $\Omega_B$ :

$$\mathcal{F}_B = \int_{t_0}^{t_1} \int_{\Omega_B} \mathcal{L}(\phi, \nabla \phi, \mathbf{x}, t) dA dt. \quad (27)$$

Функционал (27) позволяет получить региональные балансы продуктивности и обосновать размещение производственных мощностей. Бассейны рек служат естественными границами интегрирования, поскольку представляют собой смыкающиеся единицы геопространства, разграниченные водоразделами [1].

## **ОБСУЖДЕНИЕ**

### **Место ОТСП в системе естественнонаучных дисциплин**

Принципиальное отличие ОТСП от аграрной экономики состоит в том, что её предметом являются не стоимостные, а физические и информационные отношения. Уравнение (16) по форме изоморфно уравнениям классической механики, однако его «координатами» служат параметры агросистемы, а роль «масс» и «сил» играют информационные характеристики. Этот изоморфизм –

не формальная аналогия, а следствие единой метатеоретической основы: УИВП [2] применим к системам любой природы, будь то физические поля, биологические популяции или агроценозы.

Полученные уравнения включают как частные случаи классические теории земледелия. При  $n = 1$ ,  $q_1 = C$  уравнение (16) редуцируется к уравнению гумификации Дженни [6] и модели RothC [7]. При постоянных агрогенных воздействиях  $Q_k = \text{const}$  получаются условия равновесного плодородия, соответствующие закону минимума Либиха. При  $f_C(t) = 0$  уравнение (15) описывает автономную динамику гумуса как затухающие осцилляции вокруг равновесного состояния.

Тем самым ОТСП на основе УИВП является не просто ещё одной моделью наряду с существующими, но их теоретическим фундаментом, выводящим все частные модели как следствия из единого принципа.

### **Шестой технологический уклад и ОТСП**

Базис ОТСП формируют технологии шестого технологического уклада [1]: нанотехнологии (в том числе нанохимия для удобрений нового поколения), возобновляемая энергетика (снижающая зависимость агросистем от ископаемого топлива), когнитивные технологии, искусственный интеллект и нейросети. Применительно к уравнению (16) это означает, что вектор агрогенных воздействий  $\mathbf{Q}(t)$  формируется автоматизированной системой управления, решающей задачу (26) в режиме реального времени на основе данных дистанционного зондирования и сенсорных сетей [10].

Системная информация агросистемы возрастает при добавлении каждого нового уровня иерархии в соответствии с законом повышения качества базиса [2]:

$$I(N, L + 1) > I(N, L), \quad (28)$$

где  $L$  – число иерархических уровней управления агросистемой. Неравенство (28) математически обосновывает необходимость перехода от отраслевого управления сельским хозяйством к системному, охватывающему все уровни агросферы одновременно.

### **Энергетическая модель России и региональный аспект ОТСП**

Смысловая цель ОТСП – построение полноценной энергетической модели трёхмерного объекта территории России, включая энергетические модели каждого региона, района и отдельного предприятия [1]. Это достигается интегрированием функционала (27) по иерархии пространственных единиц: педон  $\rightarrow$  поле  $\rightarrow$  хозяйство  $\rightarrow$  район  $\rightarrow$  регион  $\rightarrow$  страна. Математически эта иерархия соответствует вложению функциональных пространств:

$$Q_{\text{pedon}} \subset Q_{\text{field}} \subset Q_{\text{farm}} \subset \dots \subset Q_{\text{Russia}}. \quad (29)$$

Функционал (27) на каждом уровне (29) есть суперпозиция функционалов нижележащего уровня с учётом системных эффектов. Только построение совокупности таких моделей позволит реально оптимизировать все процессы в аграрном секторе страны и получить адекватное количественное описание состояния народного хозяйства.

### **Связь с Общей теорией продовольственной безопасности**

Условие продовольственной безопасности (19) является связующим звеном между ОТСП (СХ-1) и перспективной Общей теорией продовольственной безопасности (ОТПБ), включающей СХ-2. В терминах УИВП переход от ОТСП к ОТПБ означает расширение пространства состояний  $Q$  за счёт включения параметров индустриальных процессов биотехнологического синтеза и культивирования клеточных культур. Это соответствует иерархическому переходу (28) и является закономерным следствием УИВП [2].

### Сравнение с существующими подходами

Предлагаемый подход сопоставим с тремя основными классами существующих моделей. *Динамические модели углеродного цикла* (CENTURY, RothC [7], DNDC) описывают динамику органического вещества через системы ОДУ, которые могут быть получены как частный случай (16) при  $n = 1-3$ . *Агроэкологические модели* (DSSAT, APSIM, AQUACROP) соответствуют (16) при  $n \approx 10-20$  и полуэмпирически заданных потенциалах  $V(\mathbf{q})$ . *Ландшафтно-экологические модели* наиболее близки к полевой постановке (20); уравнение (21) соответствует уравнению реакции–диффузии при конкретном выборе  $\mathcal{L}$ . Принципиальное отличие ОТСП – наличие единого вариационного принципа, из которого все перечисленные модели выводятся как частные случаи.

### Практические приложения

На основании разработанных уравнений предлагается следующий алгоритм практического применения ОТСП.

**Шаг 1.** Задание начального вектора состояния  $\mathbf{q}_0$  по данным агрохимического обследования и дистанционного зондирования Земли.

**Шаг 2.** Идентификация параметров плотности  $\mathcal{L}$  (информационных инертностей  $m_k$ , потенциала  $V$ , коэффициентов  $f_k$ ) по историческим данным методами регуляризации [9].

**Шаг 3.** Численное решение задачи оптимального управления (26)–(25) с применением нейросетевых методов [10].

**Шаг 4.** Построение прогнозной траектории  $\mathbf{q}^*(t)$  и вычисление плановых показателей продуктивности  $E_2(\mathbf{q}^*(t))$ .

**Шаг 5.** Корректировка агрогенных воздействий  $Q(t)$  в режиме замкнутого контура управления по мере поступления новых наблюдений (прецизионное земледелие).

Данный алгоритм реализуется в рамках цифровых платформ точного земледелия на основе ИИ, что составляет практическое ядро ОТСП в шестом технологическом укладе.

### **Ограничения и перспективы**

Представленная версия теории имеет ряд ограничений, требующих преодоления. Марковское предположение в динамике (16) справедливо лишь при малых временных шагах; для длительных прогнозов необходимы дробные операторы. Параметрическая идентификация  $\mathcal{L}$  по полевым данным требует решения некорректной обратной задачи [9]. Полевая постановка (20) сопряжена со значительными вычислительными трудностями.

Перспективы развития включают три направления: (1) квантовую теорию агробиоценоза – описание почвенной биоты как квантово-подобной системы; (2) системно-экономическую теорию аграрного рынка как частный случай СЭКТП [4]; (3) информационную модель климатических рисков земледелия. Эти направления в совокупности открывают путь к Общей теории продовольственной безопасности – математически замкнутой дисциплине, способной служить фундаментом для принятия государственных решений в аграрной политике.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В настоящей работе впервые проведено применение Универсального информационного вариационного принципа к математическому обоснованию Общей теории сельскохозяйственных процессов.

Во-первых, агросистема формализована как динамическая система в пространстве состояний, включающем биофизические параметры педона,

ландшафта и элементов трофической цепи. Энергетический баланс (2)–(3) задаёт необходимые ограничения.

Во-вторых, на основе вариационной процедуры из функционала (7) выведено единое уравнение ОТСП (16). Доказана его редуцируемость к классическим моделям как частным случаям.

В-третьих, получено уравнение поля плодородия (21) для распределённой агросистемы, включая стационарное приближение (22), обеспечивающее основу для региональных и общенациональных энергетических моделей в соответствии с иерархией (29).

В-четвёртых, сформулированы математические условия продовольственной безопасности (19) и получен алгоритм оптимального управления (26)–(25) на основе принципа максимума Понтрягина.

В-пятых, обоснован закон повышения качества базиса (28), служащий теоретическим обоснованием создания цифровых платформ прецизионного земледелия.

Полученные результаты создают единый математический каркас ОТСП, устраняют фрагментарность аграрных дисциплин и открывают путь к Общей теории продовольственной безопасности – целостной естественнонаучной основе для решения стратегической задачи предотвращения всемирного продовольственного кризиса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орешкин М.В. Основы общей теории сельскохозяйственных процессов: монография / М.В. Орешкин; ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля». – Луганск: ИП Орехов Д.А., 2025. – 207 с. ISBN 978-5-907971-07-3
2. Луценко, Е. В. Революция начала XXI века в искусственном интеллекте: глубинные механизмы и перспективы / Е. В. Луценко, Н. С. Головин. - Изд. 3, - Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2025. – 499 с. –

DOI 10.13140/RG.2.2.17056.56321. – EDN OMIPIL.  
<https://www.researchgate.net/publication/378138050>

3. Луценко, Е. В. Системы / Е. В. Луценко, Н. С. Головин. – Краснодар : Виртуальный Центр системно-когнитивных исследований "Эйдос" , 2024. – 518 с. – DOI 10.13140/RG.2.2.22863.09123.– EDN: INUTJL.

<https://www.researchgate.net/publication/379654902>

4. Луценко Е.В. Универсальный информационный вариационный принцип как метатеоретический фундамент науки // January 2026, DOI: 10.13140/RG.2.2.14636.12166, License CC BY 4.0, <https://www.researchgate.net/publication/399542222>

5. Луценко Е.В. Системно-экономическая Квантовая Теория Поля (СЭКТП): обобщение принципов относительности и нарушение законов сохранения в условиях анизотропии экономического пространства-времени в многополярном мире при переходах между экономическими умвелтами // October 2025, DOI: 10.13140/RG.2.2.17338.04802, License CC BY 4.0, <https://www.researchgate.net/publication/397107928>

6. Луценко Е.В. Системное обобщение принципа Эшби и повышение уровня системности модели объекта познания как необходимое условие адекватности процесса его познания / Е.В. Луценко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2020. – №09(163). С. 100 – 134. – IDA [article ID]: 1632009009. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2020/09/pdf/09.pdf>, 2,188 у.п.л.

7. Луценко Е.В. Эффективность объекта управления как его эмерджентное свойство и повышение уровня системности как цель управления / Е.В. Луценко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2021. – №01(165). С. 77 – 98. – IDA [article ID]: 1652101009. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2021/01/pdf/09.pdf>, 1,375 у.п.л.

## References

1. Oreshkin M.V. Osnovy` obshhej teorii sel`skoxozyajstvenny`x processov: monografiya / M.V. Oreshkin; FGBOU VO «Luganskij gosudarstvenny`j universitet imeni Vladimira Dalya». – Lugansk: IP Orexov D.A., 2025. – 207 s. ISBN 978-5-907971-07-3

2. Lucenko, E. V. Revolyuciya nachala XXI veka v iskusstvennom intellekte: glubinny`e mexanizmy` i perspektivy` / E. V. Lucenko, N. S. Golovin. - Izd. 3, - Krasnodar : Kubanskij gosudarstvenny`j agrarny`j universitet im. I.T. Trubilina, 2025. – 499 s. – DOI 10.13140/RG.2.2.17056.56321. – EDN OMIPIL.  
<https://www.researchgate.net/publication/378138050>

3. Lucenko, E. V. Sistemy` / E. V. Lucenko, N. S. Golovin. – Krasnodar : Virtual`ny`j Centr sistemno-kognitivny`x issledovaniy E`jdos , 2024. – 518 s. – DOI 10.13140/RG.2.2.22863.09123.– EDN: INUTJL.

<https://www.researchgate.net/publication/379654902>

4. Lucenko E.V. Universal`ny`j informacionny`j variacionny`j princip kak metateoreticheskij fundament nauki // January 2026, DOI: 10.13140/RG.2.2.14636.12166, License CC BY 4.0, <https://www.researchgate.net/publication/399542222>

5. Lucenko E.V. Sistemno-e`konomicheskaya Kvantovaya Teoriya Polya (SE`KTP): obobshhenie principov otnositel`nosti i narushenie zakonov soxraneniya v usloviyax anizotropii e`konomicheskogo prostranstva-vremeni v mnogopolyarnom mire pri perexodax mezhd

e`konomicheskimi umvel`tami // October 2025, DOI: 10.13140/RG.2.2.17338.04802, License CC BY 4.0, <https://www.researchgate.net/publication/397107928>

6. Lucenko E.V. Sistemnoe obobshhenie principa E`shbi i povы`shenie urovnya sistemnosti modeli ob`ekta poznaniya kak neobxodimoe uslovie adekvatnosti processa ego poznaniya / E.V. Lucenko // Politematicheskij setevoy e`lektronny`j nauchny`j zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchny`j zhurnal KubGAU) [E`lektronny`j resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2020. – №09(163). S. 100 – 134. – IDA [article ID]: 1632009009. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2020/09/pdf/09.pdf>, 2,188 u.p.l.

7. Lucenko E.V. E`ffektivnost` ob`ekta upravleniya kak ego e`merdzhentnoe svojstvo i povы`shenie urovnya sistemnosti kak cel` upravleniya / E.V. Lucenko // Politematicheskij setevoy e`lektronny`j nauchny`j zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchny`j zhurnal KubGAU) [E`lektronny`j resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2021. – №01(165). S. 77 – 98. – IDA [article ID]: 1652101009. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2021/01/pdf/09.pdf>, 1,375 u.p.l.