

1.6.21. ГЕОЭКОЛОГИЯ
УДК 551.583:631 DOI 10.37493/2308-4758.2023.4.7

Ашабоков Б.А., Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, Россия;
Институт информатики и проблем регионального управления
КБНЦ РАН, Россия;
Федченко Л.М., Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, Россия;
Ташилова А.А., Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, Россия;
Кешева Л.А., Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, Россия;
Ашабокова М.Б. Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, Россия

**ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ СНИЖЕНИЯ РИСКОВ
ОТ ЗАСУХ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

Введение. В статье приводятся результаты анализа изменений влагообеспеченности почвы на юге европейской территории России (ЕТР), связанных с потеплением климата. Показано, что как в предгорной, так и в степной климатической зоне наблюдается тенденция уменьшения данного параметра, что в существенной степени повышает актуальность разработки методов снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с засухами. Представлена модель, основанная на различной уязвимости сельскохозяйственных культур данным опасным погодным явлением, приведены результаты модельных расчетов для условий степной зоны Кабардино-Балкарской республики (КБР).

Материалы и методы исследований. При проведении исследований в качестве показателя, характеризующего влагообеспеченность почвы, использован гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова Г.Т. Значения данного коэффициента были рассчитаны с использованием данных 13 метеостанций о количестве осадков и температуре воздуха за 1961-2018 гг. Разработка модели снижения рисков в данной работе рассматривается в рамках теории принятия решений. В качестве целевой в задаче можно использовать функцию, описывающую выигрыш или потерю сельского хозяйства. Использование данного способа выбора действия для снижения рисков позволяет избежать формирования множества действий, из которых необходимо выбирать наиболее приемлемое.

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты проведенных в работе расчетов показали, что следствием изменения климата на территории юга ЕТР будет существенное ухудшение условий производства сельскохозяйственной продукции. Последствия такой тенденции будут крайне негативными для производства сельскохозяйственной продукции на данной территории. В результате решения задачи можно определить оптимальную с точки зрения используемого критерия структуру производства сельскохозяйственных культур с учетом вероятности появления засух. В качестве такого критерия был использован максимум ожидаемого объема производства сельскохозяйственных культур с учетом влия-

Выводы. ния засух.
Предложен метод снижения потерь сельского хозяйства от засух с учетом их различной уязвимости для различных сельскохозяйственных культур. Модель записана в рамках линейного программирования, что позволяет определять оптимальную с точки зрения используемого критерия структуру производства сельскохозяйственной продукции. Метод может быть использован в регионах с различными производственно-экономическими условиями.

Ключевые слова: изменение климата, засухи, уязвимость сельскохозяйственных культур, коэффициент увлажнения почвы, задача линейного программирования, целевая функция, система ограничений

Ashabokov B.A., High Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia; Institute of Informatics and Regional Management Problems of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Nalchik, Russia

Fedchenko L.M., High Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia;

Tashilova A.A., High Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia;

Kesheva L.A., High Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia;

Ashabokova M.B. High Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia

On a Model for Drought Risk Reduction in Agriculture

Introduction. The article analyzes the changes in moisture content of the soil in the south of the European territory of Russia (ETR) associated with climate warming. It is shown that both in the foothill and steppe climatic zones there is a tendency to decrease this parameter, which greatly increases the relevance of developing methods to reduce risks in agriculture associated with droughts. A model based on different vulnerability of agricultural crops to this dangerous weather phenomenon is presented, the results of model calculations for the conditions of the steppe zone of the Kabardino-Balkarian Republic (KBR) are presented.

Materials and research methods. When conducting research, the Selyaninov hydrothermal coefficient was used as an indicator characterizing the moisture content of the soil. The values of this coefficient were calculated using data from 13 weather stations on the amount of precipitation and air temperature for 1961-2018. The development of a risk reduction model in this paper is considered within the framework of decision theory. As a target in the problem, you can use a function that describes the gain or loss of agriculture. Using this method of choosing an action to reduce risks avoids the formation of a set of actions from which it is necessary to choose the most appropriate one.

Research results and their discussion. The results of the calculations carried out in the work showed that the consequence of climate change in the south of the EPR will be a significant deterioration in the conditions for the production of agricultural products. The consequences of such a trend will be extremely negative for agricultural production in the area. As a result of solving the problem, it is possible to determine the optimal structure of crop production from the point of view of the criterion used, taking into account the probability of droughts. As such a criterion, the maximum expected volume of crop production was used, taking into account the impact of droughts.

- Conclusions. A method has been proposed to reduce the losses of agriculture from droughts, taking into account their different vulnerability to various crops. The model was written in the framework of linear programming, which makes it possible to determine the optimal structure of agricultural production in terms of the criterion used. The method can be used in regions with different production and economic conditions.
- Keywords: climate change, droughts, crop vulnerability, soil moisture coefficient, linear programming problem, objective function, constraint system

Введение

Одной из самых больших угроз окружающей среде, социальным и экономическим основам развития общества становится современное изменение климата [13, 14]. Механизмов влияния данного глобального фактора на различные сферы деятельности чрезвычайно много, важнейшим из них является влияние посредством экстремальных погодных явлений. Согласно Межправительственной группе экспертов по изменению климата (МГЭИК), «весьма вероятно, что экстремально жаркие периоды, волны тепла и сильные осадки будут продолжать становиться все более частыми» [12, 13]. В современный период ни в одной стране мира не существует сектора экономики, который не был бы непосредственно или косвенно зависим от погоды, особенно опасных погодных явлений [2, 6, 15]. Специалистами Центра атмосферного исследования США (NCAR) было озвучено, что глобальное повышение температуры окружающей среды в сочетании со значительным изменением климата станут основной причиной для установления сухой погоды во всем мире и в 2040 году всем материкам Земли грозит сильнейшая засуха.

На территории России потепление за последние 45 лет (1976–2021 гг.) оказалось более резким по сравнению с глобальным. Если линейный тренд температуры воздуха за 1976–2020 гг., например, составил $0,18\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет для земного шара, то скорость роста осредненной по России среднегодовой температуры составила $+0,49\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет (вклад в общую изменчивость 54 %) и $0,56\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет в предгорной зоне КБР [1, 4]. На фоне межгодовых колебаний тренд более четко (больше всего) выделяется в летные сезоны ($0,40\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет: описывает 67 % суммарной дисперсии в России и $0,68\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет описывает 56 % суммарной дисперсии в предгорной зоне КБР). В то же время изменения в режиме атмосферных осадков

носят неравномерный характер: за те же последние 45 лет наблюдалось уменьшение суточных максимумов осадков во всех климатических зонах юга ЕТР, наиболее заметное его уменьшение имело место в летний сезон [1].

При потеплении климата усиливается испарение с поверхности почвы, что существенно уменьшает влагосодержание деятельного слоя почвы (глубиной 1 м) и речной сток именно в тех регионах, где особенно развито сельское хозяйство: на Северном Кавказе, в Поволжье и др. [3, 8].

Очевидно, что эти тенденции повышают как сложность разработки методов снижения рисков, так и требования к этим методам. Важным требованием к этим методам становится экономичность практического их использования.

Цель настоящей работы заключается в разработке метода снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с засухами, и проведении модельных расчетов для анализа эффективности практического его использования.

Материалы и методы исследований

Предложенная модель основана на использовании нового механизма снижения рисков, а именно того факта, что уязвимость засухами различна для различных сельскохозяйственных культур. В качестве основной особенности информационного обеспечения задач, возникающих на пути разработки методов решения данной проблемы, можно отметить невозможность точного определения состояния, в котором могут оказаться засухи в предстоящем году. В настоящей работе на основе временного ряда коэффициента увлажнения почвы за период (1961–2018 гг.) множество возможных состояний засух представляется в виде дискретной случайной величины с известным законом распределения. Наличие такой информации делает естественным рассмотрение проблемы разработки модели снижения рисков, связанных с засухами, в рамках теории принятия решений [7, 10]. Но на пути определения допустимого множества действий $A_1, A_2, A_3, \dots, A_M$, из которых выбирается наиболее приемлемое, возникают серьезные трудности, способные оказать влияние на работоспособность модели.

В данной работе решение данной проблемы осуществляется в рамках задачи линейного программирования. Тогда снижение рисков сводится к определению такой структуры производства сельскохозяйственных культур, которая максимизирует выигрыш или минимизирует потери сельского хозяйства (в зависимости от используемого критерия) с учетом влияния засух. Для этой цели формулируется и решается задача оптимизации структуры производства сельхозкультур в рамках линейного программирования, что позволяет обойти отмеченные трудности, а именно, необходимость формирования множества действий $A_1, A_2, A_3, \dots, A$ и выбор из него наиболее приемлемого.

В общем случае данная задача, когда максимизируется выигрыш сельского хозяйства, записывается в виде:

$$F = \sum_{i=1}^m c_i x_i \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} x_i \leq b_j, \quad (j = 1, n), \quad (2)$$

$$x_i \geq 0, \quad (3)$$

где F – целевая функция;
 x_i – площадь пашни, занимаемой i -й культурой;
 $c_i a_{ij}$, – коэффициенты;
 b_j – максимальный объем ресурса j -го вида, который используется в сельском хозяйстве.

Целевая функция (1) представляет собой выигрыш, связанный с производством сельхозкультур на заданной территории с учетом их уязвимости засухами (общий объем производства продукции, прибыль от производства продукции и т.д.). Выражения (2) описывают использование ограниченных ресурсов в процессе производства сельхозкультур. Условия (3) (неотрицательность переменных x_i) вытекают из смысла переменной (площади, занимаемые сельскохозяйственными культурами, не могут быть отрицательными). Таким образом, снижение рисков в сельском хозяйстве заключается в определении и использовании такой структуры производ-

ства сельскохозяйственных культур, которая максимизирует целевую функцию F с учетом их уязвимости засухами.

Результаты исследований и их обсуждение

1. Анализ динамики влагообеспеченности на юге европейской территории России

К неблагоприятным последствиям глобального потепления климата на территории РФ относится повышение засушливости климата на значительной ее части. Увеличение частоты засух наблюдается не только в регионах с прогнозируемым снижением количества осадков, но и в тех, где наблюдается увеличение количества осадков [5].

Остановимся на некоторых результатах анализа динамики влагообеспеченности в различных климатических зонах юга европейской территории России (ЕТР) с использованием гидротермического коэффициента увлажнения K [9]. Для этой цели использовались данные 13 метеостанций предгорной и степной зон юга ЕТР о количестве осадков и температуре воздуха и следующая формула для K [9]:

$$K = \frac{R}{0.1 \Sigma t}, \quad (4)$$

где R – сумма осадков за период с температурами выше $+10^\circ\text{C}$ (мм);

– сумма температур за этот же отрезок времени ($^\circ\text{C}$).

Метеостанции расположены в предгорной (гг. Буйнакск, Нальчик, Владикавказ, Черкесск, Ставрополь, Кисловодск) и равнинной (гг. Дербент, Изберг, Изобильный, Кизляр, Махачкала, Моздок, Прохладный) климатических зонах. В зависимости от значений данного коэффициента могут иметь место следующие состояния влагообеспеченности почвы [9]:

1. $K > 1,3$ – зона избыточного увлажнения;
2. $1 < K \leq 1,3$ – зона обеспеченного увлажнения;
3. $0,7 < K \leq 1,0$ – засушливая зона (слабая засуха);
4. $0,5 < K \leq 0,7$ – зона сухого земледелия (средняя засуха);
5. $K \leq 0,5$ – зона ирригации (сильная засуха).

Результаты расчетов коэффициента K на интервале 1961–2018 гг. показали, что самая высокая влагообеспеченность наблюдалась на метеостанции в г. Владикавказе ($K = 2,23$) и в г. Кисловодске ($K = 1,80$), обе метеостанции располагались в зоне избыточного увлажнения. Самая низкая влагообеспеченность наблюдалась на метеостанции г. Буйнакска ($K = 0,98$), которая располагалась в зоне обеспеченного увлажнения. Остальные метеостанции по данному показателю занимают промежуточное положение (Ставрополь $K = 1,05$, Нальчик $K = 1,34$, Черкесск $K = 1,30$). Линейные тренды временных рядов коэффициента K в предгорной климатической зоне имеют тенденцию к уменьшению.

Для сравнения приведем результаты расчетов коэффициента K для некоторых метеостанций, расположенных в равнинной климатической зоне. Только у одной метеостанции, расположенной в г. Изобильный, осредненное значение коэффициента K за 1961–2018 гг. находилось в зоне обеспеченного увлажнения ($K = 1,03$), в засушливой зоне ($K = 0,7–1,0$), оно находилось у двух метеостанций: Моздок ($K = 0,8$) и Прохладный ($K = 0,9$), у остальных метеостанций оно находилось в зоне ирригации (Дербент $K = 0,4$, Изберг $K = 0,36$, Кизляр $K = 0,46$, Махачкала $K = 0,45$). Линейные тренды временных рядов коэффициента K , полученные по данным метеостанций степной зоны, также имеют тенденцию к уменьшению:

Из результатов расчетов можно сделать вывод, что потепление климата приведет к существенному ухудшению условий производства сельскохозяйственной продукции на территории юга ЕТР. Очевидно, что последствия такой тенденции не отразятся на продовольственную безопасность страны.

2. Формулировка задачи снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с засухами

Изложенная ниже формулировка решает проблемы информационного обеспечения задачи снижения рисков, а также формирования множества действий $A_1, A_2, A_3, \dots, A_M$ и выбора наиболее приемлемого из них [7,10].

В этом случае приходим к задаче принятия решений в условиях риска, а вместо приемлемого действия путем решения соответ-

вующей задачи линейного программирования находится оптимальное (т. е. оптимальная структура производства сельскохозяйственных культур с точки зрения используемого критерия). В качестве критерия могут быть использованы минимум ожидаемых потерь отрасли от засух, максимум ожидаемого объема производства сельскохозяйственных культур с учетом их влияния и другие.

Для записи модели снижения потерь сельского хозяйства от засух введем обозначения. Пусть на заданной территории площадью S_0 производится m культур, а площади пашни, занимаемые ими, обозначим $x_i (i = 1, 2, \dots, m)$. Себестоимость производства и урожайность i -ой культуры обозначим s_i, Y_i . Объем финансовых ресурсов сельского хозяйства обозначим F_0 . Минимальные объемы производства культур пусть будут равны $W_i (i = 1, 2, \dots, m)$. Предположим, что параметры засух и производственно-экономические показатели сельского хозяйства в пределах рассматриваемой территории одинаковы.

Остановимся на записи целевой функции задачи. Этот вопрос более подробно затронут ниже при решении модельной задачи. Здесь только отметим, что для этой цели, пользуясь многолетними данными о состоянии, в которых могут находиться засухи на рассматриваемой территории, можно представить в виде дискретной случайной величины (табл. 1).

Таблица 1.

СОСТОЯНИЯ ЗАСУХ НА РАССМАТРИВАЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ n И
СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ИМ ВЕРОЯТНОСТИ p
Table 1. States of droughts in the territory under consideration n and their
corresponding probabilities p

n	0	1	2		N
p	p_0	p_1	p_2		p_N

Таким образом, предположено, что количество состояний, в которых могут находиться засухи, равно N , а вероятности их нахождения в этих состояниях равны $p_1, p_2, \dots, p_N$. Случай $n = 0$ в таблице соответствует отсутствию засух ($p = p_0$).

В случае, когда в качестве целевой функции используется математическое ожидание валового объема производства продукции, целевую функцию можно записать в виде:

$$\max V = p_0 VZ_0 + p_1 VZ_1 + p_2 VZ_2 + \dots + p_N VZ_N \quad (5)$$

где $VZ_0, VZ_1, \dots, VZ_N$ – валовые сборы сельскохозяйственных культур при отсутствии засух и в случаях, когда засухи наблюдаются в состояниях $1, 2, \dots, N$.

Валовой сбор сельскохозяйственных культур при отсутствии засухи в выражении (5) вычисляется с помощью выражения:

$$VZ_0 = \sum_{i=1}^m x_i Y_i \Pi_i, \quad (i = 1, 2, \dots, m), \quad (6)$$

Значения данного показателя, с учетом возможных состояний засух, вычисляются с помощью следующих выражений:

$$VZ_j = \sum_{i=1}^m (1 - k_{ij}) x_i Y_i \Pi_i, \quad (j = 1, 2, \dots, N), \quad (7)$$

где x_i – площадь пашни, занимаемой i -й культурой;
 Y_i и Π_i – урожайность и цена реализации i -й культуры;
 k_{ij} – уязвимость i -й культуры засухой в j -ом состоянии
 $(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, N)$.

Система ограничений модели, описывающих использование ресурсов различных видов и требований к объемам производства продукции, имеет вид:

$$\sum_{i=1}^m x_i \leq S_o, \quad (7)$$

— ограничения, наложенные на использование земельных ресурсов:

$$\sum_{i=1}^m x_i \leq S_o \Pi_i, \quad (8)$$

— соблюдение севооборота:

$$x_i = \alpha_i S_o, \quad (\overline{i = 1, m}), \quad (9)$$

где α_i – доля пашни, занимаемой i -ой культурой;

— требования к объемам производства сельскохозяйственных культур:

$$\sum_{i=1}^m Y_i x_i \geq W_i (\overline{i = 1, m}), \quad (10)$$

где W_i – минимально допустимый объем производства i -й культуры.

— требования к использованию ограниченных финансовых ресурсов:

$$\sum_{i=1}^m Y_i x_i s_i \leq F_o, \quad (11)$$

— условия неотрицательности переменных x_i (площадей пашни, занимаемых сельскохозяйственными культурами):

$$x_i > (i = 1, 2, \dots, m). \quad (12)$$

Получена система линейных ограничений, которым удовлетворяют производственно-экономические показатели сельского хозяйства. В результате решения задачи (5)–(12) должны быть найдены переменные x_i , ($i = 1, 2, \dots, m$), которые удовлетворяют ограничениям задачи и максимизируют целевую функцию (5). Отметим, что в случае необходимости модель можно дополнить ограничениями, описывающими использование других ресурсов. Кроме этого, систему ограничений можно записать в виде, позволяющем использовать модель снижения рисков в системе «сельское хозяйство – перерабатывающая отрасль».

3. Результаты модельных расчетов

Для исследования работоспособности модели на примере степной зоны КБР (м/станция Прохладная) были проведены некоторые модельные расчеты. Для этой цели рассматривался

участок площадью 600 га. Рассматривалась задача нахождения оптимальной структуры производства 1) озимой пшеницы, 2) кукурузы, 3) овса, 4) картофеля на этом участке, которая максимизирует валовой объем производства продукции с учетом влияния засух. Состояния, в которых могут находиться засухи в рассматриваемой климатической зоне и соответствующие им вероятности были определены на основе данных среднемесячных сумм осадков и среднемесячной температуры за 1961–2018 гг., которые были использованы для расчета гидротермического коэффициента K Селянинова [13]. Отметим, что в рассматриваемой климатической зоне условие $t > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ выполняется в мае, июне, июле, августе, сентябре. Выше было отмечено, что по значениям коэффициента K можно выделить пять состояний увлажнения почвы. Объединяя первые два из них, получаются возможные состояния засух ($j = 1, 2, 3, 4$):

- 1. $K > 1$ – отсутствие засух;
- 2. $0,7 < K \leq 1,0$ – слабая засуха;
- 3. $0,5 < K \leq 0,7$ – средняя засуха;
- 4. $K \leq 0,5$ – сильная засуха.

Соответствующая j -му состоянию вероятность определяется как отношение частоты его появления к количеству элементов используемого временного ряда K ($N = 58$ лет). Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2. СОСТОЯНИЯ ЗАСУХ K_j И СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ИМ ВЕРОЯТНОСТИ p_j
Table 2. Drought conditions K_j and their corresponding probabilities p_j

K	$K > 1,0$	$0,7 < K \leq 1,0$	$0,5 < K \leq 0,7$	$K \leq 0,5$
p	0,47	0,33	0,16	0,04

Из таблицы видно, что в рассматриваемой климатической зоне региона чаще наблюдается состояние, когда сельское хозяйство находится под влиянием засух ($p = 0,53$), соответственно вероятность того, что засуха отсутствует, равна $p = 0,47$. Можно еще заметить, что, хотя вероятность невысокая, но в данной климатической зоне наблюдаются сильные засухи ($K \leq 0,5$).

Пользуясь выражением (5), целевую функцию в рассматриваемом случае можно записать в виде:

$$max V = p_1 V_1 + p_2 V_2 + p_3 V_3 + p_4 V_4 .$$

(13)

Можно заметить, что ожидаемый валовой объем производства культур (V) складывается из ожидаемых валовых объемов их производства на рассматриваемом участке при отсутствии засух V_1 и в случаях, когда они находятся в состояниях $V_j (j = 2, 3, 4)$. Для вычисления значений этих объемов используются выражения (6) и (7) в упрощенном виде:

$$V_1 = \sum_{i=1}^4 x_i Y_i \Pi_i ,$$

(14)

$$V_j = \sum_{i=1}^4 (1 - k_{ij}) x_i Y_i \Pi_i , \quad (j = 2, 3, 4),$$

(15)

где x_1, x_2, x_3, x_4 – площади пашни, занимаемые культурами;
 Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 – урожайности и $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$ – цены их реализации.

При записи выражений (14) и (15) сделано предположение, что уязвимости засухой k_{ij} , урожайности Y_j и цены реализации Π_j сельхозкультур на рассматриваемом участке одинаковы.

Коэффициенты повреждаемости k_{ij} культур для всех четырех состояний засухи определены на основе рекомендаций специалистов сельского хозяйства. В таблице 3 приведены характеристики засух и соответствующие им значения параметров k_{ij} , которые равны доле валового сбора i -ой культуры, потерянной под воздействием засух в j -ом состоянии.

Таблица 3.

ПОВРЕЖДАЕМОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР В СТЕПНОЙ ЗОНЕ КБР ЗАСУХАМИ В РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЯХ
Table 3. Damage to agricultural crops in the steppe zone of the KBR by droughts in various conditions

p_j	Отсутствие засухи	Слабая засуха	Средняя засуха	Сильная засуха
k_{ij}	$k_{11} = 0$	$k_{12} = 0,25$	$k_{13} = 0,4$	$k_{14} = 0,75$
	$k_{21} = 0$	$k_{22} = 0,25$	$k_{23} = 0,4$	$k_{24} = 0,75$
	$k_{31} = 0$	$k_{32} = 0,18$	$k_{33} = 0,3$	$k_{34} = 0,75$
	$k_{41} = 0$	$k_{42} = 0,35$	$k_{43} = 0,45$	$k_{44} = 0,85$

Оценим ожидаемое значение целевой функции валового сбора культур V , который складывается из валового объема производства культур на участках x_i при отсутствии засухи (V_1 при $p_1 = 0,47$) и при трех степенях ее экстремальности: слабая засуха, (V_2 при $p_2 = 0,33$), средняя засуха (V_3 при $p_3 = 0,16$), сильная засуха (V_4 при $p_4 = 0,04$). Для решения задачи (5)–(12), пользуясь данными, приведенными выше, целевая функция (13) представлена в развернутом виде.

$$\begin{aligned} V = & p_1 (x_1 Y_1 Ц_1 + x_1 Y_2 Ц_2 + x_3 Y_3 Ц_3 + x_4 Y_4 Ц_4) + p_2 (x_1 (1 - k_{21}) Y_1 Ц_1 + \\ & + x_2 (1 - k_{22}) Y_2 Ц_2 + x_3 (1 - k_{23}) Y_3 Ц_3 + x_4 (1 - k_{24}) Y_4 Ц_4) + \\ & + p_3 (x_1 (1 - k_{31}) Y_1 Ц_1 + x_2 (1 - k_{32}) Y_2 Ц_2 + x_3 (1 - k_{33}) Y_3 Ц_3 + \\ & + x_4 (1 - k_{34}) Y_4 Ц_4) + p_4 (x_1 (1 - k_{41}) Y_1 Ц_1 + x_2 (1 - k_{42}) Y_2 Ц_2 + \\ & + x_3 (1 - k_{43}) Y_3 Ц_3 + x_4 (1 - k_{44}) Y_4 Ц_4). \end{aligned}$$

(16)

Исходные данные для расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

Table 4. Initial data for model calculations

пп	С/х культура	Урожайность, Y_j , ц/га	Себестоимость*, s_j , руб./ц	W_j , ц	Цена реализации*, $Ц_{ij}$, руб./ц
j=1 пшеница	40	700	4000	1350	
j=2 кукуруза	50	550	5000	1100	
j=3 овес	35	420	2100	700	
j=4 картофель	150	820	75000	1000	

* Данные сайта Госкомстата КБР [11].

1.
- Площадь участка: $S = 600$ га.
2.
- Производимые на данном участке сельскохозяйственные культуры: 1) пшеница, 2) кукуруза, 3) овес, 4) картофель ($i = 1, 2, 3, 4$).
3.
- Коэффициенты повреждаемости с/х культур (k_{ij}) и вероятности различных состояний засухи (p_j) по данным таблицы 3.
4.
- Урожайность культур, Y_i , ц/га: 1) пшеница $Y_1 = 40$, 2) кукуруза $Y_2 = 50$, 3) овес $Y_3 = 35$, 4) картофель $Y_4 = 150$.

5. Себестоимость культур, s_i , руб./ц: 1) пшеница $s_1 = 700$, 2) кукуруза $s_2 = 550$, 3) овес $s_3 = 420$, 4) картофель $s_4 = 820$.
6. Цены реализации, Π_i , руб./ц, по данным Госкомстата КБР [14]: 1) пшеница $\Pi_1 = 1350$, 2) кукуруза $\Pi_2 = 1100$, 3) овес $\Pi_3 = 1200$, 4) картофель $\Pi_4 = 1000$.

Из формулы (13) с учетом вышеприведенных данных, получим выражение для целевой функции:

$$44469x_1 + 45292,5x_2 + 36229,2x_3 + 116775x_4 = V \rightarrow \max. \quad (17)$$

Систему ограничений модели, описывающих производство сельскохозяйственных культур, с учетом исходных данных можно записать в виде:

1. Ограничения по площадям участков

$$\sum_{i=1}^4 x_i \leq S, S = 600 \text{ га}, \quad (18)$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 < 600, \quad (18,a)$$

2. Ограничения по долям с/х культур на участках

$$x_i = \alpha_i \overline{S}, i = \overline{1, n}, \quad (19)$$

где α_i — доля пашни, занимаемой i -й культурой на участке S : $x_i \leq \alpha_i S_i$.

На первом этапе решения задачи (оптимизации функции V не включаются) ограничения по севообороту не используются. Это делается для исследования влияния соблюдения севооборота на максимальное значение целевой функции. На втором этапе продлевается то же самое, но с учетом севооборота.

пшеница	кукуруза	овес	картофель
$\alpha_1 = 0,14$	$\alpha_2 = 0,11$	$\alpha_3 = 0,14$	$\alpha_4 = 0,50$
$S = 600 \text{ га}$			

$$x_1 \leq 108; x_2 \leq 108; x_3 \leq 64; x_4 \leq 320. \quad (19, a)$$

3. Ограничения по объему производства с/х культур

$$Y_i x_1 \geq W_i, i = 1, 2, 3, 4 \quad (20)$$

$$40x_1 \geq 4000 \text{ ц} \quad (20, a)$$

$$50x_2 \geq 5000 \text{ ц} \quad (20, б)$$

$$35x_3 \geq 2100 \text{ ц} \quad (20, в)$$

$$150x_4 \geq 75000 \text{ ц} \quad (20, г)$$

4. Ограничения финансирования производства сельскохозяйственных культур

$$F_i = \sum_{j=1}^4 s_j Y_j x_j (i = 1, 2, 3, 4). \quad (21)$$

$$28000x_1 + 27500x_2 + 14700x_3 + 123000x_4 \leq F = 14000 \text{ тыс. руб.} \quad (21, a)$$

Для решения задачи (17) – (21) в электронную таблицу Excel (SOLVER) были введены коэффициенты целевой функции (17) и системы ограничений: по использованию земельных ресурсов, соблюдению севооборота, объему производства сельскохозяйственной продукции, по использованию финансовых ресурсов (формулы (18,а) – (21,а)). Для решения задачи использовался симплексный метод, реализуемый во встроенной функции SOLVER Excel. В результате были получены площади пашни x_i , занимаемые культурами и обеспечивающие максимум целевой функции (математическое ожидание валового объема производства сельскохозяйственной продукции) с учетом влияния засух. Зная площади пашни, занимаемые сельхозкультурами, можно определить и другие производственно-экономические показатели. В таблице 5 приведены решения задачи и некоторые из этих показателей.

Из таблицы видно, что в результате расчетов получена следующая структура (оптимальная) производства сельскохозяйственных культур: $x_1 = 100$ га, $x_2 = 100$ га, $x_3 = 60$ га, $x_4 = 320$ га. Валовой объем производства сельскохозяйственных культур, соответствующий данной структуре, получился равным 48,52 млн руб. С уче-

Таблица 5. ТАБЛИЦА EXCEL (SOLVER) С РЕШЕНИЯМИ ЗАДАЧИ И ЗНАЧЕНИЯМИ НЕКОТОРЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Table 5. Excel table (SOLVER) with solutions to the problem and the values of some indicators

S = 600 га ($p_j, j = 1, 2, 3, 4$ – состояния засухи)			
Определяемые переменные $x_i (i = 1, 2, 3, 4$ – с/х культуры), га			
1. пшеница	2. кукуруза	3. овес	4. картофель
x_1	x_2	x_3	x_4
100	100	60	320
Коэффициенты целевой функции V			
44 469	45 292,5	36 229,2	116 775
$V = \max$, ф-ла (17) = 48517,9 тыс. руб.			
1. Коэффициенты ограничений по площади участка под с/х культуры, га			
ф-ла (18,a) ≤ 600			
2. Коэффициенты ограничений по долям площадей с/х культур (α_i), га			
$\alpha_1 = 0,18$	$\alpha_2 = 0,18$	$\alpha_3 = 0,14$	$\alpha_4 = 0,50$
ф-ла (19, а) $x_{ij} \leq 108$	ф-ла (19, а) $x_{ij} \leq 108$	ф-ла (19, а) $x_{ij} \leq 64$	ф-ла (19, а) $x_{ij} \leq 320$
3. Коэффициенты ограничений по объему с/х культур W_i , ц			
W_1	W_2	W_3	W_4
x_1	x_2	x_3	x_4
40	50	35	150
ф-ла (20, а) ≥ 4000	ф-ла (20, б) ≥ 5000	ф-ла (20, в) ≥ 2100	ф-ла (20, г) ≥ 75000
4. Коэффициенты ограничений финансирования по участкам F_i , тыс. руб.			
$F = 14\,000,0$ тыс. руб.			
28000	27500	14700	123000
ф-ла (21, а)		$F \leq 14\,000,0$ тыс. руб.	
Прибыль		34517,9 тыс. руб.	

* серой заливкой выделены ячейки с результатами решения задачи оптимизации целевой функции V.

том затрат на их производство (14,0 млн руб.) прибыль составила 34,52 млн руб.

Выводы

Проведен анализ изменений влагообеспеченности почвы в предгорной и степной климатических зонах юга европейской территории России. Показано, что в обеих климатических зонах наблюдается тенденция уменьшения данного параметра, что в существенной степени повышает актуальность разработки методов снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с засухами. Предложен метод снижения потерь сельского хозяйства от засух, который основан на том факте, что уязвимость данным погодным явлением различна для различных сельскохозяйственных культур. Соответствующая модель записана в рамках задачи линейного программирования, что позволяет определять оптимальную с точки зрения используемого критерия структуру производства сельскохозяйственной продукции. Метод может быть использован в регионах с различными производственно-экономическими условиями.

С целью анализа эффективности метода для условий степной зоны КБР проведены модельные расчеты. Для определения возможных состояний засухи соответствующих им вероятностей предложен достаточно эффективный подход. Он основан на вычислении гидротермического коэффициента увлажнения за период 1961–2018 гг. При этом были использованы данные метеостанции Прохладный о количестве атмосферных осадков и температуре воздуха за этот же период. Пользуясь полученным временным рядом данного коэффициента, возможные состояния засух были представлены в виде дискретной случайной величины с известным законом распределения. Это дает возможность учитывать влияние засух на производство сельскохозяйственных культур в целевой функции модели. Результаты модельных расчетов показали высокую эффективность метода для снижения потерь сельского хозяйства от градобитий. Важным достоинством метода является то, что практическое его использование не требует значительных затрат. Исследования показали, что уязвимость засухами сельскохозяйственных культур в зависимости от фазы их развития и характеристик засух недостаточно изучена.

Библиографический список

1. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Теунова Н.В. Пространственно-временное изменение климата юга европейской территории России, оценка его последствий, методы и модели адаптации АПК. Нальчик: Фрегат, 2020. 476 с.
2. Бедрицкий А.И., Коршунов А.А., Хандожко Л.А. и др. Основы оптимальной адаптации экономики России к опасным проявлениям погоды и климата // Метеорология и гидрология. 2009. №4. С. 5–14.
3. Волкова В.И., Бадахова Г.Х., Барекова М.В., Каплан Г.Л. Особенности атмосферной циркуляции переходного периода и колебания дат начала весны в Центральном Предкавказье // Наука. Инновации. Технологии. 2021. №1. С. 125–138.
4. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. Росгидромет. Москва, 2021. 104 с.
5. Зоидзе Е.К., Хомякова Т.В., Шостак З.А. и др. О проблеме адекватного агроклиматического обеспечения экономики Российской экономики в условиях изменения климата // Метеорология и гидрология. 2010. №8. С. 73–86.
6. Катцов В.М. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. СПб.: Росгидромет, 2017. 106 с.
7. Кини Р.Л., Райфа Х.М. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения // Радио и связь, 1981. 560 с.
8. Мелешко В.П., Катцов В.М., Говорков В.А. и др. Антропогенные изменения климата в XXI веке в Северной Евразии // Метеорология и гидрология. 2004. №7. С. 5–26.
9. Селянинов Г.Т. Гидроклиматическая карта мира. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 12 с.
10. Таха Х. Введение в исследование операций. Москва: Мир, 1985. Т. 2. 496 с.
11. Управление Федеральной службы государственной статистики по Северо-Кавказскому федеральному округу. Кабардино-Балкарская Республика. URL: https://stavstat.gks.ru/ofstatistics_kbr (дата обращения 01.03.2023).
12. Drumond A., Liberato M.L.R., Reboita M.S., Taschetto A.S. Weather and Climate Extremes: Current Developments. At-

- mosphere. 2020. Vol. 11. P. 24. <https://doi.org/10.3390/atmos11010024>
13. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
 14. Santos F.D., Ferreira P.L., Pedersen J.S.T. The Climate Change Challenge: A Review of the Barriers and Solutions to Deliver a Paris Solution. *Climate* 2022, 10, 75. <https://doi.org/10.3390/cli10050075>
 15. Shen D., Shi W.-F., Tang W., Wang Y., Liao J. The Agricultural Economic Value of Weather Forecasting in China. *Sustainability* 2022, 14, 17026. <https://doi.org/10.3390/su142417026>

References

1. Ashabokov B.A., Fedchenko L.M., Tashilova A.A., Kesheva L.A., Teunova N.V. Spatio-temporal climate change in the south of the European territory of Russia, assessment of its consequences, methods and models of adaptation of the agro-industrial complex. Fregat LLC, Nalchik, 2020. 476 p. (In Russ.).
2. Bedritsky A.I., Korshunov A.A., Khandozhko L.A. Basics of optimal adaptation of the Russian economy to dangerous manifestations of weather and climate. *Meteorology and Hydrology*. 2009. No. 4. P. 5–14 (In Russ.).
3. Volkova V.I., Badakhova G.Kh., Barekova M.V., Kaplan G.L. Features of the atmospheric circulation of the transitional period and fluctuations in the dates of the beginning of spring in the Central Ciscaucasia // *Science. Innovations. Technologies*. 2021. No.1. P. 125–138 (In Russ.).
4. Report on climate features in the territory of the Russian Federation for 2020. Roshydromet. Moscow, 2021. 104 p. (In Russ.).
5. Zoidze E.K., Khomyakova T.V., Shostak Z.A. et al. On the problem of adequate agro-climatic provision of the economy of the Russian economy in the context of climate change // *Meteorology and Hydrology*. 2010. No. 8. P. 73–86 (In Russ.).
6. Kattsov V.M. Report on climate risks in the Russian Federation. St. Petersburg. Roshydromet, 2017, 106 p. (In Russ.).

7. Kini R.L., Raifa H.M. Decision Making Under Multiple Criteria: Preferences and Substitutions. Radio and communication. 1981. 560 p. (In Russ.).
8. Meleshko V.P., Kattsov V.M., Govorkov V.A. Anthropogenic climate change in the 21st century in Northern Eurasia // Meteorology and hydrology. 2004. No. 7. P. 5–26 (In Russ.).
9. Selyaninov G.T. Agro-climatic map of the world. L.: Gidrometeoizdat, 1966. 12 p. (In Russ.).
10. Taha H. Introduction to Operations Research. Moscow, Mir, 1985. Vol. 2. 496 p. (In Russ.).
11. Office of the Federal State Statistics Service for the North Caucasian Federal District. Kabardino-Balkarian Republic. URL: https://stavstat.gks.ru/ofstatistics_kbr (Accessed: 03/01/2023) (In Russ.).
12. Drumond A., Liberato M.L.R., Reboita M.S., Taschetto A.S. Weather and Climate Extremes: Current Developments. Atmosphere. 2020. Vol. 11. P. 24. <https://doi.org/10.3390/atmos11010024>
13. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
14. Santos, F.D.; Ferreira, P.L.; Pedersen, J.S.T. The Climate Change Challenge: A Review of the Barriers and Solutions to Deliver a Paris Solution. Climate 2022, 10, 75. <https://doi.org/10.3390/cli10050075>
15. Shen D., Shi W.-F., Tang W., Wang Y., Liao J. The Agricultural Economic Value of Weather Forecasting in China. Sustainability 2022, 14, 17026. <https://doi.org/10.3390/su142417026>

**Статья поступила в редакцию 25.04.2023,
статья одобрена после рецензирования 25.09.2023,
статья принята к публикации 09.10.2023.**

**The article was submitted to the editorial office 25.04.2023,
the article was approved after reviewing 25.09.2023,
the article was accepted for publication 09.10.2023.**

Информация об авторах

Ашабоков Борис Азреталиевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом физики облаков Высокогорного геофизического института; заведующий отделом математических методов исследования сложных систем и процессов Института информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН, Scopus ID: 6505916110, ORCID: 0000-0002-2889-0864, РИНЦ Author ID: 8551.

E-mail: ashabokov.boris@mail.ru

Федченко Людмила Михайловна, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник Высокогорного геофизического института, Scopus ID: 6602297635, ORCID: 0000-0003-2104-6289, РИНЦ Author ID: 59651.

E-mail: fedchenkolm@mail.ru

Ташилова Алла Амарбиевна, доктор физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела физики облаков Высокогорного геофизического института, Scopus ID: 57191577384. E-mail: tashilovaa@mail.ru

Кешева Лара Асировна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Высокогорного геофизического института, Scopus ID: 57191577471, ORCID: 0000-0002-5132-1563, РИНЦ Author ID: 706250.

E-mail: kesheva.lara@yandex.ru

Ашабокова Марина Борисовна, младший научный сотрудник Высокогорного геофизического института, ORCID: 0000-0002-5818-256X, РИНЦ Author ID: 822002.

E-mail: ashabokova.marina@rambler.ru

Information about the authors

Boris A. Ashabokov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Cloud Physics, High-Mountain Geophysical Institute; Head of the Department of Mathematical Methods for the Study of Complex Systems and Processes, Institute of Informatics and Regional Management Problems of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the

Russian Academy of Sciences, Scopus ID: 6505916110, ORCID: 0000-0002-2889-0864, RSCI Author ID: 8551.

E-mail: ashabokov.boris@mail.ru

Lyudmila M. Fedchenko, Doctor of Geography, Professor, Chief Researcher, High Mountain Geophysical Institute, Scopus ID: 6602297635, ORCID: 0000-0003-2104-6289, RSCI Author ID: 59651. E-mail: fedchenkolm@mail.ru

Alla A. Tashilova, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Senior Research Associate, Department of Physics of Clouds, High-Mountain Geophysical Institute, Scopus ID: 57191577384. E-mail: tashilovaa@mail.ru

Lara A. Kesheva, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, High Mountain Geophysical Institute, Scopus ID: 57191577471, ORCID: 0000-0002-5132-1563, RSCI Author ID: 706250. E-mail: kesheva.lara@yandex.ru

Marina B. Ashabokova, Junior Researcher, High Mountain Geophysical Institute, ORCID: 0000-0002-5818-256X, RSCI Author ID: 822002. E-mail: ashabokova.marina@rambler.ru