

МОДЕЛИ КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ РИСКОВ ДЛЯ ПОЧВЕННЫХ РЕСУРСОВ В УСЛОВИЯХ АРИДНОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

Широкий А.А.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, г. Москва ул. Профсоюзная д.65
shiroky@ipu.ru*

Новочадов В.В.

*Волгоградский государственный университет
Россия, г. Волгоград, пр-кт Университетский д.100
novochadov.valeriy@volsu.ru*

Аннотация: Настоящее исследование представляет собой попытку использовать для оценки рисков почвенных ресурсов метод комплексного оценивания, хорошо зарекомендовавший себя в области управления организационно-техническими системами. Авторы модифицировали метод для возможности оценивания рисков почвенным ресурсам внутри заданного горизонта планирования в условиях вероятностной неопределённости.

Ключевые слова: растениеводство, почвенные ресурсы, почвенное плодородие, управление рисками, метод комплексного оценивания

Введение

Агропромышленный сектор во всем мире является одним из ключевых источников производства и доходов, а для многих стран — практически определяет валовый национальный продукт и уровень жизни населения. Базовым ресурсом для осуществления сельскохозяйственной деятельности является почвенный ресурс, поскольку растениеводство напрямую, а животноводство — через кормовую базу в прямой степени зависят от плодородия почвы. К важнейшим задачам растениеводства, в связи с этим, можно отнести:

- обеспечение населения растительными продуктами питания и сырьём для пищевой промышленности;
- обеспечение кормовой базы животноводства;
- обеспечение различных отраслей промышленности, включая текстильную, химическую, фармацевтическую и др., сырьём для производства конечных полезных продуктов;
- участие в формировании климатических, экологических, ландшафтных и рекреационно-туристических условий в регионах с интенсивным землепользованием.

Все эти четыре задачи могут быть реализованы при одном условии — участники землепользования обеспечивают своей деятельностью эффективную реализацию основного технологического процесса, т. е. выращивают в данный момент времени на данном участке заданную сельскохозяйственную культуру с максимальной эффективностью, а также воспроизводят почвенный ресурс.

Оценивать почвенный ресурс можно с различных сторон, для этого используются десятки параметров. К тому же эти величины взаимосвязаны и крайне динамичны, на итоговый результат оказывает влияние множество внешних воздействий. Исходя из этого, в век цифровизации вполне понятно стремление формализовать этот процесс и поручить его в большей степени компьютеру путём создания систем моделирования и прогнозирования, поддерживающих процесс принятия решений [1–3].

В отечественном растениеводстве исследователи обращают больше внимания на экономическую сторону вопроса. Так, в статье [4] предлагается применять модели и методы бинарных решающих матриц к задаче выбора технологии возделывания зерновых культур. В то же время существует достаточно солидный задел в применении технологий интеллектуального анализа данных при построении прогнозных моделей растениеводства [5, 6].

Целью настоящей работы является построение математической модели оценивания рисков почвенных ресурсов на основе метода комплексного оценивания с учётом специфики аридного землепользования.

1 Материалы и методы

Вначале опишем основные системообразующие факторы и приведём общее описание системы.

Почвенные ресурсы являются компонентами, которые активно включены в систему получения

конечного результата и, по определению, воспроизводимо уменьшаются при реализации основного технологического процесса. Часть этих ресурсов (меньшая) преобразуется и становится неотделимой частью конечного продукта, остальная часть (большая) – возвращается во внешнюю среду, не обязательно в почву, в неизменённом или изменённом виде.

Исходная (потенциальная) мощность почвенных ресурсов, доступных для использования в технологическом процессе, может быть представлена как совокупность (система) следующих факторов [7–9]:

- вода почвы;
- аэрация почвы;
- минеральная (абиотическая) составляющая, включая макро- и микроэлементы;
- органическая (биотическая) составляющая, как биополимеры и низкомолекулярные органические вещества;
- микробиота;
- многоклеточные беспозвоночные и позвоночные животные.

Их собственные вклады в итоговый ресурс по большей части положительные, но некоторые избытки (например, солей тяжёлых металлов, грибов или насекомых) могут обладать негативным эффектом в отношении интегральной мощности почвенных ресурсов.

При прочих равных условиях, интегральной оценкой потенциальной мощности почвенных ресурсов в отношении конкретной сельскохозяйственной культуры следует считать урожайность, т. е. отношение количества первичной конечной продукции (например, зерна) к единице площади. Более точно с экономической точки зрения учитывать и качество продукции, т. е. выражать потенциальную мощность ресурса как количество конечной сортированной продукции (например, калиброванного зерна определённого сорта) к единице площади. Если начать оценивать результаты исключительно экономическими (финансовыми) показателями, то анализ становится затруднительным ввиду активного влияния факторов, не имеющих отношения к собственно технологическому процессу.

Поскольку в современном сельском хозяйстве любая почва уже неоднократно использовалась до рассматриваемого сезона, мы имеем дело с частично потреблёнными и возобновлёнными почвенными ресурсами. Факторы, участвующие в этом процессе, частично продолжают своё действие и во время реализации технологического процесса. Собственно, эти факторы определяют потенциальную мощность почвенных ресурсов, и их целесообразно разделить на две группы: естественные (1) и производимые человеком (2).

Естественные факторы представляют собой процессы восстановления почвенных ресурсов путём воздействия солнечной радиации, атмосферного воздуха и влаги, подземных вод, химических и биотических процессов в почве. Это достаточно интенсивный и многокомпонентный процесс, но он, по определению, недостаточен в условиях интенсивного земледелия. Тем более он недостаточен в условиях аридного землепользования.

Факторы, привносимые человеком, состоят в активной ремедиации почвы, внесении удобрений, механической обработке почвы и мелиорации. Основная особенность этой группы мероприятий заключается в том, что они зависят не только от представлений, что и как следует сделать, но и от объективных и субъективных ограничений и ошибок в период выполнения реальных действий. По всей видимости, именно эта составляющая восполнения почвенных ресурсов в условиях аридного землепользования играет ключевую роль в достижении потенциальной мощности почвенных ресурсов и прогнозе рисков при реализации основного технологического процесса.

Большое значение имеет совпадение (тождественность) процессов восполнения почвенных ресурсов для начала текущего цикла землепользования тому виду и сорту растений, которые включаются в него. Такая ошибка может существенно ухудшить прогноз.

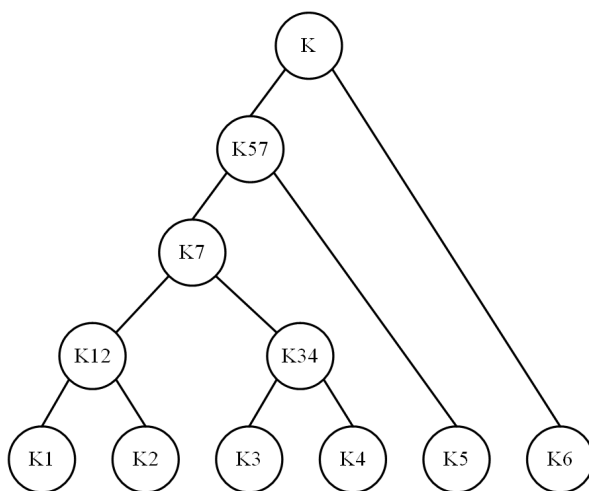
Во время реализации основного технологического процесса могут произойти естественные и антропо-зависимые события, изменяющие (обычно в худшую сторону) прогнозы эффективной реализации почвенных ресурсов. Как пример, можно привести размывы почвы, пожары, нашествия вредителей, разливы нефти и нефтепродуктов и другие. Все они должны отражаться в прогнозных моделях как вероятностные события, т. е. расширять границы диапазона прогнозных значений.

2 Результаты и обсуждение

Основным результатом работы является следующий алгоритм построения модели комплексного оценивания.

Вначале определим шкалу для оценки почвенного плодородия для некоторой заданной

сельскохозяйственной культуры. Обозначим соответствующую комплексную оценку К и будем говорить, что ожидаемая урожайность высокая, если К = 3, средняя — если К = 2, низкая — если К = 1. При К = 0 считаем, что на почве (практически) ничего не вырастет.



а

$$\begin{array}{r|l}
 \begin{array}{c} 2 \\ 1 \\ 0 \\ \hline 0 \end{array} & \begin{array}{c} 2 \ 3 \\ 1 \ 2 \\ 0 \ 1 \\ \hline 0 \ 1 \end{array} \\
 \text{К1} & \rightarrow \text{К12} \\
 & \text{К2}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{r|l}
 \begin{array}{c} 3 \\ 2 \\ 1 \\ 0 \\ \hline 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \ 2 \ 3 \ 3 \\ 0 \ 1 \ 2 \ 3 \\ 0 \ 1 \ 2 \ 2 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\ \hline 0 \ 1 \ 2 \ 3 \end{array} \\
 \text{К3} & \rightarrow \text{К34} \\
 & \text{К4}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{r|l}
 \begin{array}{c} 3 \\ 2 \\ 1 \\ 0 \\ \hline 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \ 2 \ 3 \ 3 \\ 0 \ 1 \ 2 \ 3 \\ 0 \ 1 \ 2 \ 2 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\ \hline 0 \ 1 \ 2 \ 3 \end{array} \\
 \text{К12} & \rightarrow \text{К7} \\
 & \text{К34}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{r|l}
 \begin{array}{c} 3 \\ 2 \\ 1 \\ 0 \\ \hline 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \ 2 \ 3 \ 3 \\ 0 \ 1 \ 2 \ 3 \\ 0 \ 1 \ 2 \ 2 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\ \hline 0 \ 1 \ 2 \ 3 \end{array} \\
 \text{К7} & \rightarrow \text{К57} \\
 & \text{К5}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{r|l}
 \begin{array}{c} 3 \\ 2 \\ 1 \\ 0 \\ \hline 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \ 2 \ 3 \ 3 \\ 0 \ 1 \ 2 \ 3 \\ 0 \ 1 \ 2 \ 2 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \\ \hline 0 \ 1 \ 2 \ 3 \end{array} \\
 \text{К57} & \rightarrow \text{К} \\
 & \text{К6}
 \end{array}$$

б

Рис. 1. Возможный вид дерева комплексного оценивания (а) и матриц свёртки пар критериев оценки (б)

Для получения оценки К мы будем использовать следующие базовые критерии и шкалы:

- **К1 “содержание воды в почве”**: при оптимальной влажности или отклонении от неё на не более чем от -50% до +100% К1 = 2; при отклонении более, чем вдвое, но не более, чем втрое К1 = 1; при более значительных отклонениях К1 = 0.
- **К2 “аэрация почвы”**: при оптимальной структуре или отклонении от неё на не более чем от -10% до +60% К2 = 1; при более значительных отклонениях К2 = 0.
- **К3 “минеральная (абиотическая) составляющая”**, включая макро- и микроэлементы: при не более, чем двукратном дефиците любого биогенного элемента и избытке солей тяжёлых металлов не более трёх ПДК К3 = 3; при дефиците одного или двух биогенных элементов более, чем вдвое или избытке солей тяжёлых металлов от трёх до пяти ПДК К3 = 2; при более чем двукратном дефиците трёх или более биогенных элементов или избытке солей тяжёлых металлов от пяти до десяти ПДК К3 = 1; при избытке солей тяжёлых металлов свыше десяти ПДК К3 = 0.
- **К4 “органическая (биотическая) составляющая”**, как биополимеры и низкомолекулярные органические вещества: при дефиците компонентов гумуса не более 40% К4 = 3; при дефиците 40–60% К4 = 2; при дефиците 60–80% К4 = 1; при утрате органических веществ (например,

вследствие пожара) $K_4 = 0$.

- **K5 “почвенная микробиота”**: при дефиците МО не более 75% и избытке гниlostных МО не более чем в 1,5 раза $K_5 = 3$; при избытке гниlostных МО в 1,5–2 раза $K_5 = 2$; при избытке гниlostных МО в 2–3 раза $K_5 = 1$; в случае отсутствия МО или гниlostного разложения гумуса $K_5 = 0$.
- **K6 “многоклеточные беспозвоночные и позвоночные животные”**: при допустимой численности животных-вредителей $K_6 = 3$; при избытке животных-вредителей в 1,5–2 раза $K_6 = 2$; при избытке в 2–3 раза $K_6 = 1$; при сплошной колонизации почвы животными-вредителями $K_6 = 0$.

Теперь построим дихотомическое дерево свёрток критериев (см., например, [10]). Корень дерева соответствует комплексной оценке K , всякие вершины дерева будут соответствовать базовым критериям, а в остальных вершинах будет осуществляться свёртка пар критериев на основе матриц, заданных в каждой вершине.

На рисунке 1 предложен вариант дерева комплексного оценивания. Отметим, что в зависимости от выращиваемой культуры могут меняться как матрицы свёртки, так и структура дерева.

Для проведения оценки рисков предложенную модель комплексного оценивания следует модифицировать таким образом, чтобы учесть влияние событий неопределённости на выбранном горизонте планирования. Предложим вариант такой модификации для случая вероятностной неопределённости.

Пусть для каждого из базовых критериев K_1 – K_6 задано распределение вероятностей по шкале их оценивания. Например, K_1 может принять значение 0 с вероятностью p_{10} , 1 — с вероятностью p_{11} , 2 — с вероятностью p_{12} , причём $p_{10} + p_{11} + p_{12} = 1$. Аналогично распределения определяются для базовых критериев K_2 – K_6 . Конкретная процедура получения таких распределений в данной работе не рассматривается. Отметим лишь, что для этого могут быть использованы методы интеллектуального анализа данных. В случае недостаточности данных можно также воспользоваться методом экспертных оценок.

На рисунке 2 приведён пример матрицы свёртки для критериев K_1 и K_2 с учётом вероятности получения той или иной оценки в течение наблюдаемого временного промежутка. В скобках указаны вероятности попадания в ту или иную клетку матрицы, получаемые как произведение вероятностей получения соответствующих оценок базовых критериев. Суммы значений вероятностей в клетках с одинаковой оценкой даст распределение для комбинированного критерия K_{12} . В приведённом примере он примет значение 3 с вероятностью 0,51, 2 — с вероятностью 0,345, 1 — с вероятностью 0,13 и, наконец, 0 — с вероятностью 0,015.

	2 (0,6)	2 (0,09) 3 (0,51)	
K1	1 (0,3)	1 (0,045) 2 (0,255)	→ K12
	0 (0,1)	0 (0,015) 1 (0,085)	
		0 (0,15) 1 (0,85)	
		K2	

Рис. 2. Матрица свёртки критериев K_1 и K_2 с учётом распределения вероятностей оценок

Действуя таким образом, мы получим распределение вероятностей по шкале комплексной оценки K . Объявив оценку $K = 3$ целевым сценарием, мы получим риск как меру отклонения от него в виде вероятности того, что оценка K будет отклоняться от целевой.

Заключение

В настоящей работе предложено использовать для оценки рисков почвенных ресурсов метод комплексного оценивания, хорошо зарекомендовавший себя в области управления организационно-техническими системами. Его преимуществом является простая в построении структура, позволяющая учесть всё многообразие взаимосвязей включаемых в оценку параметров, включая относящиеся к выращиваемой культуре. Как итог, авторы предложили модель, позволяющую оценивать риски почвенных ресурсов внутри заданного горизонта планирования в условиях вероятностной неопределённости. Приведён пример построения системы оценивания рисков почвенным ресурсам в зоне аридного землепользования.

Литература

1. *Tamayo R.A.C., Ibarra M.L., Macías J.A.G.* Better Crop Management with Decision Support Systems Based on Wireless Sensor Networks // 7th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE 2010). 2010. – P. 412-417.
2. *Drouzas I., Challinor A.J., Swiderski M., Semenov M.A.* New modelling technique for improving crop model performance – application to the GLAM model // *Environmental Modelling & Software*. Vol. 118. 2019. – P. 187-200.
3. *Doelman J.C., Stehfest E., Tabeau A., van Meijl H., Lassaletta L., Gernaat D.E., Hermans K., Harmsen M., Daioglou V., Biemans H., van der Sluis S.* Exploring SSP land-use dynamics using the IMAGE model: Regional and gridded scenarios of land-use change and land-based climate change mitigation // *Global Environmental Change*. Vol. 48. 2018. – P. 119-135.
4. *Лойко В.И., Ткаченко В.В.* Адаптация модели бинарных решающих матриц к задаче выбора технологий возделывания сельскохозяйственных культур // *Научный журнал КубГАУ*. Том. 114. 2015, № 10. – С. 1592-1603.
5. *Вякушев В.П., Вякушев В.В., Баденко В.Л., Матвеев Д.А., Чесноков Ю.В.* Оперативное и долгосрочное прогнозирование продуктивности посевов на основе массовых расчетов имитационной модели агроэкосистемы в геоинформационной среде (обзор) // *Сельскохозяйственная биология*. Том 55. 2020, № 3. – С. 451-467.
6. *Винничек Л.Б., Волкова Г.А., Суханова О.Н.* Экономико-математическое моделирование как инструмент прогнозирования в растениеводстве // *Московский экономический журнал*. 2021, № 11. – С. 270-278.
7. *Залибеков З.Г., Мамаев С.А., Биарсланов А.Б., Асгерова Д.Б., Магомедов Р.А.* Потенциал биопродукционных ресурсов почвенного покрова: использование и источники возобновления // *Аридные экосистемы*. том 27. 2021, № 1 (86). – С. 15-23.
8. *Семенов А.М., Соколов М.С.* Концепция здоровья почвы: фундаментально-прикладные аспекты обоснования критериев оценки // *Агрохимия*. 2016, № 1. – С. 3-16.
9. *Огородников С.С., Яковлев А.С., Евдокимова М.В.* Определение эталонных значений показателей почвенного плодородия на основе зависимости «доза-эффект» // *Плодородие*. 2021, № 6. – С. 6-9.
10. *Бурков В.Н., Буркова И.В., Коргин Н.А., Щепкин А.В.* Модели согласованного комплексного оценивания в задачах принятия решений // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. Том 20. 2020, № 2. – С. 5-13.