

## ДВУХЭТАПНАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ПОСЕВОВ С УЧЕТОМ РИСКОВ

**Иваньо Ярослав Михайлович**

Д.т.н., профессор, проректор по научной работе

**Петрова Софья Андреевна**

К.т.н., доцент кафедры информатики и математического моделирования

**Полковская Марина Николаевна**

К.т.н., доцент кафедры информатики и математического моделирования  
Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского,  
664038, Иркутский р-он, п. Молодежный, 1/1, e-mail: rector@igsha.ru

**Аннотация.** Сельскохозяйственное производство подвержено воздействию значительного количества внешних факторов, влияющих на результаты деятельности аграрных предприятий, из которых наиболее значимо воздействуют разные гидрометеорологические явления. Эффективное планирование получения аграрной продукции связано с учетом, прежде всего, природных рисков. В работе рассматривается двухэтапная модель оптимизации размещения посевов сельскохозяйственных культур, которая учитывает влияние негативных природных явлений на производство аграрной продукции.

Использование многоэтапной экстремальной задачи обусловлено тем, что планирование на последующем шаге (как правило, год) зависит от предшествующего результата. При этом в модели использованы параметры, характеризующие влияние одного или нескольких экстремальных климатических явлений на получение сельскохозяйственной продукции. Предложенная двухэтапная модель с вероятностными параметрами реализована для сельскохозяйственного предприятия Иркутской области с учетом влияния сильной засухи.

**Ключевые слова:** оптимизация структуры посевов, севооборот, задача линейного программирования, двухэтапная модель, риски.

**Цитирование:** Иваньо Я.М., Петрова С.А., Полковская М.Н. Двухэтапная модель оптимизации структуры посевов с учетом рисков // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. № 4 (12). С. 88–95. DOI: 10.25729/2413-0133-2018-4-09

**Введение.** При моделировании производства сельскохозяйственной продукции используют задачи математического программирования в условиях неопределенности. Как правило, к ним относятся задачи линейного программирования с интервальными и вероятностными параметрами или задачи параметрического программирования. Последние модели характеризуют динамику некоторых параметров при условии наличия в них трендов. При планировании аграрного производства, чаще всего используют одноэтапные модели, реже – многоэтапные [1, 2, 8, 11].

В работе [4] предложены многоэтапные модели оптимизации структуры посевов. Согласно алгоритму на первом этапе рассчитываются значения критерия оптимальности в

зависимости от заданных предшественников. На втором этапе из полученных вариантов для каждого предшественника выделяются некоторые группы оптимальных решений, используемые при управлении производственными процессами. Использование подобной модели связано с различными комбинациями предшественников, влияющими, в конечном итоге, на результаты деятельности сельскохозяйственных предприятий. Следует отметить, что предложенная двухэтапная модель не учитывает влияние экстремальных гидрометеорологических явлений, которые практически ежегодно наносят ущербы сельскохозяйственным товаропроизводителям Иркутской области.

В работах [4, 5, 6] приведены алгоритмы и математические модели, позволяющие определять производство сельскохозяйственной продукции в условиях проявления природных событий. Предложенная методика может быть использована при создании многоэтапной модели размещения посевов с учетом севооборотов. Таким образом, целью работы является построение многоэтапной модели оптимизации структуры посевов с учетом предшественников в условиях природных рисков. Для достижения цели определены следующие задачи: 1) построение математической модели оптимизации структуры посевов с учетом рисков; 2) решение многоэтапной задачи математического программирования с учетом проявления неблагоприятного природного события в условиях неопределенности на примере реального сельскохозяйственного предприятия; 3) оценка рисков от проявления природного явления.

**Материалы и методы.** В работе использованы многолетние данные о производственных показателях предприятия, экстремальных природных явлениях и ущербах, наносимых ими. При этом рассмотрены ситуации влияния на производство сельскохозяйственной продукции одного гидрометеорологического события или их сочетания. Для решения поставленных задач применялись методы математического программирования в условиях неопределенности, теории вероятностей и математической статистики. При решении экстремальных задач в условиях неопределенности использован алгоритм нахождения оптимальных планов с использованием метода Монте-Карло. Оценка рисков в результате влияния гидрометеорологических событий основана на критерии признания утраты (гибели) урожая сельскохозяйственной культуры в размере равном или более 30% потери урожая [9].

**Результаты работы и обсуждение.** На основании работ [4, 5, 6 и др.], в которых предлагаются различные математические модели и методика оценки рисков, сформулирована многоэтапная модель оптимизации структуры посевов с учетом предшественников в условиях влияния на деятельность сельскохозяйственного товаропроизводителя гидрометеорологических событий с вероятностными параметрами. В такой задаче критерий оптимальности можно записать так:

$$\sum_{i \in I} \sum_{s \in S} d_{is} y_{is}^p x_{is} - \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} c_{is} x_{is} - \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} \mu_{jis} x_{jis} \rightarrow \max, \quad (1)$$

а в качестве условий выделить следующие:

- ограниченность производственных ресурсов

$$\sum_{s \in S} v_{lis}^p x_{is} + \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \alpha_{jis}^p \leq V_{li} \quad (l \in L, i \in I, j \in J); \quad (2)$$

- ограниченность размера растениеводческой отрасли

$$\underline{n} \leq \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} (1 + \eta_s) x_{is} \leq \bar{n}; \quad (3)$$

– производство конечной продукции не менее заданного объема

$$\sum_{i \in I} y_{is}^p x_{is} - \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \beta_{jis}^p x_{is} \geq Y_s \quad (s \in S); \quad (4)$$

– ограниченность вносимых удобрений и средств защиты растений

$$\sum_{s \in S} w_{mis} x_{is} + \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \varphi_{jmis}^p x_{is} \leq W_{mi} \quad (m \in M, i \in I); \quad (5)$$

– неотрицательность переменных

$$x_{is} \geq 0. \quad (6)$$

В модели  $d_{is}$  – цена реализации продукции  $s$ -культуры с  $i$ -го поля (руб./ц);  $y_{is}^p$  – выход продукции с единицы площади  $s$ -культуры  $i$ -го поля (ц/га), соответствующий некоторой вероятности  $p$ ;  $x_{is}$  – площадь возделывания  $s$ -культуры на  $i$ -м поле (га);  $c_{is}$  – затраты на 1 га  $i$ -го поля  $s$ -культуры (руб./га);  $\mu_{jis}$  – потери от влияния экстремального гидрометеорологического явления  $j$  на культуру  $s$  на  $i$ -м поле;  $x_{jis}$  – площадь  $s$ -культуры на  $i$ -м поле, подвергшаяся влиянию гидрометеорологического явления  $j$  (га);  $v_{is}^p$  – расход  $l$ -ресурса на единицу площади  $s$ -культуры  $i$ -го поля (тыс. чел.-ч/га, тыс. руб./га), соответствующий некоторой вероятности  $p$ ;  $a_{lis}^p$  – дополнительные ресурсы на восстановление потерь, связанных с влиянием гидрометеорологических событий;  $V_{il}$  – наличие ресурса  $l$ -вида  $i$ -го поля;  $\beta_{jis}^p$  – потери продукции ( $s$ -культуры на  $i$ -м поле) в результате проявления экстремальных гидрометеорологического явления  $j$ ;  $Y_s$  – гарантированный (минимальный) объем производства продукции  $s$ -культуры (ц);  $\underline{n}$  и  $\bar{n}$  – минимально и максимально возможная площадь сельскохозяйственных угодий для возделывания культур (га);  $\eta_s$  – коэффициент, учитывающий площадь посевов семян  $s$ -культуры;  $w_{mis}$  – расход  $m$ -удобрения или средства защиты растений на единицу площади  $i$ -го поля  $s$ -культуры (ц/га);  $\varphi_{jmis}^p$  – дополнительные расходы удобрений, связанные с влиянием гидрометеорологических событий;  $W_{mi}$  – наличие удобрения  $m$ -вида для  $i$ -го поля (ц).

Задачу (1)-(6) можно использовать для определения параметров планирования производства сельскохозяйственной продукции на нескольких этапах. На первом из них определяется множество оптимальных планов в зависимости от предшественника с учетом влияния одного или нескольких природных событий. Каждое оптимальное решение представляет собой план производства, соответствующий некоторой вероятности. При этом модель (1)-(6) может быть разделена на  $K$  задач, связанных с предшественниками, с учетом природных рисков. Для каждой задачи определяется распределение значений целевой функции  $f_{max}^{(\zeta)k}$ , в которой  $\zeta$  представляет собой вероятность совместных событий (при проявлении нескольких негативных природных явлений в один год). Вероятность совместного проявления различных природных события в один и тот же год можно определить по формуле:

$$\zeta\left(\sum_{h=1}^H p_h\right) = \sum_{h=1}^H \zeta(p_h) - \sum_{h=1}^{H-1} \sum_{j=h+1}^H \zeta(p_h p_j) + \sum_{h=1}^{H-2} \sum_{j=h+1}^{H-1} \sum_{i=j+1}^H \zeta(p_h p_j p_i) - \dots + (-1)^{H-1} \zeta\left(\prod_{h=1}^H p_h\right), \quad (7)$$

где  $p_i, p_j$  – вероятности проявления событий различного происхождения;  
 $H$  – множество экстремальных событий различного происхождения ( $h \in H$ ).

Второй этап решения задачи связан с выделением наилучших для управления рисками вариантов решений. В качестве таковых, для оценки наихудшего, наилучшего и усредненного варианта развития событий, можно использовать минимальное, максимальное и медианное распределения вероятностей, полученные эмпирически ( $MAX\{f_{max}^{(\zeta)k}\}, MIN\{f_{max}^{(\zeta)k}\}, Me\{f_{max}^{(\zeta)k}\}$ ).

Кроме того, функция  $f_{max}^{(\zeta)k}$  может быть связана с частными вероятностями, характеризующими случайные параметры экстремальной задачи  $f_{max}^{(\zeta)k} = F(p_1, p_2, \dots, p_u)$ , где  $U$  – число случайных параметров задачи ( $u \in U$ ).

В отличие от модели [7], не учитывающей риски при воздействии гидрометеорологических событий на результаты деятельности сельскохозяйственного товаропроизводителя, модель (1)-(6) является более сложной из-за необходимости оценки повторяемости экстремальных явлений и ущербов, наносимых ими.

В работе [5] проведен анализ возможности влияния одного и нескольких климатических событий на сельскохозяйственное производство, на основе которого показано, что чаще всего аграрные предприятия страдают от одного экстремального явления, реже – от двух и очень редко – от трех. Особое внимание следует уделять редким событиям, частота которых ввиду изменения климата может увеличиваться. Например, вероятность засухи 2015 г., наблюдавшейся на территории Иркутской области, характеризуется значениями 0,058-0,175. Нижнее значение соответствует засушливому явлению, имевшему место в Иркутском районе. По данным урожайности зерновых за последние 20 лет усредненная повторяемость этой засухи один раз в 6-7 лет.

При решении задачи (1)-(6) с вероятностными параметрами эффективным является метод статистических испытаний. На первом шаге, согласно определенным законам распределения вероятностных параметров задачи математического программирования, методом статистических испытаний моделируются квантили распределения и соответствующие им вероятности в условиях проявления одного или нескольких природных явлений для каждого сочетания предшественников  $k$ . Затем решается задача линейного программирования, в результате чего определяется распределение вероятностей целевой функции  $f_{max}^{(\zeta)k}$  и планов производства с учетом суммы частных вероятностей влияния экстремального явления на разные параметры производства. Операция моделирования вероятностей, значений параметров и решения экстремальной задачи повторяются многократно. Результатом решения являются многомерные функции распределения критерия оптимальности и соответствующие им планы для разных севооборотов с учетом рисков проявления гидрометеорологических событий. По этим данным на втором этапе определяются решения для планирования производства на следующий год.

Задача оптимизации структуры посевов с учетом предшественников может быть решена с учетом и без учета мнения экспертов и согласно определенным правилам севооборота [3, 10]. Подобная задача позволяет оптимизировать структуры посевов с учетом природных рисков. При этом лицу, принимающему решение, предлагаются различные варианты развития событий, соответствующие некоторым вероятностям. Помимо этого, многоэтапная задача размещения посевов может помочь в оценке затрат на повышение плодородия почвы и проведение других мероприятий, способных снизить риск при производстве сельскохозяйственной продукции.

На примере агропромышленного предприятия Иркутской области ЗАО «Иркутские семена» решена задача оптимизации производства аграрной продукции с учетом сильной засухи, проявившейся на территории региона в 2015 г. (таблица 1).

**Таблица 1.** Результаты решения двухэтапной задачи оптимизации структуры посевов для ЗАО «Иркутские семена» Иркутского района Иркутской области с учетом сильной засухи

Решение задачи	$p_1$	$p_2$	Значение целевой функции, млн руб.	Ущерб, млн руб.
Севооборот 1				
Наилучшее	0,175	0,117	104,394	15,873
Наихудшее	0,0950	0,147	102,805	17,462
Медианное	0,167	0,0940	103,624	16,642
Севооборот 2				
Наилучшее	0,175	0,117	91,679	28,588
Наихудшее	0,0950	0,147	90,078	30,188
Медианное	0,167	0,0940	91,061	29,205
Севооборот 3				
Наилучшее	0,175	0,117	81,419	38,848
Наихудшее	0,0950	0,147	80,092	40,174
Медианное	0,167	0,0940	80,926	39,340

При решении задачи оптимизации размещения посевов сельскохозяйственных культур засуха оценивалась путем уменьшения урожайности (агрономическая засуха). При этом каждой отдельной культуре соответствовала определенная вероятность. В таблице  $p_1$  – вероятность урожайности зерновых культур, а  $p_2$  – картофеля, рассчитанные с использованием метода статистических испытаний по критерию проявления редкой засухи, квантили соответствуют нормальному распределению.

Согласно полученным решениям можно сделать вывод, что от выбора предшественника зависит величина возможных ущербов, наносимых засухой. Известно, что наихудшим предшественником для сельскохозяйственных культур являются зерновые, а наилучшими – пары и пропашные культуры (картофель, овощи) [3]. Так при применении севооборота 3, при котором возделываемые в хозяйстве картофель и зерновые засеваются после зерновых и зернобобовых соответственно, наблюдаются самые высокие ущербы при проявлении засухи (от 38,848 до 40,174 млн. руб.). При наилучшем севообороте (севооборот 1), величина ущербов в сравнении с третьим вариантом решения задачи уменьшилась более

чем на 50%, что объясняется выбором более благоприятных предшественников для реализуемых предприятием сельскохозяйственных культур. Это подтверждает, что обоснованное использование севооборотов позволяет снижать риск производства продовольственной продукции в крайне неблагоприятных условиях и, в частности, при проявлении засух.

**Заключение.** В работе сформулирована двухэтапная модель оптимизации размещения посевов сельскохозяйственных культур, которая учитывает риски производства аграрной продукции при влиянии одного или множества экстремальных климатических явлений. Решена задача математического программирования с учетом предшественников в условиях влияния редкой засухи для сельскохозяйственного предприятия Иркутской области. При этом оценен ущерб от влияния природного события для различных севооборотов. Показано, что в зависимости от выбора того или иного предшественника можно снижать величину ущербов более чем на 50%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонова Н.Н., Шевчук Л.М. Алгоритм решения двухэтапной минимаксной задачи с линейными ограничениями // Приближенные методы анализа и их приложения. Иркутск: СЭИ СО АН СССР. 1989. С. 5–10.
2. Борщевский М.З., Герман И.В., Шевчук Л.М. Многошаговый процесс принятия решений в условиях неопределенности // Приближенные методы решения операторных уравнений и их приложения. Иркутск: СЭИ СО АН СССР. 1982. С. 182–193.
3. Зайцев А.М., Солодун В.И. Теоретические основы полевых севооборотов и методология их проектирования в агроландшафтных системах земледелия. Монография. Иркутск: ООО «Мегапринт». 2016. 256 с.
4. Иваньо Я.М., Полковская М.Н. О многоэтапных моделях оптимизации структуры посевов // Известия Иркутской государственной экономической академии. 2014. № 1 (93). С.121–125.
5. Иваньо Я.М., Петрова С.А. Оптимизационные модели аграрного производства в решении задач оценки природных и техногенных рисков. Монография. Иркутск: Изд-во Иркутского ГАУ. 2015. 180 с.
6. Иваньо Я.М., Петрова С.А. Оценка рисков производства сельскохозяйственной продукции в условиях засух с использованием оптимизационных моделей // Социально-экономические проблемы развития экономики АПК в России и за рубежом: материалы международной научно-практической конференции, посвященная 50-летию со дня образования экономического факультета (26 ноября 2015 г.). Иркутск: Изд-во Иркутского ГАУ. 2015. С. 343–351.
7. Оценка природных и техногенных рисков в Российской Федерации. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России. 2013. С. 33–41.
8. Попов И.Г. Математические методы в экономических расчетах по сельскому хозяйству. М.: Колос. 1964. 238 с.
9. Приказ Минсельхоза России от 16.11.2017 N 578 "Об утверждении методики определения страховой стоимости и размера утраты (гибели) урожая сельскохозяйственной культуры и посадок многолетних насаждений и методики

определения страховой стоимости и размера утраты (гибели) сельскохозяйственных животных" (Зарегистрировано в Минюсте России 05.12.2017 N 49117).

10. Харитонов С.С. Экспертные оценки как основа управленческих решений сельскохозяйственного производства Оренбургской области // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. Оренбург. 2009. № 2 (22). С. 222–224.
  11. Шарипов С.А. Оптимизация структуры посевов – необходимое условие повышения эффективности производства // Достижения науки и техники АПК. 2007. № 1. С. 42–44.
- 

## TWO-STAGE MODEL OF OPTIMIZATION OF SOWING STRUCTURE WITH RISK ASSESSMENT

**Yaroslav M. Ivanyo**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research

**Sofia A. Petrova**

Ph.D., Associate Professor of the Department of Informatics and Mathematical Modeling

**Marina N. Polkovskaya**

Ph.D., Associate Professor of the Department of Informatics and Mathematical Modeling

Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky,

664038, Irkutsk district, n Molodezhny, 1/1, e-mail: rector@igsha.ru

**Abstract.** Agricultural production is exposed to a significant number of external factors affecting the performance of agricultural enterprises, of which the most significant impact is different hydrometeorological phenomena. Effective planning of obtaining agricultural products is associated with taking into account, first of all, natural risks. The paper considers a two-stage model for optimizing the location of agricultural crops, which takes into account the impact of negative natural phenomena on the production of agricultural products.

The use of a multi-stage extreme task is due to the fact that planning at the next step (usually a year) depends on the previous result. At the same time, the model uses parameters characterizing the effect of one or several extreme climatic phenomena on the production of agricultural products. The proposed two-stage model with probabilistic parameters is realized for the agricultural enterprise of the Irkutsk region, taking into account the effect of a severe drought.

**Key words:** optimization of crop structure, crop rotation, linear programming problem, two-stage model, risks.

### References

1. Antonova N.N., Shevchuk L.M. Algoritm resheniya dvuhehtapnoj minimaksnoj zadachi s linejnymi ogranicheniyami [Algorithm for solving a two-stage minimax problem with linear constraints] // Approximate methods of analysis and their applications. Irkutsk: SEI SB AS USSR. 1989. Pp. 5–10. (in Russian)
2. Borshchevsky M.Z., Herman I.V., Shevchuk L.M. Mnogoshagovyyj process prinyatiya reshenij v usloviyah neopredelennosti [Multistep decision-making process in conditions of uncertainty]

- // Approximate methods for solving operator equations and their applications. Irkutsk: SEI SB AS USSR. 1982. Pp. 182–193. (in Russian)
3. Zaitsev A.M., Solodun V.I. Teoreticheskie osnovy polevyh sevooborotov i metodologiya ih proektirovaniya v agrolandshaftnyh sistemah zemledeliya [Theoretical foundations of field crop rotations and methodology of their design in agrolandscape farming systems]. Irkutsk. OOO Megaprint. 2016. 256 p. (in Russian)
  4. Ivanyo Ya.M., Polkovskaya M.N. O mnogoetapnyh modelyah optimizacii struktury posevov [About multistage models of crop structure optimization] // Izvestiya of the Irkutsk State Economic Academy. 2014. No. 1 (93). Pp.121–125. (in Russian)
  5. Ivanyo Ya.M., Petrova S.A. Optimizacionnye modeli agrarnogo proizvodstva v reshenii zadach ocenki prirodnyh i tekhnogennyh riskov [Optimization models of agricultural production in solving problems of assessment of natural and technogenic risks]. Irkutsk. Publishing house of Irkutsk State University. 2015. 180 p. (in Russian)
  6. Ivanyo Ya.M., Petrova S.A. Ocenka riskov proizvodstva sel'skohozyajstvennoj produkcii v usloviyah zasuh s ispol'zovaniem optimizacionnyh modelej [Assessment of agricultural production risks in drought conditions using optimization models] // Socio-economic problems of the development of the agro-industrial complex in Russia and abroad: materials of the international scientific and practical conference dedicated to the 50th anniversary of the foundation of the Faculty of Economics (November 26, 2015). Irkutsk. Publishing House of Irkutsk State University. 2015. Pp. 343–351. (in Russian)
  7. Ocenka prirodnyh i tekhnogennyh riskov v Rossijskoj Federacii [Assessment of natural and man-made risks in the Russian Federation]. St. Petersburg: St. Petersburg. Unitary Enterprise of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 2013. Pp. 33–41. (in Russian)
  8. Popov I.G. Matematicheskie metody v ehkonomicheskikh raschetah po sel'skomu hozyajstvu [Mathematical Methods in Economic Calculations for Agriculture]. Moscow. Kolos. 1964. 238 p. (in Russian)
  9. Order of the Ministry of Agriculture of Russia from 16.11.2017 N 578 "Ob utverzhdenii metodiki opredeleniya strahovoj stoimosti i razmera utraty (gibeli) urozhaya sel'skohozyajstvennoj kul'tury i posadok mnogoletnih nasazhdenij i metodiki opredeleniya strahovoj stoimosti i razmera utraty (gibeli) sel'skohozyajstvennyh zhivotnyh" ["On the approval of the methodology for determining the insurance value and the amount of loss (death) of the crop and planting of perennial plantations and methods for determining insurance value and the size of loss (death) of farm animals"] (Registered in the Ministry of Justice of Russia 12/05/2017 N 49117). (in Russian)
  10. Kharitonov S.S. Ekspertnye ocenki kak osnova upravlencheskih reshenij sel'skohozyajstvennogo proizvodstva Orenburgskoj oblasti [Expert assessments as a basis for management decisions of agricultural production in the Orenburg region] / Proceedings of the Orenburg State Agrarian University. Orenburg. 2009. No. 2. (22). Pp. 222–224. (in Russian)
  11. Sharipov S.A. Optimizaciya struktury posevov – neobhodimoe uslovie povysheniya ehffektivnosti proizvodstva [Optimization of the structure of crops is a necessary condition for increasing production efficiency] // Achievements of science and technology of agroindustrial complex. 2007. No. 1. Pp. 42–44. (in Russian)