

УДК 330.341.2

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫБОРА ЭКОЛОГО-АДАПТИВНЫХ МЕЛИОРАТИВНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

**Сафронова Т.И., Приходько И.А.**

*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина», Краснодар,  
e-mail: saf55555@yandex.ru*

Мелиоративная система определяет режим функционирования агроландшафта. С помощью мелиоративных приемов осуществляется регулирование водного и связанных с ним воздушного, теплового и питательного режимов почв. Основными видами мелиорации являются: орошение, обводнение, осушение, борьба с эрозией почв, фитомелиорация, химическая мелиорация. Эти приемы обеспечивают повышение плодородия почв. С изменением экологических условий и развитием технического прогресса приемы улучшения условий жизни сельскохозяйственных культур постоянно совершенствуются, разрабатываются новые технические средства регулирования режимов почв. В таких условиях для исследователя очень важно уметь выявить перспективные направления мелиоративных исследований. Разработка анализа инвестиционной деятельности в природоохранной сфере является сложной задачей. Необходимо количественно оценивать мероприятия, их состав, объем, очередность, сроки ввода. Особенность оценки эффективности природоохранных проектов состоит в необходимости учета вероятностного характера происходящих процессов. Степень возможности определенных сценариев характеризуется их вероятностью или вероятностными распределениями. В статье предлагается модель учета стохастического характера мелиоративных процессов. Предложенный в работе процесс планирования может быть основой программы, соответствующей оптимальной производственной деятельности при условии поддержания состояния внешней среды на заданном уровне, и использован при определении очередности осуществления мероприятий для сравнительного анализа различных вариантов природоохранных мероприятий.

**Ключевые слова:** мелиоративная система, теоретическое обоснование цены намечаемого мероприятия, количественная оценка, вероятностный подход

## MATHEMATICAL MODEL OF ECOLOGICAL-ADAPTIVE MELIORATIVE MEASURES SELECTION

**Safronova T.I., Prikhodko I.A.**

*Federal State-funded Educational Institution of Higher Professional Education  
«Kuban State Agrarian University», Krasnodar, e-mail: saf55555@yandex.ru*

Reclamation system determines the mode of functioning of the agricultural landscape. With reclamation techniques is the regulation of water and associated air, thermal and nutritious regimes of soils. The main types of reclamation are irrigation, watering, drainage, soil erosion control, phytomelioration, chemical reclamation. These techniques provide increased soil fertility. With the change of environmental conditions and the development of technological progress, methods of improving the living conditions of crops are constantly being improved, new technical means of regulating soil regimes are being developed. In such conditions, it is very important for the researcher to be able to identify promising areas of land reclamation research. Development of the analysis of investment activity in the environmental sphere is a difficult task. It is necessary to quantify the activities, their composition, volume, sequence, timing of entry. The peculiarity of assessing the effectiveness of environmental projects is the need to take into account the probabilistic nature of the processes. The degree of possibility of certain scenarios is characterized by their probability or probability distributions. The article proposes a model of accounting for the stochastic nature of reclamation processes. The proposed planning process can be the basis of the program corresponding to the optimal production activities, provided the state of the environment at a given level, and is used in determining the order of implementation of activities for a comparative analysis of different options for environmental activities.

**Keywords:** reclamation system, theoretical justification of the price of the planned event, quantitative assessment, probabilistic approach

Мелиоративно-водохозяйственная система представляет собой совокупность агро- и гидромелиоративных, водных и хозяйственных объектов, расположенных в пределах данной водосборной площади и формирующих водный, почвенный и эколого-гидрохимический режим бассейна.

Сохранение и повышение биогенности почв, пополнение запасов органического вещества – общее условие повышения устойчивости и экологической безопасности агроландшафтов. Первостепенной задачей,

стоящей перед работниками агропромышленного комплекса, является унификация методологии по возделыванию сельскохозяйственных культур, которая должна включать в себя не только современные селекционные сорта культур, современную сельскохозяйственную технику и сбалансированные нормы внесения минеральных и органических удобрений, но и учитывать основные почвенно-экологические, климатические, ландшафтно-экологические критерии и показатели. Необходим анализ эко-

номической целесообразности выполнения агромелиоративных мероприятий, включающий «барьерную» оценку взаимовлияния показателей и/или критериев [1, 2]. Результатом исследований является разработка инновационных технологических карт, учитывающих весь спектр особенностей выращивания культуры в данном регионе с учетом природно-климатических и почвенных факторов. Данную методику можно назвать эколого-адаптивной технологией, базирующейся на математической модели повышения урожайности сельскохозяйственных культур с сохранением плодородия почв и экологической ситуации. Необходимо предусмотреть и внедрить комплекс природоохранных мероприятий, обеспечивающих охрану земельных и водных ресурсов и производство качественной сельскохозяйственной продукции [3].

Мощным «инструментом» сохранения и повышения плодородия почв является эколого-адаптивный подход к расчету поливных норм и способа подачи воды на поля. Строгий контроль качественных и количественных характеристик поливных вод способствует повышению плодородия почв путем накопления в почве содержания гумуса и необходимых растениям макро- и микроэлементов [4]. Накопление в почве питательных элементов позволяет снижать дозы внесения удобрений, тем самым экономить не только оросительную воду, но и затраты на внесение удобрений. Поэтому оптимизация режима орошения делает технологию выращивания сельскохозяйственных культур более рентабельной и экологически чистой.

При несоблюдении поливных норм и требований к способу полива сельхозпроизводитель сталкивается с такими негативными явлениями, как:

- поднятие грунтовых вод с возможным засолением и заболачиванием почвы,
- осолонцевание почвы, – увеличение содержания обменного кальция,
- потеря структуры почвенного покрова, – увеличение концентрации соды,
- подтопление и заиление пахотного слоя, – изменение рН, – изменение состава обменных катионов,
- вымыв питательных элементов с последующим снижением потенциальной плодородности почвы,
- снижение водности рек и водоемов с необходимостью проведения осушительных мелиораций по отводу избыточных (зачастую минерализованных) дренажных вод из пахотного горизонта [5].

В зависимости от степени проявления этих процессов может снижаться урожай-

ность сельскохозяйственных культур вплоть до полного вывода земель из севооборота. Для предотвращения таких негативных явлений необходимы научные основы, методы и средства природоохранных мероприятий, исследования по первоочередным фундаментальным и приоритетным направлениям в области охраны окружающей среды.

Решение проблемы выбора эколого-адаптивных технологий расчета оросительной нормы, сроков полива, способов орошения позволит повысить эколого-экономическую безопасность Краснодарского края и России в целом [6].

Неотъемлемой частью эколого-адаптивного, комплексного подхода исследований является анализ не только прямых факторов, влияющих на качество производимой продукции и плодородие почв, но и учет косвенных, сопутствующих, факторов, например технологии возделывания сельскохозяйственных культур в смежных хозяйствах и влияние на грунтовые воды и оросительную воду (если хозяйство расположено выше по течению), выбор безопасного севооборота, состояние лесополос, состояние подводящей оросительной системы, особенности рельефа местности. Наличие взаимосвязей, взаимообусловленности подтверждается круговоротом веществ и энергии, и первоочередная задача – не просто выявить изменения и последствия, а тщательно изучить взаимодействия, косвенные и синергетические эффекты, побочные влияния использования технологии.

Ключом к решению данной проблемы является создание количественных методов и инновационных управленческих решений, реализуемых в математической модели с возможностью эколого-адаптивного обоснования принятых решений. Такого результата не достичь без последовательной, многоуровневой работы по созданию единого математического аппарата, позволяющего оценивать мелиоративные мероприятия и на основе проведенного анализа принимать оптимальное управленческое решение по выполнению тех или иных методов и технологий на мелиорируемых землях. Разрабатываемый эколого-адаптивный комплекс агромелиораций также должен включать природоохранные мероприятия для охраны водных и земельных ресурсов и создания благоприятных условий выращивания сельскохозяйственной продукции с сохранением плодородия почв [7].

Приоритетным направлением выполняемых мелиораций является разработка рекомендаций сельхозпроизводителям, которые должны базироваться на следующих положениях:

- системы обработки почвы, с разработкой эколого-адаптивных технологических карт;
- оптимизация методов и способов внесения органических и минеральных удобрений;
- унифицирование агромелиораций по регулированию pH почвы,
- совершенствование способов и методов снижения и предупреждения процесса переувлажнения земель, а также мелиораций, направленных на устранения последствий переувлажнения почв,
- использование современных технологий орошаемого земледелия,
- использование технологий точного земледелия при выполнении агромелиораций.

Решение проблемы выбора эколого-адаптивных технологий расчета оросительной нормы, сроков полива, способов орошения позволит повысить эколого-экономическую безопасность Краснодарского края и России в целом [7].

Неотъемлемой частью эколого-адаптивного, комплексного подхода исследований является анализ не только прямых факторов, влияющих на качество производимой продукции и плодородие почв, но и учет косвенных, сопутствующих, факторов, например технологии возделывания сельскохозяйственных культур в смежных хозяйствах и влияние на грунтовые воды и оросительную воду (если хозяйство расположено выше по течению), выбор безопасного севооборота, состояние лесополос, состояние подводящей оросительной системы, особенности рельефа местности. Наличие взаимосвязей взаимообусловленности подтверждается круговоротом веществ и энергии и первоочередная задача – не просто выявить изменения и последствия, а тщательно изучить взаимодействия, косвенные и синергетические эффекты, побочные влияния использования технологии.

Ключом к решению данной проблемы является создание количественных методов и инновационных управленческих решений, реализуемых в математической модели с возможностью эколого-адаптивного обоснования принятых решений. Такого результата не достичь без последовательной, многоуровневой работы по созданию единого математического аппарата, позволяющего оценивать мелиоративные мероприятия и на основе проведенного анализа принимать оптимальное управленческое решение по выполнению тех или иных методов и технологий на мелиорируемых землях. Разрабатываемый эколого-адаптивный комплекс агромелиораций также должен включать природоохранные мероприятия для охраны водных и земельных ресурсов и создания благоприятных условий выра-

щивания сельскохозяйственной продукции с сохранением плодородия почв [8].

В работе [8] предлагается вероятностная модель процесса снижения стоимости намечаемого мероприятия. Трактовка параметров мероприятий случайными величинами позволяет рассмотреть неопределенность в терминах теории вероятностей.

Цена состояния объекта обозначена  $S_e$ . В рамках рассматриваемой модели эта цена – непрерывная случайная величина. Вычислены основные характеристики цены состояния объекта – математическое ожидание, дисперсия, плотность распределения вероятностей рассматриваемой случайной величины.

Если состояние объекта удовлетворяет экологическим требованиям, то математическое ожидание цены равно  $m_{1S}(S)$

$$m_{1S}(S) = S - \int_{S_m}^S \exp\left(-\int_y^S g(x)dx\right) dy, \quad (1)$$

где  $S$  – цена намечаемых мероприятий,

$$g(S) = \lambda R(S)/a(S), \quad a(S) = -\frac{dS}{dt}\Big|_{t=t(S)}, \quad (2)$$

$\lambda$  – интенсивность потока Пуассона, интенсивность последовательности мелиоративных мероприятий;  $R(S)$  – вероятность доведения системы до определенного состояния.

Дисперсия цены состояния объекта равна

$$D\{S | S(t) = S\} = m_{2S}(S) - m_{1S}^2(S), \quad (3)$$

где

$$m_{2S}(S) = S^2 - 2 \int_{S_m}^S y \cdot \exp\left(-\int_y^S g(x)dx\right) dy. \quad (4)$$

В работе найдена также плотность вероятностей цены состояния объекта  $S_e$ . При этом  $S_e$  изменяется в пределах  $S_m \leq S_e \leq S$ .

$$p_S(S_e) = \delta(S_e - S_m) \exp\left(-\int_{S_m}^S g(x)dx\right) + g(S_e) \exp\left(-\int_{S_e}^S g(x)dx\right), \quad (5)$$

где  $S_m$  – минимальная цена, при которой ущерб окружающей среде непременно наступит,  $R(S_m) = 1$ .

Исследования показали [4, 5], что методики «комплексного подхода» в производстве сельскохозяйственной продукции должны базироваться на следующих фундаментальных положениях.

– Использование эколого-адаптивных технологических карт по выполнению комплекса агромелиоративных мероприятий с элементами точного земледелия, стремящихся к «нулевой обработке» почвы.

– Применение орошаемого земледелия с использованием технологий минимизации оросительной нормы.

– Соблюдение севооборотов.

– Использование устойчивых и оптимально подобранных гибридов растений для каждого отдельно взятого хозяйства с учетом природно-климатических и эколого-агро-мелиоративных факторов.

– Использование последних достижений в области выбора и способа внесения минеральных и органических удобрений, позволяющих минимизировать отрицательное воздействие внесения удобрений на мелиоративное состояние почв [8].

– Спутниковый мониторинг развития растений для оперативного принятия решений по внесению удобрений или/и способов защиты растений в севооборотах, определения интенсивности развития и созревания растений, а также моделирование урожайности по данным вегетативной биомассы растений.

– Ведение непрерывного ирригационно-мелиоративного почвенного мониторинга (наземного и спутникового).

При этом важен вопрос приоритетов в выборе мероприятий и их финансировании.

Далее рассмотрим математическую модель ступенчатого изменения цены мелиоративных мероприятий.

В момент начала работ намечены мелиоративные мероприятия на длительность функционирования  $T_1$ , цена которых  $S_1$ .

$S_i$  – затраты, связанные с регулированием или полным устранением отрицательных последствий мелиоративных мероприятий. Если за время  $T_1$  отрицательные последствия мелиоративных мероприятий не устранены, намечаются новые мероприятия, цена которых  $S_2$  и длительность функционирования  $T_2$  и так далее.

Каждый отрезок времени будем называть фазой. Длительность фазы поставим в зависимость от числа намечаемых мероприятий.

Будем рассматривать последовательность мелиоративных мероприятий пуассоновским потоком интенсивности  $\lambda$ . На  $n$ -й фазе удовлетворительное мелиоративное состояние будет достигнуто с вероятностью  $R_n = R(S_n)$ . Следует отметить,  $R(S)$  – монотонно убывающая функция, зависящая от цены намечаемого мелиоративного мероприятия.

Рассмотрим характеристику этой модели – распределение номера отрезка времени (фазы), при котором удовлетворительное состояние мелиоративной системы достигнуто.

Пусть  $R_i$  – безусловная вероятность того, что на  $i$ -м отрезке времени ( $i$ -й фазе) удовлетворительное состояние не будет достигнуто. Так как мероприятия независимы, то

$$P_i = (1 - R_i)^{m_i} \tag{6}$$

Обозначим  $Q_n$  – вероятность того, что удовлетворительное состояние будет достигнуто на  $n$ -м отрезке времени ( $n$ -й фазе). Это означает, что приемлемое состояние системы не будет достигнуто на фазах с номерами  $1, 2, 3, \dots, n - 1$ . Следовательно,

$$Q_n = P_1 P_2 P_3 \dots P_{n-1} (1 - P_n) = \prod_{i=1}^{n-1} (1 - R_i)^{m_i} \cdot (1 - (1 - R_n)^{m_n}) \tag{7}$$

Отметим, что  $\prod_{i=1}^0 (1 - R_i)^{m_i} = 1$  [9].

Проверим выполнение условия нормировки. Вычислим  $\sum_{n=1}^{\infty} Q_n$

$$\sum_{n=1}^N Q_n = \left(1 - \prod_{i=1}^1 P_i\right) + \left(\prod_{i=1}^1 P_i - \prod_{i=1}^2 P_i\right) + \left(\prod_{i=1}^2 P_i - \prod_{i=1}^3 P_i\right) + \dots + \left(\prod_{i=1}^{N-1} P_i - \prod_{i=1}^N P_i\right) = 1 - \prod_{i=1}^N P_i \tag{8}$$

потому

$$\sum_{n=1}^{\infty} Q_n = 1 - \prod_{i=1}^{\infty} P_i \tag{9}$$

В следующих расчетах будем считать, что

$$\prod_{i=1}^{\infty} P_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \prod_{i=1}^N P_i = 0 \tag{10}$$

Тогда с вероятностью, равной единице, т.е. достоверно удовлетворительное состояние будет достигнуто.

Запишем отмеченное условие в другой форме. Условие  $\prod_{i=1}^{\infty} P_i = 0$  эквивалентно условию  $\sum_{i=1}^{\infty} \ln P_i = -\infty$ , которое можно записать в виде

$$\sum_{i=1}^{\infty} m_i \ln(1 - R_i) = -\infty. \quad (11)$$

Можно отметить, что при  $i \rightarrow \infty$   $R_i \rightarrow 1$ . Так как  $\lim_{R \rightarrow 1} (1 - R) = -\infty$ , то условие  $\lim_{i \rightarrow \infty} R_i = 1$  является достаточным условием расходимости ряда (11) и достижения удовлетворительного мелиоративного состояния с вероятностью 1. В дальнейшем наметим рассмотреть случайное число мелиоративных мероприятий на отрезках времени, среднее время наступления удовлетворительного мелиоративного состояния и оптимизационную задачу.

### Заключение

В статье предлагается вероятностная модель процесса снижения цены намечаемого мелиоративного мероприятия. Необходимо планировать ремонт и обновление оросительной системы, регулярное управление эксплуатационными режимами при минимальных затратах на производство сельскохозяйственной продукции и охрану окружающей среды.

В работе приведены основные характеристики цены состояния объекта, функционирующего в условиях неопределенности, – плотность распределения вероятностей рассматриваемой случайной величины (цены намечаемого мероприятия), ее математическое ожидание и дисперсия, подготовлено выражение вероятности удовлетворительного состояния мелиоративной системы на  $n$ -м отрезке времени (в случае ступенчатого изменения цены мероприятий). Результаты могут быть использованы

для сравнительного анализа различных вариантов природоохранных мероприятий, для определения очередности осуществления мероприятий, своевременной разработки мероприятий по недопустимому ухудшению почвенно-мелиоративного состояния орошаемых земель.

### Список литературы

1. Сафронова Т.И., Соколова И.В. О дисциплине «Математическое моделирование и проектирование» на агрономическом факультете // Математика в образовании: сборник статей. Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова; Межрегиональная общественная организация «Женщины в науке и образовании». Чебоксары, 2016. С. 88–92.
2. Лисуненко К.Э., Соколова И.В. Оценка состояния почв сельскохозяйственных районов Краснодарского края // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сборник статей по материалам 72-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2016 год. (01 февраля – 01 марта 2017 г.). Краснодар: Издательство Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2017. С. 231–234.
3. Сафронова Т.И., Хаджиди А.Е., Холод Е.В. Обоснование метода управления агроресурсным потенциалом агроландшафтов // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. [Электронный ресурс]. URL: <https://science-education.ru/tu/article/view?id=22376> (дата обращения: 12.08.2019).
4. Подколзин О.А., Соколова И.В., Осипов А.В., Слюсарев В.Н. Мониторинг плодородия почв земель Краснодарского края // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 68. С. 117–124.
5. Кондратенко Л.Н., Касьянова Е.В. Рациональное использование земли на основе экономико-статистического анализа показателей в ООО «АПФ «Рубин» // Научные исследования – сельскохозяйственному производству: материалы Международной научно-практической конференции (25 апреля 2018 г.). Орел: Издательство ООО ПФ Картуш, 2018. С. 431–437.
6. Гольдман Р.Б., Коренец Н.С. Моделирование освоения и использования земельных ресурсов западной зоны Краснодарского края // Новая наука: От идеи к результату. 2016. № 12. С. 228–231.
7. Корч Е.А., Микенина П.С., Соколова И.В. Математическая модель прогнозирования финансового состояния предприятия // Студенческие научные работы инженерно-землеустроительного факультета: сборник статей по материалам студенческой научно-практической конференции. 2017. С. 63–67.
8. Сафронова Т.И., Приходько И.А. Теоретическая модель оптимального проектирования агроландшафтов // Успехи современного естествознания. 2019. № 3–2. С. 204–209.
9. Буре В.М., Парилина Е.М. Теория вероятностей и математическая статистика. СПб.: Издательство «Лань», 2013. 416 с.