DOI: 10.65322/j.srd.02162026.15

УДК 631.15

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Кабулов Анвар, *д.т.н., профессор,*
Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека,
E-mail: anvarkabulov@mail.ru
Уринбаев Эркин, *д.ф.-м.н., доцент,*
Самаркандский государственный университет имени Шарофа Рашидова,
Ярашов Иномжон, *PhD по ф.-м.н., доцент,*
Университет мировой экономики и дипломатии,
Кудайбергенов Адилбай, *PhD по т.н., доцент,*
Каракалпакский государственный университет имени Бердаха

Аннотация. *В данной статье на основе системного подхода анализируются экологические факторы в регионе Аральского моря, в частности скорость ветра, влажность почвы и распределение солевых частиц, а также их влияние на сельскохозяйственное производство. В исследовании описывается процесс рассеивания вредных частиц с использованием методов математического моделирования, рассматривается вопрос оптимизации производства в условиях изменчивости и неопределенности экологических условий. Кроме того, с учетом скорости ветра и влажности почвы в качестве основных определяющих факторов, устанавливается прямая связь воздействия на окружающую среду с эффективностью производства посредством уравнений, связанных с объемом миграции частиц. На основе принципов алгоритмико-системного анализа предлагается модель сети Петри для формализации процессов принятия решений, учитывающих структурные, динамические и оптимальные характеристики сельскохозяйственного производства. Полученная модель, описывающая этапы экологического мониторинга, обработки данных, прогнозирования и оптимального планирования, рекомендуется в качестве эффективного инструмента для оценки экологических рисков, рационального использования ресурсов и устойчивого развития сельскохозяйственного производства.*

Abstract. *This article employs a systems approach to analyze environmental factors in the Aral Sea region-specifically wind speed, soil moisture, and salt particle distribution—and their subsequent impact on agricultural production. The study describes the dispersion process of harmful particles using mathematical modeling techniques and addresses the issue of production optimization under conditions of environmental variability and uncertainty. Furthermore, considering wind speed and soil moisture as the primary determinants, a direct correlation is established between environmental impact and production efficiency through equations related to particle migration volume. Based on the principles of algorithmic and systems analysis, a Petri net model is proposed to formalize decision-making processes that account for the structural, dynamic, and optimal characteristics of agricultural production. The resulting model, which describes the stages of environmental monitoring, data processing, forecasting, and optimal planning, is recommended as an effective tool for environmental risk assessment, rational resource management, and the sustainable development of agricultural production.*

Annotatsiya. *Ushbu maqolada tizimli yondashuv asosida Orol bo‘yi mintaqasidagi ekologik omillar, xususan, shamol tezligi, tuproq namligi va tuz zarralarining taqsimlanishi hamda ularning qishloq xo‘jaligi ishlab chiqarishiga ta’siri tahlil qilingan. Tadqiqotda matematik modellashtirish usullaridan foydalangan holda zararli zarralarning tarqalish jarayoni*

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.15

tavsiflangan, ekologik sharoitlarning o‘zgaruvchanligi va noaniqligi sharoitida ishlab chiqarishni optimallashtirish masalasi ko‘rib chiqilgan. Bundan tashqari, shamol tezligi va tuproq namligini asosiy belgilovchi omillar sifatida hisobga olgan holda, zarralar migratsiyasi hajmi bilan bog‘liq tenglamalar orqali atrof-muhitga ta’sirning ishlab chiqarish samaradorligi bilan bevosita bog‘liqligi o‘rnatilgan. Algoritmik-tizimli tahlil tamoyillari asosida qishloq xo‘jaligi ishlab chiqarishining tarkibiy, dinamik va optimal xususiyatlarini hisobga oluvchi qaror qabul qilish jarayonlarini formallashtirish uchun Petri tarmog‘i modeli taklif etilgan. Ekologik monitoring, ma’lumotlarni qayta ishlash, prognozlash va optimal rejalashtirish bosqichlarini tavsiflovchi olingan model ekologik xavflarni baholash, resurslardan oqilona foydalanish va qishloq xo‘jaligi ishlab chiqarishini barqaror rivojlantirish uchun samarali vosita sifatida tavsiya etiladi.

Ключевые слова: *экологические факторы, сельскохозяйственное производство, математическое моделирование, сеть Петри, оптимизация производства, аэрозольные частицы.*

Keywords: *environmental factors, agricultural production, mathematical modeling, Petri net, production optimization, aerosol particles.*

Kalit so‘zlar: *ekologik omillar, qishloq xo‘jaligi ishlab chiqarishi, matematik modellashtirish, Petri tarmog‘i, ishlab chiqarishni optimallashtirish, aerozol zarralari.*

Введение. В настоящее время в мировом научном пространстве формируется фундаментальная база для разработки и применения современных математических подходов, направленных на моделирование, оптимизацию и управление процессами, связанными с развитием сельского хозяйства и рациональным использованием природных ресурсов. В этой связи особую значимость приобретает совершенствование механизмов формирования управленческих решений, основанных на создании и адаптации различных типов математических моделей. При этом возникает необходимость в научном обосновании методов разработки оптимизационных моделей аграрного производства, а также в создании эффективных алгоритмических и управленческих инструментов принятия решений[1].

В Республике Узбекистан вопросам эффективного и бережного использования природных ресурсов, особенно на орошаемых территориях, уделяется приоритетное внимание с учетом экологических требований. В рамках Стратегии действий по пяти ключевым направлениям развития страны на 2017–2021 годы особое место занимает задача модернизации и ускоренного развития аграрного сектора. В частности, предусматривается дальнейшее совершенствование структуры посевных площадей и рациональное размещение сельскохозяйственной продукции. В условиях усиливающегося дефицита водных ресурсов и одновременного роста потребности в них проблема их рационального распределения и эффективного использования становится одной из наиболее актуальных задач современного этапа развития. Ограниченность водных запасов требует внедрения научно обоснованных и ресурсосберегающих подходов к их использованию[2].

Оптимизация специализации и территориального размещения сельскохозяйственного производства с учетом принципов рационального природопользования представляет собой сложную и многокомпонентную научно-практическую задачу. В связи с этим поиск эффективных путей совершенствования данных процессов приобретает особую актуальность. Применение методов математического моделирования, системного анализа и других аналитических инструментов при решении подобных задач позволяет добиться более обоснованных и результативных управленческих решений. В целом использование оптимизационных моделей для формирования информационной базы, включающей одномерные, многомерные и промежуточные аналитические данные, рассматривается как прогрессивное направление развития. Это, в

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.15

свою очередь, способствует повышению эффективности деятельности сельскохозяйственных предприятий и улучшению качества производимой продукции.

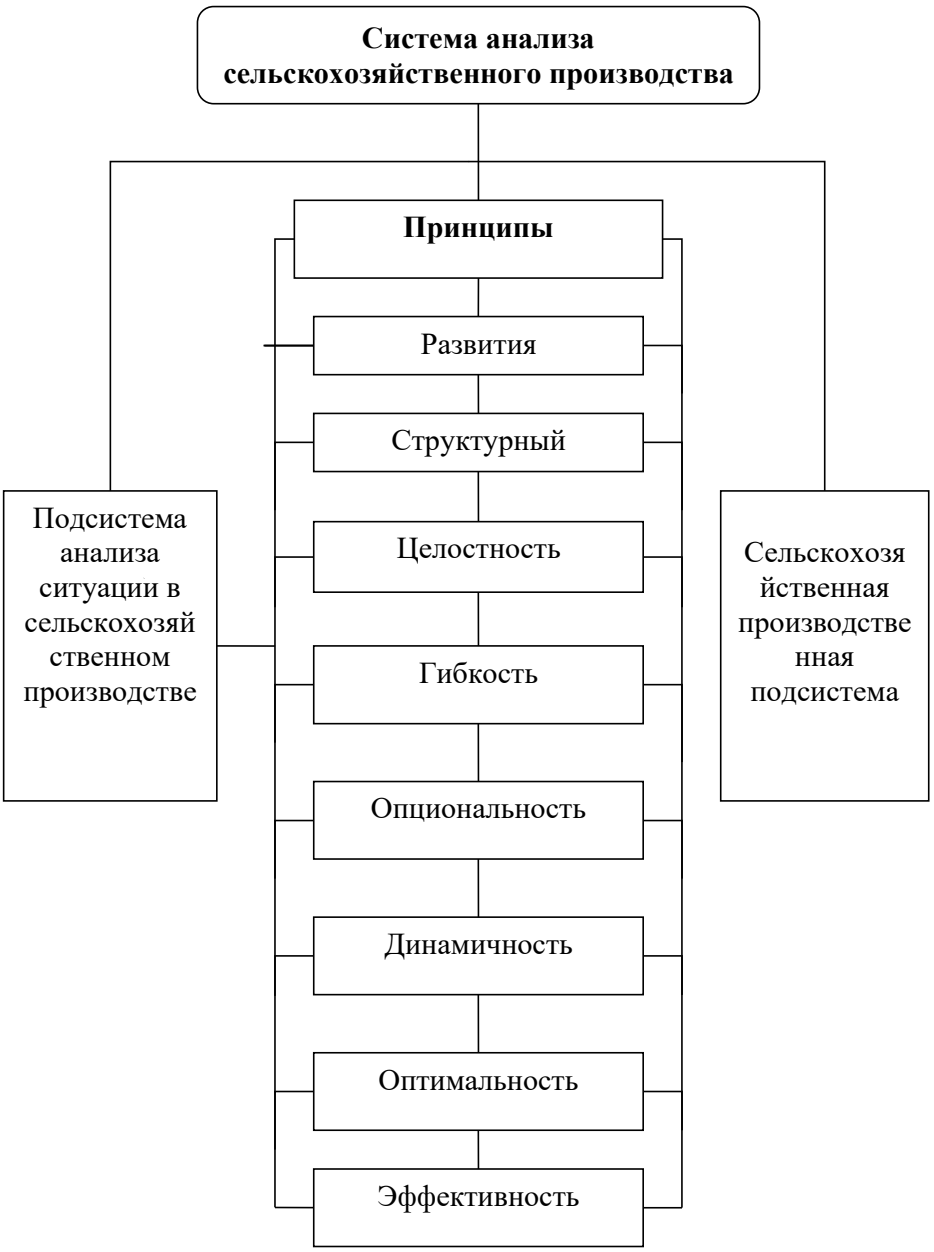


Рисунок 1. Основные принципы системного анализа производства на сельскохозяйственном предприятии

Совершенствование методов анализа аграрного производства и повышение их результативности должны основываться на принципах системного подхода. Такой подход предполагает комплексное исследование текущего состояния производственных процессов, их динамики, особенностей развития, а также всесторонний учет экономических факторов и взаимосвязей. Методология системного анализа непосредственно связана с необходимостью разработки и применения совокупности принципов, направленных на повышение эффективности промежуточного анализа и совершенствование методов оптимизации, что нашло отражение в ряде научных исследований[3]. В рамках настоящего исследования обобщены и структурированы ключевые положения методологии системного

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.15

подхода к анализу деятельности сельскохозяйственных предприятий, а также выделены наиболее значимые направления, представленные на рисунке 1.

Суть принципа разработки состоит в том, что сельскохозяйственное предприятие рассматривается как ключевой элемент как при анализе текущего состояния отдельных подсистем аграрного производства, так и при их последующей оптимизации[3]. Данный принцип ориентирован на повышение качества теоретико-методологических подходов к исследованию экономических процессов в их динамическом развитии, а также на совершенствование методов формирования и подготовки первичной информации. В рамках этого подхода возникает необходимость создания таких оптимизационных моделей, которые позволяют не только оценивать текущее состояние, но и прогнозировать возможные траектории развития всей производственной системы в перспективе[4]. Это, в свою очередь, обусловливает дальнейшее развитие и совершенствование методов моделирования аграрных производственных систем.

Принцип структурированности предполагает необходимость систематизации исходных данных, используемых как для анализа текущего состояния сельскохозяйственного производства, так и для решения задач оптимизации[5]. Он требует дифференциации информационных массивов в зависимости от их функционального назначения и содержательных характеристик. С учетом данного подхода проводится исследование структуры объекта анализа, после чего, опираясь на логику его построения, осуществляется поэтапное формирование структурной модели. В результате объект декомпозируется на отдельные элементы, каждый из которых приобретает относительную самостоятельность. Итоги анализа по отдельным компонентам обобщаются и используются для достижения целевых ориентиров, сформированных на этапе промежуточного анализа. Таким образом, структурирование информации обеспечивает ее целенаправленную ориентацию на построение конкретных оптимизационных моделей.

Принцип целостности ориентирован на формирование такой информационной базы, которая обеспечивает всестороннее и комплексное исследование состояния и характеристик анализируемого объекта[6]. В рамках данного принципа осуществляется переход от изучения отдельных элементов системы к построению совокупности взаимосвязанных моделей, позволяющих прогнозировать развитие всей технологической системы. Это создает основу для формирования комплекса прогнозных моделей, обеспечивающих оценку будущих сценариев развития. Принцип гибкости (адаптивности) требует подготовки исходной информации таким образом, чтобы она могла использоваться для проведения как одномерного, так и многомерного, а также промежуточного анализа достигнутого уровня развития сельскохозяйственного производства. При этом информация должна быть согласована с возможными прогнозными сценариями. Реализация данного принципа позволяет корректировать целевые установки анализа и оптимизации в зависимости от изменяющихся внешних и внутренних условий, а также определять направления повышения эффективности производства[7].

Принцип изменчивости играет ключевую роль в процессах планирования и прогнозирования. Учитывая неопределенность воздействия различных факторов на развитие системы, возникает необходимость разработки альтернативных вариантов планов, отражающих доминирующее влияние тех или иных условий. Практическая значимость данного принципа особенно высока при формировании годовых производственных планов сельскохозяйственных предприятий, когда разрабатываются сценарии с учетом как благоприятных, так и неблагоприятных условий. Такой подход позволяет классифицировать варианты планов по уровню надежности и вероятности их реализации. Например, сценарий, основанный на благоприятных условиях, может рассматриваться как наиболее вероятный, тогда как вариант, учитывающий неблагоприятные факторы,

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.15

относится к менее надежным. Принцип динамизма предполагает проведение анализа состояния сельскохозяйственного производства с учетом временных изменений за определенный отчетный период. Он обусловливает необходимость разработки динамических прогнозов, охватывающих будущие временные интервалы. Реализация данного подхода осуществляется посредством создания динамических моделей промежуточного прогнозирования, позволяющих учитывать изменение показателей во времени.

Принцип оптимальности занимает центральное место в задачах повышения эффективности сельскохозяйственного производства. Он предполагает разработку многовариантных решений с учетом различных целевых установок и критериев. В рамках данного принципа осуществляется поиск таких плановых решений, которые обеспечивают экстремальные значения целевых функций. Особое значение здесь приобретает задача выбора адекватных критериев оптимизации, поскольку многокритериальный характер системы требует учета различных показателей эффективности. Ошибки в выборе критерия могут привести к снижению адаптивности модели и ее несоответствию реальным условиям функционирования. Реализация принципа оптимальности также тесно связана с разработкой эколого-экономических моделей, которые позволяют учитывать как экономические, так и экологические аспекты планирования. Такие модели обеспечивают формирование оптимальных решений с учетом совокупности критериев эффективности и их структурной взаимосвязи.

Принцип эффективности направлен на обеспечение рационального функционирования сельскохозяйственного предприятия посредством анализа текущего состояния и оптимизации производственных процессов. Его реализация предполагает создание интегрированных информационных систем, включающих базы данных для одномерного, многомерного и промежуточного анализа, а также для планирования производственной деятельности. Кроме того, соблюдение данного принципа способствует сокращению временных и материальных затрат на информационное, математическое, программное и техническое обеспечение. Комплексный учет перечисленных принципов является необходимым условием повышения качества анализа и планирования в аграрном секторе. Их применение в рамках системного подхода становится возможным благодаря использованию методов математического моделирования, которые позволяют исследовать сложные экономические системы через совокупность логически, информационно и алгоритмически взаимосвязанных моделей.

Формализация модели на основе сети Петри

Для формального описания процессов анализа экологических факторов и их влияния на сельскохозяйственное производство в Приаралье предлагается использование аппарата сетей Петри. Данная модель позволяет отразить причинно-следственные связи между этапами мониторинга, моделирования, прогнозирования и принятия управленческих решений.

Определим множество позиций сети Петри следующим образом:

P_1 – Экологические данные (скорость ветра, влажность)

P_2 – Состояние почвы (влажность, засоленность)

P_3 – Источник аэрозольных частиц

P_4 – Процесс распространения частиц

P_5 – Блок вычисления математической модели

P_6 – Результаты прогнозирования

P_7 – Система принятия решений

P_8 – Оптимальное планирование

P_9 – Состояние сельскохозяйственного производства

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.15

Таким образом, множество позиций можно записать в виде:

$$P = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9\}$$

Множество переходов определяется следующим образом:
T_1 – Сбор данных
T_2 – Определение параметров
T_3 – Инициация процесса эрозии
T_4 – Запуск модели распространения
T_5 – Вычисления (численные методы)
T_6 – Прогнозирование
T_7 – Выработка решений
T_8 – Оптимизация планирования
Соответственно:

$$T = \{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8\}$$

Связи между позициями и переходами задаются следующим образом:

$$F = \{(P_1, T_1), (T_1, P_2), (P_2, T_2), (T_2, P_3), (P_3, T_3),$$
$$(T_3, P_4), (P_4, T_4), (T_4, P_5), (P_5, T_5), (T_5, P_6), (P_6, T_6),$$
$$(T_6, P_7), (P_7, T_7), (T_7, P_8), (P_8, T_8), (T8, P_9)\}$$

Разработанная сеть Петри описывает последовательный и взаимосвязанный процесс:

- экологического мониторинга (сбор и анализ данных);
- протекания физических процессов (эрозия почвы и распространение аэрозолей);
- математического моделирования и численных вычислений;
- прогнозирования состояния системы;
- формирования и принятия управленческих решений;
- оптимизации сельскохозяйственного производства.

Данная формализация позволяет учитывать динамический характер системы, неопределённость внешних факторов и многокритериальность задач оптимизации. Использование сети Петри обеспечивает наглядное представление структуры процесса, а также создаёт основу для дальнейшей разработки интеллектуальных алгоритмических систем управления.

Ярким примером экологических последствий нерационального природопользования в Центральной Азии является высохшее дно Аральского моря, на месте которого сформировались солончаковые территории. Эти зоны выступают мощным источником распространения в атмосферу токсичных солей, пылевых частиц и остатков пестицидов, оказывая негативное воздействие на окружающую среду региона. В рамках настоящего раздела рассматривается математическая модель распространения пылевых и солевых аэрозолей, формирующихся из наземных источников, с учетом влияния метеорологических факторов. Особое внимание уделяется различию в поведении тяжелых и легких аэрозольных частиц.

Для решения задач экологического мониторинга, прогнозирования состояния окружающей среды и поддержки управленческих решений разработан комплекс математических моделей и программных средств. В данных разработках учитываются процессы почвенной эрозии, климатические и погодные условия, физико-механические характеристики аэрозольных частиц, а также ряд других значимых факторов. С целью прогноза распространения аэрозолей в окружающей среде, нахождения количества

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.15

аэрозолей в рассматриваемой области D и количества выпавших аэрозолей на подстилающую поверхность воспользуемся математической моделью [2]:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}+u\frac{\partial\theta}{\partial x}+v\frac{\partial\theta}{\partial y}+\left(w-w_g\right)\frac{\partial\theta}{\partial z}+\sigma\theta=\mu\Delta\theta+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial\theta}{\partial z}\right)+Q\delta\left(x,y,z\right); \quad (1)$$

$$\theta\left(x,y,z,0\right)=\theta_0\left(x,y,z\right); \quad (2)$$

$$-\mu\frac{\partial\theta}{\partial x}\bigg|_{x=0}=\gamma\left(\theta-\theta_a\right);\ \ \mu\frac{\partial\theta}{\partial x}\bigg|_{x=L_x}=\gamma\left(\theta-\theta_a\right); \quad (3)$$

$$-\mu\frac{\partial\theta}{\partial y}\bigg|_{y=0}=\gamma\left(\theta-\theta_a\right);\mu\frac{\partial\theta}{\partial y}\bigg|_{y=L_y}=\gamma\left(\theta-\theta_a\right); \quad (4)$$

$$-k\frac{\partial\theta}{\partial z}\bigg|_{z=0}=\gamma(\beta\theta-F_0); \quad (5)$$

$$-k\frac{\partial\theta}{\partial z}\bigg|_{z=H}=\gamma\left(\theta-\theta_a\right). \quad (6)$$

При $H=0$ имеем приподнятый источник на уровне $z=H$ $\left(F_0=0\right)$. При наземных источниках $F_0\neq0$ $\left(Q=0\right)$.

Задачу (1)-(6) рассмотрим в области $D=\left(0<x<a,\ 0<y<b,\ 0<z<H\right)$, когда источник расположен в приземном слое (рис. 2). На рис. 2 «крестиками» обозначены надземные источники загрязнения атмосферы.

Величина F_0 является функцией от x,y,z,t и должна определяться по экспериментальным данным в зависимости от метеорологических условий, свойств подстилающей поверхности, размера и плотности пылевых частиц.

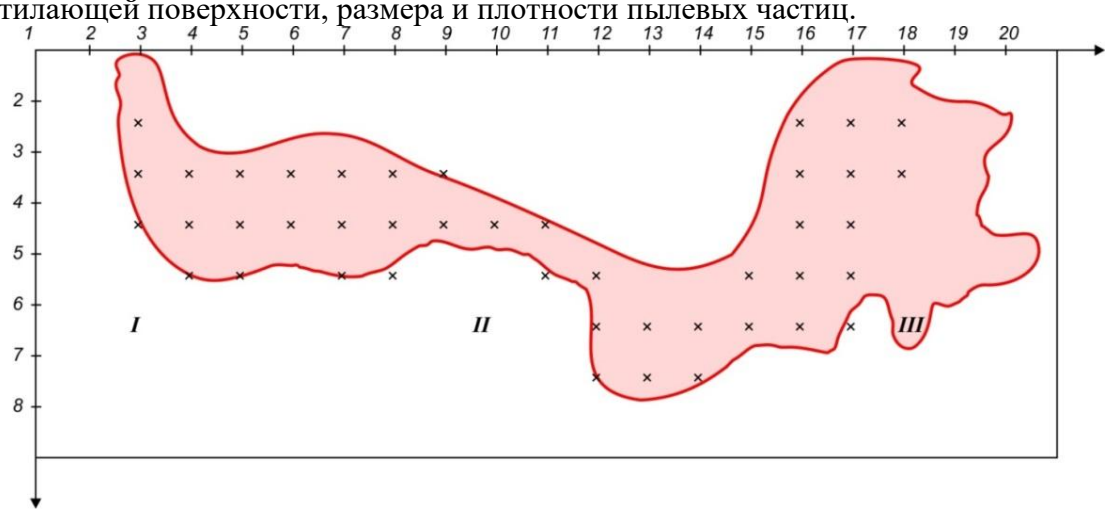


Рисунок 2. Расположение источников на наземном слое в осушенной части Приаралья

Для определения k рассмотрим следующие модели:

1. $k=const,\ u,v,w$ - $const$;

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.15

$$2.\ k=\begin{cases} v+k_1\cdot\dfrac{z}{z_1}, & z\le h, \\ v+k_1\cdot\dfrac{h}{z_1}, & z>h, \end{cases} \qquad v=|v|\cdot z^n;$$

$$3.\ k=k(z),\ v=v(z),\ w=w(z),$$

где h – высота приземного слоя, v – турбулентная вязкость.

Результаты статистического анализа данных, отражающих влияние различных погодно-климатических факторов на процессы переноса частиц с поверхности почвы, свидетельствуют о том, что определяющим параметром, инициирующим развитие эрозионных процессов, выступает скорость воздушного потока. В то же время ключевым сдерживающим фактором является уровень влажности почвенного покрова. Прочие параметры, несмотря на их определённое участие в формировании или подавлении эрозии, характеризуются неоднозначностью воздействия и не оказывают доминирующего влияния.

В связи с этим при построении математических моделей, описывающих распространение вредных аэрозольных частиц и динамику изменения их концентрации во времени, необходимо учитывать указанные факторы как переменные величины. При этом физико-химические характеристики почвы могут рассматриваться как условно постоянные параметры, включаемые в расчетные зависимости. Следует отметить, что влияние скорости ветра и влажности почвы на процессы переноса частиц и развитие эрозии носит противоположный характер. Так, увеличение скорости воздушного потока приводит к интенсификации эрозионных явлений и усилению переноса частиц, тогда как рост влажности почвы, напротив, способствует их подавлению и снижению активности эрозии.

Согласно [7; с. 234], общую зависимость запишем в виде

$$F_0 = f(u, w). \tag{7}$$

где F_0 – объемный расход уносимых частиц атмосферным фронтом, м^3/с.

Для определения вида функции (7) переходим к анализу действующих сил, обусловливающих разрушение почвы и сопротивляющихся этому разрушению. Разрушающие силы обозначим через F. Им всегда противостоят силы сопротивления R, в состав которых входят влажность и другие физико-механические свойства почвы.

При превышении силы F над силой R начинается процесс эрозии почвы и уноса вредных частиц с поверхности земли. Сила разрушения F в основном определяется величиной касательного напряжения набегающего потока воздуха. При этом, чем больше твердых частиц в потоке, тем больше суммарное касательное напряжение, разрушающее почву. Для получения теоретической зависимости будем рассматривать равновесный процесс. При динамическом равновесии разность сил F и R должна равняться нулю, т.е.

$$F - R = 0 \tag{8}$$

Составим выражение для этих сил. Связь между объемным расходом F_0 уносимых частиц и скоростью потока выражаем в виде

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.15

$$F = \frac{\partial F_0}{\partial u} \cdot \chi, \tag{9}$$

где χ - касательное напряжение, кг/м^2.

Для силы сопротивления R, по аналогии с F, возьмем выражение

$$R = c_0 \frac{\mu_c}{l} \frac{\partial F_0}{\partial \zeta}, \tag{10}$$

где μ_c – вязкость смеси (воздух + почва), кГ*с/м^2; l – расстояние между отдельными частицами, м; c_0 - константа почвы.

Подставляя (9) и (10) в (8), имеем

$$\frac{\partial F_0}{\partial u} \chi - c_0 \frac{\mu_c}{l} \frac{\partial F_0}{\partial \zeta} = 0 \tag{11}$$

или

$$\frac{\partial F_0}{\partial u} - c_0 \frac{\mu_c}{l\chi} \frac{\partial F_0}{\partial \zeta} = 0. \tag{12}$$

Рассмотрим отдельно взятое выражение $c_0\mu / (l\chi)$ в уравнении (12).

Если приближенно считать, что касательное напряжение определяется значением внешней скорости u_∞, т.е. $\chi = u_\infty$, то это выражение в уравнении (12) можно представить в виде

$$c_0\mu_c / (l\chi) = c_0\mu_c / (lu_\infty). \tag{13}$$

В формуле (13) динамическая вязкость смеси μ_c определяется, в основном, влажностью почвы, увеличивающей силу сцепления между отдельными частицами. На основании выражения (13) можем константу почвы полагать зависящей от некоторой функции влажности:

$$c_0\mu_c / (lu_\infty) \cong c_0' f(\zeta). \tag{14}$$

В дальнейшем функцию $f(\zeta)$ заменяем простой зависимостью

$$f(\zeta) \cong c_0 c_0' \zeta. \tag{15}$$

Окончательно зависимость (14) принимает вид

$$c_0\mu_0 / (lu_\infty) \cong c_0 f(\zeta) \cong c_0 c_0' \zeta = k_p w, \tag{16}$$

где k_p – константа почвы, с/м.

Возвращаясь к выражению (12), получаем

$$\frac{\partial F_0}{\partial u} - k_p \zeta \frac{\partial F_0}{\partial \zeta} = 0. \tag{17}$$

В результате проведённых исследований было получено уравнение, позволяющее определить объёмный вынос частиц с поверхности почвы как функцию её влажности и скорости набегающего воздушного потока. После вычисления значения объёмного расхода частиц становится возможным, опираясь на граничное условие (5), перейти к решению задачи переноса и диффузии загрязняющих веществ в атмосферной среде. Следует

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.15

отметить, что система уравнений (1)–(6) представлена в виде многомерных дифференциальных уравнений в частных производных, дополненных соответствующими начальными и граничными условиями. В силу высокой сложности такой системы получение аналитического решения является затруднительным и, в большинстве случаев, практически нереализуемым. В этой связи для численного решения поставленной задачи был применён метод конечно-разностной аппроксимации. В частности, использована неявная конечно-разностная схема, обеспечивающая второй порядок точности по временной переменной, что позволяет повысить устойчивость вычислительного процесса и достичь более высокой точности результатов моделирования [2].

Заключение. В данном исследовании описывается распространение вредных частиц с использованием методов математического моделирования. Системный подход применяется к анализу факторов окружающей среды в регионе Аральского моря, в частности скорости ветра, влажности почвы и распределения солевых частиц, а также их влияния на сельскохозяйственное производство. Рассматривается оптимизация производства в условиях изменчивости и неопределенности условий окружающей среды. Кроме того, скорость ветра и влажность почвы рассматриваются как ключевые определяющие факторы, имеющие прямую взаимосвязь. Эффективность производства определяется с помощью уравнений, связанных с объемом миграции частиц. Предлагается модель сети Петри для формализации процессов принятия решений, учитывающих структурные, динамические и оптимальные характеристики сельскохозяйственного производства на основе принципов алгоритмического системного анализа. Полученная модель описывает этапы экологического мониторинга, обработки данных, прогнозирования и оптимального планирования и рекомендуется в качестве эффективного инструмента для оценки экологических рисков, рационального использования ресурсов и устойчивого развития сельскохозяйственного производства.

Список использованной литературы

1. Новикова Н. М. Эколого-географический аспект Аральского кризиса. Часть 2. Исследование динамики климата и изменений обсохшего дна моря //Экосистемы: экология и динамика. – 2020. – Т. 4. – №. 2. – С. 96-170.

2. Равшанов Н., Нарзуллаева Н. Моделирование процесса переноса и диффузии мелкодисперсных частиц в атмосфере с учетом эрозии почвы //Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2017. – №. 4. – С. 19-35.

3. Равшанов Н., Каршиев Д. А., Юлдашев Б. Э. Моделирование процесса переноса и диффузии мелкодисперсных частиц в атмосфере с учетом эрозии почвы //Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2018. – №. 4. – С. 140-152.

4. Таштемирова Н. Моделирование процесса распространения мелкодисперсных аэрозольных частиц в атмосфере с учетом эрозии почвы //Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2019. – №. 3. – С. 102-120.

5. Peterson J. L. Petri nets //ACM Computing Surveys (CSUR). – 1977. – Т. 9. – №. 3. – С. 223-252.

6. Zuberek W. M. Timed Petri nets definitions, properties, and applications //Microelectronics Reliability. – 1991. – Т. 31. – №. 4. – С. 627-644.

7. Kabulov A. et al. Algebraic recognition approach in IoT ecosystem //Mathematics. – 2024. – Т. 12. – №. 7. – С. 1086.