ISSN 1817-7204 (Print)
ISSN 1817-7239 (Online)

ЗЕМЛЯРОБСТВА І РАСЛІНАВОДСТВА

AGRICULTURE AND PLANT CULTIVATION

УДК [633.1:631.559]:581.1.045(476)
https://doi.org/10.29235/1817-7204-2022-60-3-279-295

Поступила в редакцию 04.02.2022
Received 04.02.2022

А. П. Лихацевич

Институт мелиорации Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

РИСКИ В ЗЕМЛЕДЕЛИИ: ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ НА УРОЖАЙНОСТЬ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В БЕЛОРУССКОМ ПОЛЕСЬЕ

Аннотация. На основе математической модели урожая разработан алгоритм количественной оценки земледельческого риска для сельскохозяйственных культур, возделываемых в конкретных почвенно-климатических условиях. Предложена классификация земледельческих рисков по потерям урожая, подобная градации, принятой при оценке страховых выплат, но более детализированная. Установлено, что количественные показатели земледельческого риска не зависят от уровня питания культуры, а для каждого года определяются только атмосферными осадками и температурами воздуха за активный период вегетации. Выполнены расчеты земледельческого риска для зерновых культур, возделываемых в Белорусском Полесье. Из пяти лет возделывания ячменя один год (2007) по тепло- и влагообеспеченности вегетационного периода можно характеризовать как критический. Потери урожая культуры от неблагоприятных погодных условий превысили 50 %. В 2005 г. получен минимальный риск при возделывании ячменя, относящийся к устойчивому земледелию. Возделывание при погодных условиях 2006 и 2008 гг. характеризуется как земледелие с невысоким риском, а условия 2009 г. следует отнести к высокому риску возделывания ячменя. По среднему показателю рискованности за пять лет исследований, составившему для ячменя 28,6 %, регион по своим погодно-климатическим условиям соответствует земледелию со средним риском. Для озимой тритикале из четырех лет возделывания один год (2007) по тепло- и влагообеспеченности вегетационного периода можно характеризовать как критический. Потери урожая культуры превысили 50 %. В 2008 г. потери урожая соответствовали устойчивому земледелию. Возделывание в 2006 г. для озимой тритикале было высокорискованным, а в 2009 г. – с невысоким риском. В среднем за 4 года показатель рискованности возделывания культуры составил 28,1 %. Следовательно, для озимой тритикале регион Белорусского Полесья по своим погодно-климатическим условиям, как и для ячменя, соответствует земледелию со средним риском.

Ключевые слова: математическое моделирование, земледельческие риски, метеорологические показатели, урожайность, потери урожая, ячмень, озимая тритикале

Для цитирования: Лихацевич, П. А. Риски в земледелии: оценка влияния погодных условий на урожайность зерновых культур в Белорусском Полесье / А. П. Лихацевич // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2022. – Т. 60, № 3. – С. 279–295. https://doi.org/10.29235/1817-7204-2022-60-3-279-295

Anatoly P. Likhatsevich

Institute of Land Reclamation of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

RISKS IN AGRICULTURE: ASSESSMENT OF INFLUENCE OF WEATHER CONDITIONS ON THE GRAIN CROPS YIELD IN BELARUSIAN POLESYE

Abstract. Based on the mathematical model of the crop, an algorithm for quantitative assessment of the agricultural risk for crops cultivated in specific soil and climatic conditions has been developed. Classification of agricultural risks according to crop losses is proposed, similar to the gradation adopted in the assessment of insurance payments, but more detailed. It has been established that quantitative indicators of agricultural risk do not depend on the level of crop nutrition, and for each year are determined only by precipitation and air temperatures during the active growing season. Calculations of agricultural risk for grain crops cultivated in Belarusian Polesye are made. Of the five years of barley cultivation, one year (2007) can be characterized as critical in terms of heat and moisture supply during the growing season. Crop yield losses due to adverse weather conditions exceeded 50 %. In 2005, the minimum risk for the cultivation of barley, related to sustainable farming,

© Лихацевич А. П., 2022

was obtained. Cultivation under weather conditions in 2006 and 2008 characterized as low-risk farming, and 2009 conditions should be attributed to high-risk barley cultivation. According to the average indicator of the risk rate of barley cultivation for five years of research, which amounted to 28.6 %, the region, in terms of its weather and climate conditions, corresponds to agriculture with an average risk. For winter triticale, out of four years of cultivation, one year (2007) can be characterized as critical in terms of heat and moisture supply during the growing season. Crop yield losses exceeded 50 %. In 2008, crop losses were in line with sustainable farming. Cultivation in 2006 for winter triticale was of a high risk, and in 2009 – low risk. On average for 4 years, the indicator of risk rate of cultivation of crops amounted to 28.1%. Consequently, for winter triticale, the region of Belarusian Polesye, in terms of its weather and climatic conditions, as well as for barley, corresponds to agriculture with an average risk.

Key words: mathematical modeling, agricultural risks, meteorological indicators, productivity, crop losses, barley, winter triticale

For citation: Likhatsevich A. P. Risks in agriculture: assessment of influence of weather conditions on the grain crops yield in Belarusian Polesye. *Vestsi Natsyyanal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2022, vol. 60, no. 3, pp. 279–295 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1817-7204-2022-60-3-279-295

Введение. Под производственным риском обычно понимается вероятность возникновения непредусмотренных препятствий, приводящих к снижению объемов производства или к потерям продукции. Для каждой производственной сферы обозначение риска имеет свои особенности. Например, в земледельческой отрасли предложены разные комбинации рисков. Параллельно рассматриваются социально-экономический риск, климатический риск, агроэкологический риск, почвенно-экологический риск, земледельческий риск.

Регионы также представляются разными терминами – «зона рискованного земледелия», «зона критического земледелия». Например, предложено считать, что зона рискованного земледелия – это зона, где традиционное земледелие рискованно в силу климатических особенностей, или зона, для которой характерны частые неурожаи. Встречаются определения, близкие к количественной оценке. Например, предлагается считать земледелие рискованным, когда погодно-климатические условия и качество почвы не гарантируют, что вы вернете себе хотя бы то, что посадили, хотя данная формулировка, на наш взгляд, более подходит к «зоне критического земледелия». Иногда понятия «зона рискованного земледелия» и «зона критического земледелия» считаются синонимами. Терминология в этой области научных знаний, развивающейся на волне ожидания роста негативных последствий от изменений климата, находится пока в стадии становления.

Вполне закономерно, что в различных областях исследований риски оцениваются по-разному. Например, в системе экологического страхования предлагается вводить в страховой договор некое максимально допустимое количество рисков в земледелии, сравнивая с ним потери, возникшие при выращивании конкретной сельскохозяйственной культуры за период хозяйственной деятельности [1]. При определении страховых выплат предложена следующая градация рисков и земледельческих потерь: минимальный (потери урожая до 25 %), повышенный (потери урожая от 25 до 50 %), критический (потери урожая от 50 до 75 %), недопустимый (потери урожая свыше 75 %) [2]. В аграрном производстве под земледельческим риском обычно понимают потери, вызванные погодно-климатическими факторами. Для их количественной оценки используют результаты анализа колебаний урожаев сельскохозяйственных культур в зонах возделывания в зависимости от изменяющихся погодных условий.

Особенно актуальна количественная оценка рисков, вызванных погодно-климатическими факторами для сельскохозяйственного производства Беларуси, территория которой входит в зону так называемого неустойчивого земледелия. Более того, для полного решения проблемы продовольственной независимости в условиях республики учет влияния неблагоприятных погодных условий играет порой определяющую роль, наравне с совершенствованием экономических механизмов управления сельскохозяйственным производством [3, с. 88].

Варианты оценки земледельческого риска. Одна из первых теоретически обосновываемых концепций оценки земледельческого риска развивается в работах Агрофизического института (АФИ, Санкт-Петербург). В данной концепции оценка ожидаемых колебаний урожаев сельскохозяйственных культур и их связь с различными агроклиматическими показателями базируется

на вероятностных представлениях влияния изменений климата на продуктивность сельскохозяйственных земель [4, 5]. Поскольку климатозависимые факторы земледелия подчиняются определенным вероятностным закономерностям, для их анализа предложено использовать вероятностно-статистический подход. Земледельческий риск рассматривается как вероятность или климатическая повторяемость хозяйственных потерь, превосходящих некоторый критический уровень. Как и в системе экологического страхования [1], исходя из хозяйственных соображений, устанавливается некая «критически низкая урожайность» и в сравнении с ней определяется повторяемость хозяйственных потерь при урожаях ниже критического уровня. Количественная оценка влияния изменений климата базируется на сопоставлении кривых плотности распределения урожаев при современных и ожидаемых климатических условиях. Для получения конкретных численных оценок земледельческого риска принято, что распределение урожаев в многолетии является нормальным. Результаты такого анализа показывают, что при ухудшении климатических условий помимо снижения среднего за многолетие урожая повышается повторяемость неблагоприятных лет с низкими урожаями [4, 5].

Широкого применения вероятностная концепция оценки земледельческого риска пока не получила. Более того, ее авторы признают, что подобный подход имеет в значительной степени гипотетический характер [5]. Поэтому и общий вывод базируется только на теоретических представлениях о результатах сельскохозяйственного производства, а для снижения земледельческого риска рекомендуется искать эффективные пути повышения среднего многолетнего урожая путем снижения среднеквадратического отклонения [5, 6]. В производственном плане для снижения риска предлагается использовать известные перспективные направления развития земледелия – селекцию новых высокопластичных сортов, обеспечивающих получение стабильных урожаев в широком диапазоне варьирования факторов окружающей среды, и внедрение в производство информационных технологий точного земледелия [5, 7].

В рамках вероятностной концепции в АФИ разработана методика оценки климатических рисков путем генерирования случайных величин (метод Монте-Карло), в качестве которых выступают средние месячные температуры воздуха и месячные суммы осадков. Причем в качестве множества показателей, производных от основных, могут выступать любые характеристики агроклиматических ресурсов или климатического риска, показатели продуктивности агроландшафтов и территорий, допускающие вычисление по средним месячным данным. Используются известные эмпирические модели расчета этих показателей для современного и будущего климата с учетом сценариев его изменения [8], то есть данная методика также базируется на гипотетических сценариях изменений климата.

Методика количественной оценки агроэкологических рисков, представленная Вычислительным центром им. А. А. Дородницына (ФИЦ «Информатика и управление» РАН, Москва) и Всероссийским институтом аграрных проблем и информатики им. А. А. Никонова (Москва), более конкретна и базируется на результатах анализа состояния земельных и трудовых ресурсов, основных и оборотных фондов предприятий. Количественная оценка риска при производстве сельскохозяйственной продукции приравнивается к коэффициенту вариации среднего квадратического отклонения количества производимой продукции от ее среднего значения. Для анализа зависимости «ресурсы – выпуск продукции» используется производственная функция Кобба-Дугласа, которая позволяет определить тенденцию, за счет каких источников возможен рост результативного показателя (эффективности производства) и каково влияние на него каждого из факторов [9].

Для приближения полученных результатов анализа к конкретным условиям статистический метод, основанный на функции Кобба-Дугласа, предлагается дополнять методом экспертных оценок [9]. Но использование экспертных (субъективных) мнений при оценке земледельческого риска с целью повышения его достоверности указывает на несовершенство данной методики. Не случайно во избежание неточности в каких-либо частных рекомендациях земледельческий риск предлагается авторами компенсировать технологиями точного земледелия. Как видим, данный вывод может быть сформулирован любым экспертом и без численных обоснований.

Еще один подход в оценке земледельческого риска основан на анализе биоклиматического потенциала продуктивности территории, получаемых хозяйственных урожаев и средних многолетних агроклиматических показателей (сумм атмосферных осадков и среднесуточных температур воздуха) [10–12]. Обоснование данной концепции приводится в работах Главной геофизической обсерватории им. В. А. Воейкова и Всероссийского научно-исследовательского института сельскохозяйственной метеорологии (ВНИИСХМ) [11, 12]. Главным элементом концепции является технология мониторинга климата и агроклиматических ресурсов с использованием имитационной системы «Климат – Почва – Урожай», разработанной под руководством О. Д. Сиротенко [12, 13].

Основу имитационной системы «Климат – Почва – Урожай» составляет динамическая модель продукционного процесса и водно-теплового режима агроценоза «Почва – Урожай» [13, 14]. В качестве входной информации используются данные сетевых метеорологических и агрометеорологических наблюдений, а также данные о водно-физических свойствах почвы и уровне ее плодородия. Модель позволяет вести расчет/прогноз динамики накопления фитомассы посева, включая ее продуктивную часть (урожай), а также основных составляющих водного баланса почвы и запасов почвенной влаги [12].

Авторами модели используется понятие «климатический риск» [12], определяемый как функция повторяемости опасных гидрометеорологических явлений разового характера (заморозки, переувлажнения почвы, засухи, вымерзания, выпревания, вымокания и др.), существенно снижающих урожай, и текущей уязвимости сельскохозяйственного производства на конкретной территории, зависящей от погодно-климатических условий. Для количественной оценки предложена расчетная формула

$$R = PV, \tag{1}$$

где R – климатический риск, %; P – вероятность опасного метеорологического явления, %; V – уязвимость сельскохозяйственного производства на конкретной территории, б/р.

При оценке вероятности опасных метеорологических явлений авторами принято, что по своим отрицательным последствиям в сравнении с другими стихийными бедствиями для главных сельскохозяйственных регионов России наиболее опасны засухи. Было установлено, что среди множества показателей, характеризующих засуху, с урожайностью наиболее тесно коррелирует гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова (ГТК) [15–17].

Уязвимость территории (V) предложено определять как функцию от соотношения среднемноголетней урожайности сельскохозяйственной культуры и биоклиматического потенциала территории [12]

$$V = 1 - \frac{Y}{BCP}, \tag{2}$$

где Y – средняя урожайность зерновой культуры за рассматриваемый период, ц/га; BCP – биоклиматический потенциал территории, ц/га.

При расчете BCP с помощью имитационной системы «Климат – Почва – Урожай» учитывается метеорологическая и агрометеорологическая информация, включающая данные сетевых метеонаблюдений: температуру воздуха, сумму осадков, продолжительность солнечного сияния и дефицит влажности воздуха [12]. При организации системы научно обоснованного управления сельскохозяйственной отраслью основными показателями экономической эффективности любой аграрной технологии считаются достигнутая продуктивность, прямые затраты труда, производственная и полная себестоимость, уровень хозяйственной рентабельности [18]. Для приближенной оценки эффективности управления земледельческими рисками допускается использовать только один обобщающий показатель – урожайность культур [10–14].

Составляющие земледельческого риска. Очевидно, что в современных региональных системах земледелия от достоверности количественной оценки климатических рисков зависит эффективность управления растениеводством в регионе. Из представленных выше вариантов

к такой оценке наиболее близки предложения сотрудников Главной геофизической обсерватории им. В. А. Воейкова и ВНИИСХМ, сконцентрированные в формулах (1) и (2).

Однако в предложенных эвристических формулах (1) и (2) заложена неточность, проявляющаяся только при проведении вычислений. Согласно (1) вероятность опасного метеорологического явления не связана со средней урожайностью за рассматриваемый период, что не соответствует действительности. Игнорирование данной связи приводит к тому, что при довольно высокой вероятности опасного метеорологического явления (P = 50 %) и при уязвимости сельскохозяйственного производства, равной V = 0,5, получаем пониженный климатический риск (всего R = 25 %), что противоречит логике соотношения вероятностных величин. И как следствие, при вероятности опасного метеорологического явления P = 100 % из формулы (1) получаем, что эта опасность вообще не влияет на климатический риск, который всегда будет равен только уязвимости сельскохозяйственного производства.

Как видим, формулы (1) и (2) для определения климатического риска непригодны. Более адекватным выражением климатического риска (R) по данной методике будет формула

$$R = \left[100 - \frac{Y_{\text{ср}}(100 - P)}{BCP}\right] = \left[1 - \frac{Y_{\text{ср}}(1 - 0{,}01P)}{BCP}\right]100\ \%, \tag{3}$$

где $Y_{\text{ср}}$ – средняя урожайность культуры за рассматриваемый период, не учитывающая опасных метеорологических явлений, ц/га.

Фактически полученная урожайность (годовая или средняя за многолетие) учитывает все урожаеобразующие (и урожаеснижающие) факторы, в том числе и редкие опасные метеорологические явления, т. е.

$$Y = Y_{\text{ср}}(1 - 0{,}01P). \tag{4}$$

Согласно (3) и (4) мы утверждаем, что опасное метеорологическое явление влияет непосредственно на урожай сельскохозяйственной культуры, а не на так называемую уязвимость сельскохозяйственного производства (2).

Основная сложность использования формул (3) и (4) при расчете климатического риска состоит в определении урожайности ($Y_{\text{ср}}$, Y). Согласно представленным выше концепциям для оценки климатического, агроэкологического и земледельческого рисков используется либо некая условная (прогнозная) урожайность, либо урожайность культуры хозяйственная (фактически полученная), средняя за рассматриваемый период. Но в подобных оценках остаются «за кадром» важнейшие урожаеобразующие факторы – плодородие почвы, качество семенного материала и почвенного покрова, техника и технологии земледелия и др.

Очевидно, что для полной оценки земледельческого риска необходим учет всех факторов, влияющих на урожай [19]. Учитывая большое количество таких факторов, авторы предлагают конкретизировать задачу и источники всех рисков в сельскохозяйственном производстве разделить на три большие группы: *природно-климатические, рыночно-конъюнктурные и организационно-производственные*. Обоснованно утверждается, что каждая из этих групп характеризуется целым комплексом присущих именно ей показателей неопределенности, значительно усложняющих проблему управляемости сельскохозяйственным производством [7].

Таким образом, приходим к выводу, что на данном этапе мы пока не можем в полном объеме количественно учесть все факторы, отрицательно влияющие на сельское хозяйство. Поэтому рассмотрим только одну группу показателей, характеризующих земледельческий риск, – *погодно-климатические условия*. Повторим, что помимо них величина урожая сельскохозяйственной культуры существенно зависит также от региональных особенностей и уровня организации сельскохозяйственного производства, исходного почвенного плодородия, качества семенного материала, наличия в почве необходимых растениям макро- и микроэлементов, фитосанитарных условий вегетации. К этому можно добавить также соответствие технологий возделывания требованиям агротехники и другие ограничения.

Например, при отсутствии должной культуры земледелия риск в получении планируемого урожая закономерно возрастает. Появляется и начинает значительно влиять человеческий фактор. Однако отметим, что при отсутствии должной культуры земледелия его рискованность в большей степени зависит не от климата, а от *организационно-производственных условий*. Поэтому речь будем вести только о высокой культуре земледелия, которая характеризуется полным соответствием техники и технологий возделывания культур научно обоснованным регламентам.

Оценка погодно-климатического риска в земледелии с использованием математической модели урожая. Подойдем к оценке земледельческого риска с несколько другой стороны. Рассмотрим систему «среда обитания растений – урожай сельскохозяйственной культуры». Согласно общим представлениям на формирование урожая в конкретном году влияют так называемые урожаеобразующие факторы – питание растений, погодные и фитосанитарные условия (болезни, сорняки) [20]. Управление всеми урожаеобразующими факторами возможно только в условиях закрытого грунта. В открытом грунте можно активно управлять только уровнем питания, влагообеспеченностью растений, защитой их от болезней и сорняков.

Конкретизируем задачу. В Беларуси установлено, что помимо создания благоприятной фитосанитарной обстановки величину урожая в наибольшей степени определяет уровень питания растений, а разброс по годам урожайности сельскохозяйственных культур при одних и тех же дозах удобрений является следствием различий во влаго- и теплообеспеченности вегетационных периодов в разные годы [21]. Именно этот разброс является показателем реакции сельскохозяйственной культуры на погодно-климатические условия, определяющие климатический и агроэкологический риски и в целом рискованность земледелия.

Но чем же рискованное земледелие отличается, с одной стороны, от земледелия без риска, а с другой – от критического земледелия? Нет сомнений, что риск в получении ожидаемого результата в земледелии по причине стохастичности погодных условий есть всегда, даже при полном соблюдении рекомендуемых научно обоснованных технологических регламентов возделывания сельскохозяйственных культур. Попробуем оценить этот риск количественно.

На наш взгляд, такую оценку наиболее просто и достаточно точно можно выполнить с использованием статистической математической модели урожая [21]. Согласно данной модели земледельческий риск можно оценивать ежегодно по фактически полученному урожаю сельскохозяйственной культуры, сравнивая его с возможным урожаем, соответствующим оптимальному сочетанию погодно-климатических факторов. Причиной ежегодного риска является обусловленный влаго- и теплообеспеченностью вегетационного периода недобор урожая конкретной сельскохозяйственной культуры. Именно эти потери урожая являются ключевыми при оценке земледельческого риска.

Математическая модель урожая апробирована нами по результатам многолетних полевых исследований профессора Н. Н. Семененко на осушенных землях Полесской опытной станции мелиоративного земледелия и луговодства (ПОМС), которые включали семь вариантов с разными дозами удобрений (NPK) под ячмень сорта Дивосный и девять вариантов с разными дозами NPK под озимую тритикале сорта Михась [22].

В опыте профессора Н. Н. Семененко, который проводился в верховье осушительно-увлажнительной мелиоративной системы ПОМС, в полной мере регулировался только один фактор – *питание растений* (NPK). Фактор влаги регулировался частично через осушение (сброс избытка влаги в весенне-посевной период). Дополнительная к атмосферным осадкам подача влаги в засушливые периоды вегетации в опыте отсутствовала из-за невозможности технологического осуществления данной операции при имеющейся конструкции мелиоративной системы. Поэтому в период вегетации на опытных полях складывался практически промывной водный режим, характерный для автоморфных почв Беларуси.

В таких условиях основной характеристикой обеспеченности культуры влагой в течение вегетации являются только выпадающие атмосферные осадки (S, мм). Данный вывод, как и возможность представления теплового фактора через максимальную температуру воздуха ($T_{max(ср)}$, °C), среднюю за выбранный расчетный период, подтвержден результатами выполненной апробации

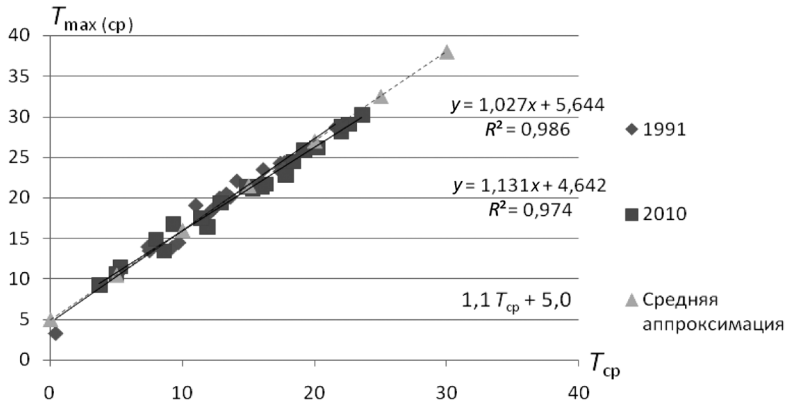


Рис. 1. Взаимосвязь между среднедекадными температурами воздуха и средними за декаду максимальными суточными температурами (апрель – октябрь) по данным метеостанции Полесская

Fig. 1. Correlation between average ten-day air temperatures and average maximum daily temperatures per ten days (April – October) according to the Polesskaya meteorological station

математической модели урожая по данным опыта Н. Н. Семененко с ячменем и озимой тритикале [22, 23]. На рис. 1 приведено сравнение среднедекадных температур воздуха со средними за декаду максимальными суточными температурами для жаркого (1991) и холодного вегетационных периодов (2010) по данным метеостанции Полесская, рядом с которой проводились опыты Н. Н. Семененко.

Как видим, между этими температурами существует достаточно тесная линейная зависимость

$$T_{max(ср)} = 5{,}0 + T_{ср},$$

где $T_{max(ср)}$ – средние за декаду максимальные суточные температуры воздуха, °С; $T_{ср}$ – среднедекадные температуры воздуха, °С.

В математической модели урожая использованы данные влаго- и теплообеспеченности за активный период вегетации [21, 23]. Для зерновых культур на органогенных почвах Белорусского Полесья такой период продолжается с мая по июль включительно. Справедливость данного предположения подтверждена высокими характеристиками связи урожая ячменя с влаго- и теплообеспеченностью указанного периода (рис. 2, 3). На вариантах с разными дозами азотных удобрений коэффициенты детерминации зависимости урожая ячменя от сумм атмосферных осадков и от температур воздуха за май – июль близки к возможному максимуму (рис. 2).

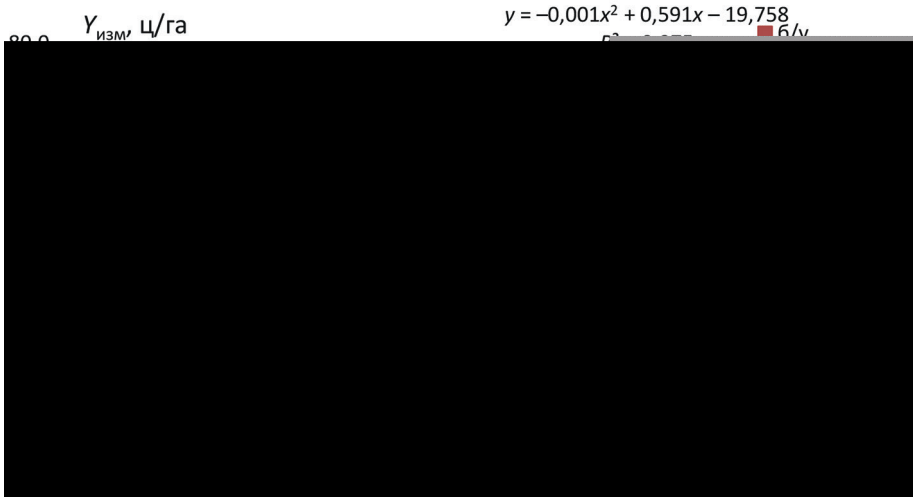


Рис. 2. Зависимость урожаев ячменя от суммы атмосферных осадков за май – июль

Fig. 2. Dependence of barley yields on the amount of precipitation for May – July

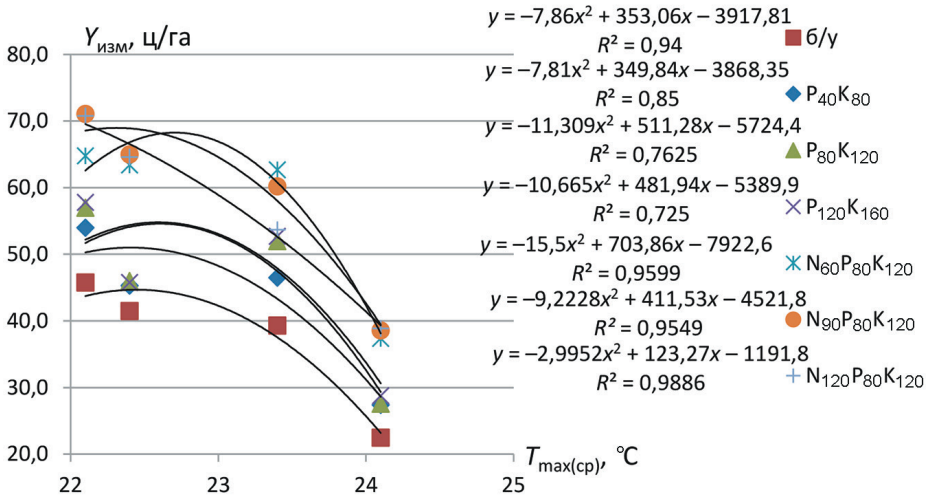


Рис. 3. Зависимость урожаев ячменя от средней за май – июль максимальной суточной температуры воздуха

Fig. 3. Dependence of barley yields on the average for May – July maximum daily air temperature

На вариантах без внесения азота эта связь несколько слабее, но также достаточно весома. Причем весьма показательна отрицательная реакция ячменя на повышенные температуры воздуха (рис. 3).

Как было отмечено выше, риски при возделывании любой сельскохозяйственной культуры соответствуют ущербу (недобору урожая), вызванному несоответствием погодно-климатических условий оптимальному для растений сочетанию влаго- и теплообеспеченности вегетационного периода. Для оценки этих недоборов выберем некие критериальные урожайные данные, чтобы сравнивать их с фактическими урожаями, полученными в опыте. Очевидно, что в качестве критерия нельзя использовать результаты, полученные в конкретном году. Например, если брать данные самого урожайного года, то не исключено, что в каком-то году они будут превышены. И наоборот, если в качестве критериальных брать данные наименее урожайного года, то также нельзя гарантировать, что во многолетии не встретится еще более неурожайный год.

Оценив различные варианты для сравнения урожаев, считаем, что единственно правильным будет использование в качестве критерия того урожая, который соответствует результатам конкретного опыта при заданных (*i*-х) дозах NPK и может быть получен только при оптимальном сочетании показателей влаго- и теплообеспеченности в период вегетации. Результаты такого сравнения приведены в табл. 1 и 2.

Выбранный нами критериальный урожай подобен биоклиматическому потенциалу территории, но является не отвлеченным показателем для всех культур, а характеризует конкретную культуру, возделываемую в конкретных условиях.

В качестве расчетной математической модели урожая используем ее простейший вариант – параболическую функцию [21]

$$\frac{Y_i}{Y_{n(\max)}} = \prod_{i=1}^{n}\left[1 - a_i\left(\frac{R_{i(\text{opt})} - R_i}{R_{i(\text{opt})} - R_{i(\min/\max)}}\right)^2\right], \quad (5)$$

где Y_i – фактический урожай; $Y_{n(\max)}$ – максимум урожая при оптимальном сочетании всех учитываемых n-х факторов (пищи, влаги и тепла); n – количество учитываемых факторов; a_i – безразмерная константа, характеризующая изменение Y под воздействием i-го фактора среды; $R_{i(\text{opt})}$ – оптимальное значение i-го фактора среды, при котором достигается максимум урожая; R_i – фактическое значение i-го фактора урожая; $R_{i(\min/\max)}$ – минимальное или максимальное значение i-го фактора среды, при которых урожай перестает формироваться.

Таблица 1. **Влияние удобрений и погодных условий на урожайность ячменя [22, табл. 1.12, с. 147]**
Table 1. **The effect of fertilizers and weather conditions on the yield of barley [22, table 1.12, p. 147]**

Данные полевого опыта						Расчет			
Годы	Дозы NPK	Сумма вносимых NPK, кг д. в/га	Урожай ($Y_{изм}$), ц/га	Атмосферные осадки, сумма за май – июль, мм	Максимальная суточная температура воздуха, средняя за май – июль, °С	$Y_{расч}$, ц/га	$(Y_{расч} - Y_{изм})^2$	$Y_{i(S_{opt}, T_{opt})}$	R_i, %
2005	б/у	0	41,5	193	22,4	41,2	0,1	48,1	14,4
	$P_{40}K_{80}$	120	45,3	193	22,4	53,6	68,4	62,6	14,4
	$P_{40}K_{80} + N_{60}$	180	58,0	193	22,4	58,4	0,2	68,2	14,4
	$P_{40}K_{80} + N_{90}$	210	62,5	193	22,4	60,5	4,1	70,7	14,4
	$P_{40}K_{80} + N_{120}$	240	64,5	193	22,4	62,3	4,7	72,8	14,4
	$P_{80}K_{120} + N_{60}$	260	63,4	193	22,4	63,4	0,0	74,1	14,4
	$P_{80}K_{120} + N_{90}$	290	65,0	193	22,4	64,9	0,0	75,8	14,4
	$P_{80}K_{120} + N_{120}$	320	64,6	193	22,4	66,2	2,5	77,3	14,4
	$P_{120}K_{160} + N_{60}$	340	62,2	193	22,4	66,9	21,9	78,1	14,4
	$P_{120}K_{160} + N_{90}$	370	68,9	193	22,4	67,7	1,3	79,1	14,4
	$P_{120}K_{160} + N_{120}$	400	69,4	193	22,4	68,4	1,0	79,9	14,4
2006	б/у	0	39,3	151	23,4	37,9	1,9	68,2	21,1
	$P_{40}K_{80}$	120	46,5	151	23,4	49,3	8,1	70,7	21,1
	$P_{80}K_{120}$	200	52,0	151	23,4	55,1	9,6	72,8	21,1
	$P_{40}K_{80} + N_{60}$	180	57,5	151	23,4	53,8	13,7	74,1	21,1
	$P_{40}K_{80} + N_{90}$	210	58,5	151	23,4	55,7	7,8	75,8	21,1
	$P_{40}K_{80} + N_{120}$	240	61,4	151	23,4	57,4	15,9	77,3	21,1
	$P_{80}K_{120} + N_{60}$	260	62,7	151	23,4	58,4	18,2	78,1	21,1
	$P_{80}K_{120} + N_{90}$	290	60,2	151	23,4	59,8	0,2	79,1	21,1
	$P_{80}K_{120} + N_{120}$	320	53,7	151	23,4	60,9	52,5	79,9	21,1
	$P_{120}K_{160} + N_{60}$	340	61,4	151	23,4	61,6	0,0	48,1	21,1
	$P_{120}K_{160} + N_{90}$	370	62,2	151	23,4	62,4	0,0	62,6	21,1
	$P_{120}K_{160} + N_{120}$	400	59,5	151	23,4	63,0	12,2	69,9	21,1
2007	б/у	0	22,5	344	24,1	22,5	0,0	68,2	53,2
	$P_{40}K_{80}$	120	27,4	344	24,1	29,3	3,5	70,7	53,2
	$P_{80}K_{120}$	200	27,6	344	24,1	32,7	25,9	72,8	53,2
	$P_{40}K_{80} + N_{60}$	180	33,6	344	24,1	31,9	2,8	74,1	53,2
	$P_{40}K_{80} + N_{90}$	210	34,4	344	24,1	33,1	1,8	75,8	53,2
	$P_{40}K_{80} + N_{120}$	240	36,9	344	24,1	34,1	8,0	77,3	53,2
	$P_{80}K_{120} + N_{60}$	260	37,4	344	24,1	34,7	7,4	78,1	53,2
	$P_{80}K_{120} + N_{90}$	290	38,6	344	24,1	35,5	9,7	79,1	53,2
	$P_{80}K_{120} + N_{120}$	320	38,9	344	24,1	36,2	7,5	79,9	53,2
	$P_{120}K_{160} + N_{60}$	340	36,4	344	24,1	36,6	0,0	48,1	53,2
	$P_{120}K_{160} + N_{90}$	370	38,4	344	24,1	37,0	1,9	62,6	53,2
	$P_{120}K_{160} + N_{120}$	400	39,6	344	24,1	37,4	4,9	69,9	53,2
2008	б/у	0	45,8	230	22,1	40,8	24,6	74,1	15,1
	$P_{40}K_{80}$	120	54,0	230	22,1	53,1	0,7	75,8	15,1
	$P_{80}K_{120}$	200	57,0	230	22,1	59,3	5,5	77,3	15,1
	$P_{80}K_{120} + N_{60}$	260	64,8	230	22,1	62,9	3,5	48,1	15,1
	$P_{80}K_{120} + N_{90}$	290	71,1	230	22,1	64,4	44,9	69,9	15,1
	$P_{80}K_{120} + N_{120}$	320	70,8	230	22,1	65,6	26,6	74,1	15,1
2009	б/у	0	28,0	316	22,4	29,1	1,3	75,8	39,4
	$P_{80}K_{120}$	200	34,7	316	22,4	42,4	58,6	77,3	39,4
	$P_{80}K_{120} + N_{60}$	260	42,0	316	22,4	44,9	8,5	74,1	39,4
	$P_{80}K_{120} + N_{90}$	290	43,4	316	22,4	46,0	6,6	75,8	39,4
	$P_{80}K_{120} + N_{120}$	320	42,1	316	22,4	46,9	22,6	77,3	39,4
2005–2009 Ошибка опыта ($НСР_{05}$), ц/га						**2,0–2,9**			
2005–2009 Ошибка расчета (δ), ц/га						**3,4**			

Таблица 2. **Влияние удобрений и погодных условий на урожайность озимой тритикале [22, табл. 1.13, с. 148]**

Table 2. **The effect of fertilizers and weather conditions on the yield of winter triticale [22, table 1.13, p. 148]**

Данные полевого опыта						Расчет			
Годы	Дозы NPK	Сумма вносимых NPK, кг д. в/га	Урожай ($Y_{изм}$), ц/га	Атмосферные осадки, сумма за май – июль, мм	Максимальная суточная температура воздуха, средняя за май – июль, °С	$Y_{расч}$, ц/га	$(Y_{расч} - Y_{изм})^2$	$Y_{i(S_{opt}, T_{opt})}$	R_i, %
2006	б/у	0	28,4	151	23,4	28,4	0,0	44,7	36,4
	$P_{40}K_{80}$	120	29,6	151	23,4	34,6	25,1	54,4	36,4
	$P_{80}K_{120}$	200	33,4	151	23,4	38,2	22,9	60,0	36,4
	$P_{120}K_{160}$	280	38,2	151	23,4	41,3	9,8	65,0	36,4
	$P_{80} + N_{90}$	170	38,9	151	23,4	36,9	4,0	58,0	36,4
	$K_{120} + N_{90}$	210	41,9	151	23,4	38,6	10,9	60,7	36,4
	$P_{80}K_{120} + N_{60}$	260	40,8	151	23,4	40,6	0,0	63,8	36,4
	$P_{80}K_{120} + N_{90}$	290	43,8	151	23,4	41,7	4,5	65,6	36,4
	$P_{80}K_{120} + N_{120}$	320	48,8	151	23,4	42,7	36,8	67,2	36,4
2007	б/у	0	25,3	344	24,1	21,9	11,7	44,7	51,1
	$P_{40}K_{80}$	120	28,1	344	24,1	26,6	2,1	54,4	51,1
	$P_{80}K_{120}$	200	28,9	344	24,1	29,4	0,2	60,0	51,1
	$P_{120}K_{160}$	280	27,7	344	24,1	31,8	16,8	65,0	51,1
	$P_{80} + N_{90}$	170	27,8	344	24,1	28,4	0,4	58,0	51,1
	$K_{120} + N_{90}$	210	29,1	344	24,1	29,7	0,4	60,7	51,1
	$P_{80}K_{120} + N_{60}$	260	29,4	344	24,1	31,2	3,3	63,8	51,1
	$P_{80}K_{120} + N_{90}$	290	33,0	344	24,1	32,1	0,8	65,6	51,1
	$P_{80}K_{120} + N_{120}$	320	34,1	344	24,1	32,9	1,5	67,2	51,1
2008	б/у	0	46,9	230	22,1	44,3	6,9	44,7	1,0
	$P_{40}K_{80}$	120	54,3	230	22,1	53,9	0,2	54,4	1,0
	$P_{80}K_{120}$	200	56,2	230	22,1	59,4	10,5	60,0	1,0
	$P_{120}K_{160}$	280	57,4	230	22,1	64,3	48,1	65,0	1,0
	$P_{80} + N_{90}$	170	57,1	230	22,1	57,4	0,1	58,0	1,0
	$K_{120} + N_{90}$	210	60,3	230	22,1	60,1	0,0	60,7	1,0
	$P_{80}K_{120} + N_{60}$	260	65,3	230	22,1	63,2	4,5	63,8	1,0
	$P_{80}K_{120} + N_{90}$	290	68,3	230	22,1	64,9	11,6	65,6	1,0
	$P_{80}K_{120} + N_{120}$	320	67,0	230	22,1	66,5	0,2	67,2	1,0
2009	б/у	0	34,0	316	22,4	34,1	0,0	44,7	23,8
	$P_{40}K_{80}$	120	40,3	316	22,4	41,5	1,4	54,4	23,8
	$P_{80}K_{120}$	200	45,4	316	22,4	45,8	0,1	60,0	23,8
	$P_{120}K_{160}$	280	45,0	316	22,4	49,5	20,6	65,0	23,8
	$P_{80} + N_{90}$	170	47,4	316	22,4	44,2	10,1	58,0	23,8
	$K_{120} + N_{90}$	210	48,6	316	22,4	46,3	5,4	60,7	23,8
	$P_{80}K_{120} + N_{60}$	260	50,0	316	22,4	48,6	1,8	63,8	23,8
	$P_{80}K_{120} + N_{90}$	290	50,6	316	22,4	50,0	0,4	65,6	23,8
	$P_{80}K_{120} + N_{120}$	320	51,3	316	22,4	51,2	0,0	67,2	23,8
2006–2009 Ошибка опыта ($НСР_{05}$), ц/га						**1,8–3,3**			
2006–2009 Ошибка расчета (δ), ц/га						**2,8**			

При учете трех основных факторов формирования урожая (пищи, влаги и тепла) формулу (5) можно представить (при $a_i = 1{,}0$) как

$$\frac{Y_i}{Y_{\max}} = \left[1 - \left(\frac{\mathrm{NPK}_{\mathrm{opt}} - \mathrm{NPK}_i}{\mathrm{NPK}_{\mathrm{opt}} - \mathrm{NPK}_{\min}}\right)^2\right]\left[1 - \left(\frac{S_{\mathrm{opt}} - S_i}{S_{\mathrm{opt}} - S_{\min/\max}}\right)^2\right]\left[1 - \left(\frac{T_{\mathrm{opt}} - T_i}{T_{\mathrm{opt}} - T_{\min/\max}}\right)^2\right], \quad (6)$$

где $\mathrm{NPK}_{\mathrm{opt}}$, S_{opt}, T_{opt} – оптимальные значения соответственно доз удобрений, суммы атмосферных осадков и средних за выделенный период вегетации максимальных температур воздуха, при которых достигается максимум урожая; NPK_i, S_i, T_i – фактические значения соответственно доз удобрений, суммы атмосферных осадков и средних за выделенный период вегетации максимальных температур воздуха; $\mathrm{NPK}_{\min}$, $S_{\min/\max}$, $T_{\min/\max}$ – значения перечисленных выше факторов среды соответственно, при которых урожай перестает формироваться и погибает.

Согласно данным, полученным в опыте Н. Н. Семененко, зависимость (6) справедлива при колебании урожая в пределах $0{,}3Y_{\max} < Y_i \leq Y_{\max}$.

При заданных по вариантам опыта (i-х) дозах удобрений и оптимальном сочетании показателей влаго- и теплообеспеченности формула (6) приводится к виду

$$Y_{(S_{\mathrm{opt}},\, T_{\mathrm{opt}})i} = Y_{\max}\left[1 - \left(\frac{\mathrm{NPK}_{\mathrm{opt}} - \mathrm{NPK}_i}{\mathrm{NPK}_{\mathrm{opt}} - \mathrm{NPK}_{\min}}\right)^2\right], \quad (7)$$

где $Y(S_{\mathrm{opt}}, T_{\mathrm{opt}})_i$ – урожай, полученный при i-х дозах удобрений и оптимальном значении суммы атмосферных осадков и температур воздуха.

Заметим, что среднеквадратическое (стандартное) отклонение рассчитанных по формуле (6) и фактически полученных в опыте урожаев ячменя составило всего 3,4 ц/га, что не более чем

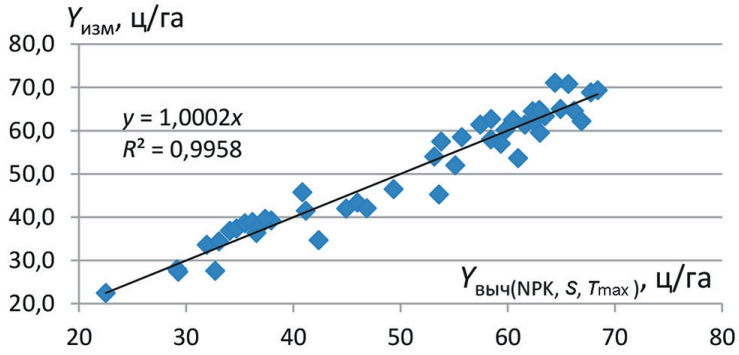


Рис. 4. Сравнение вычисленных по формуле (6) и измеренных в поле урожаев ячменя

Fig. 4. Comparison of barley yields calculated by formula (6) and measured in the field

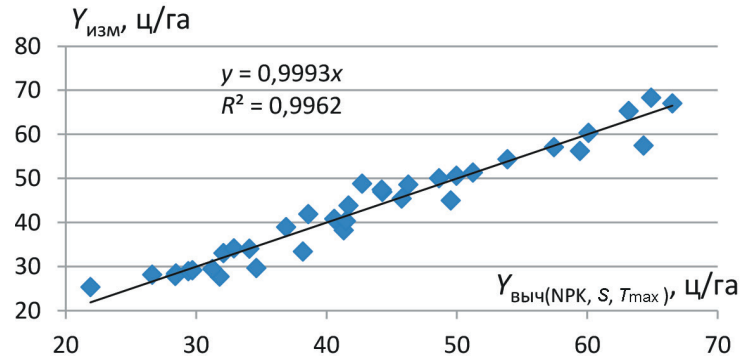


Рис. 5. Сравнение вычисленных по формуле (6) и измеренных в поле урожаев озимой тритикале

Fig. 5. Comparison of yields of winter triticale calculated by formula (6) and measured in the field

Таблица 3. **Опорные показатели модели урожая (6) для зерновых культур на осушенных органогенных почвах Белорусского Полесья**

Table 3. **Reference indicators of the crop model (6) for grain crops on drained organogenic soils of the Belarusian Polesye**

Культура	Y_{max}, ц/га	NPK_{opt}, кг д. в/га	NPK_{min}, кг д. в/га	ΣS_{opt}, мм	ΣS_{max}, мм	$T_{m(opt)}$, °C	$T_{m(max)}$, °C
Ячмень	80,6	470	–270	222	390	24,8	34,8
Озимая тритикале	80,5	820	–410	240	400	21,6	28,0

в полтора раза превышает ошибку полевого опыта (табл. 1), приведенную в монографии Н. Н. Семененко. А для озимой тритикале расчет показал, что ошибка вычислений по (6) примерно равна ошибке полевого опыта.

Графики сравнения результатов расчета урожаев ячменя и озимой тритикале (рис. 4, 5) по опорным показателям модели урожая (табл. 3) с фактическими урожаями (табл. 1, 2) подтверждают высокую точность расчетной модели (6).

Используем полученные опорные показатели модели урожая ячменя и озимой тритикале для установления количественных показателей «рискованности» возделывания данной культуры на осушенных органогенных почвах Белорусского Полесья. Погодно-климатический риск возделывания культуры на i-м варианте опыта (R_i) в заданных условиях выразим в процентах и примем равным

$$R_i = \frac{Y_{i(S_{opt},\, T_{opt})} - Y_i}{Y_{i(S_{opt},\, T_{opt})}} 100\,\% = \left(1 - \frac{Y_i}{Y_{i(S_{opt},\, T_{opt})}}\right) 100\,\%. \qquad (8)$$

Справедливость предлагаемой формулы (8) для оценки погодно-климатического риска возделывания культуры подтвердим следующим логическим построением: при нулевом урожае на i-м варианте опыта получим $R_i = 100$ %, а при получении максимального урожая при оптимальном сочетании суммы атмосферных осадков и максимальных температур воздуха – $Y_i = Y_{i(S_{opt},T_{opt})}$ – земледельческий риск составит $R_i = 0$ %. Данный результат полностью соответствует содержанию термина «погодно-климатический риск возделывания культуры». Формулы (7, 8), используемые при расчете земледельческого риска возделывания культуры, учитывают NPK, доза которых не зависит от погодно-климатических условий.

Предложенный нами алгоритм расчета климатического риска подобен концепции Главной геофизической обсерватории им. В. А. Воейкова и ВНИИСХМ [11, 12]. Принципиальное отличие наших предложений состоит в трех позициях: во-первых, математическая модель урожая для каждой культуры строится по статистическим данным – фактически полученным урожаям, в которых уже учтено опасное метеорологическое явление, если оно имело место; во-вторых, биоклиматический потенциал территории как некий теоретический термин, опосредованно относящийся к конкретной культуре, заменен на урожай данной культуры, полученный при оптимальном сочетании суммы атмосферных осадков и максимальных температур воздуха; в-третьих, формулы (7, 8), используемые при расчете земледельческого риска возделывания культуры, учитывают NPK, дозы которых не зависят от погодно-климатических условий, но от которых зависят прибавки урожая от NPK.

Оценка погодно-климатического (земледельческого) риска возделывания зерновых культур в Белорусском Полесье. Кратко прокомментируем результаты расчета погодно-климатического риска возделывания ячменя и озимой тритикале в Белорусском Полесье (табл. 1 и 2). Отметим, что для обеих культур наиболее урожайным был 2008 г., а наименее урожайным – 2007 г. Причем относительные различия урожаев в эти годы на вариантах с одинаковыми дозами удобрений весьма существенны. Соответствующим образом изменяются и показатели земледельческого риска возделывания этих культур в разные годы. Заметим, что, несмотря на присутствие в расчетных формулах (7) и (8) доз NPK, относительные (8) показатели риска не реагируют на уровень питания культуры, а зависят для каждого года только от атмосферных осадков и температур воздуха.

Из 4–5 лет исследований один год (2007) следует характеризовать как весьма неурожайный. Конечно, оценивать эффективность земледелия в таком году следует исходя из экономических показателей. Без них мы не можем утверждать, окупились затраты на возделывание ячменя и озимой тритикале в 2007 г. полученным урожаем или нет. Однако использование экономических показателей при оценке погодно-климатического риска весьма усложняет методику расчетов.

Попробуем оценить климатический риск без привлечения экономических показателей. В табл. 1 и 2 приведены соотношения прибавок от удобрений и потерь от погодных условий для ячменя и озимой тритикале.

Анализируя полученные результаты, оценим, к какому виду земледелия следует относить возделывание ячменя и озимой тритикале в зоне Белорусского Полесья. Но прежде уточним градацию потерь урожая и соответствующих им показателей земледельческого риска. Для этого несколько дополним и детализируем классификацию рисков, опираясь на имеющиеся предложения по страхованию культур [2]:

1) потери урожая до 25 % (минимальный риск) – квазиустойчивое земледелие, включая устойчивое земледелие (потери 0–15 %) и земледелие с невысоким риском (потери 15–25 %);

2) потери урожая от 25 до 50 % (повышенный риск) – рискованное земледелие, включая среднерискованное земледелие (потери 25–33 %) и земледелие с высоким риском (потери 33–50 %);

3) потери урожая от 50 до 75 % (критический риск) – критическое земледелие;

4) потери урожая выше 75 % (недопустимый риск) – неприемлемое земледелие.

Согласно данным таблиц, из пяти лет возделывания ячменя в Белорусском Полесье один год (2007) по тепло- и влагообеспеченности вегетационного периода можно характеризовать как критический, поскольку потери урожая культуры превысили 50 %. Один год (2009) следует отнести к высокому риску возделывания ячменя в зоне Белорусского Полесья. Устойчивое земледелие характерно для 2005 г. Невысоким риском характеризуется 2006 г., средним риском – 2008 г.

Ясно, что общую характеристику региона по климатическому риску следует давать только по результатам анализа распределения тепло- и влагообеспеченности вегетационных периодов сельскохозяйственных культур за многолетие (по так называемым кривым обеспеченности). Но приближенную оценку климатического риска можем дать и по среднему показателю рискованности возделывания ячменя за 5 лет исследований. Согласно данным табл. 1 он составляет 28,6 %. Следовательно, для ячменя регион Белорусского Полесья по своим погодно-климатическим условиям соответствует земледелию со средним риском. Аналогичный анализ выполним для озимой тритикале по данным табл. 2. Из четырех лет возделывания озимой тритикале в Белорусском Полесье один год (2007) по тепло- и влагообеспеченности вегетационного периода можно характеризовать как критический, поскольку потери урожая культуры в этом году также превысили 50 %. В 2008 г. потери урожая соответствовали устойчивому земледелию. Возделывание в 2006 г. для озимой тритикале было высокорискованным, а в 2009 г. – с невысоким риском. В среднем за 4 года показатель рискованности возделывания культуры составил 28,1 %. Следовательно, для озимой тритикале регион Белорусского Полесья по своим погодно-климатическим условиям также соответствует земледелию со средним риском.

В заключение отметим, что механизм управления рисками в аграрном секторе Беларуси, изложенный в [24], можно дополнить и конкретизировать. Для этого на основе представленного выше количественного анализа земледельческих рисков при возделывании конкретных культур в регионах, дополненного показателями оценки распределения за многолетие недоборов урожаев, вызванных погодно-климатическими условиями, целесообразно начать разработку региональных рекомендаций по оптимизации использования сельскохозяйственных земель с учетом изменения климата.

Заключение. Для полного решения проблемы продовольственной независимости Беларуси учет влияния неблагоприятных погодных условий играет роль, сравнимую с совершенствованием экономических механизмов управления сельскохозяйственным производством. При отсутствии должной культуры земледелия его рискованность в большей степени зависит не от климата, а от организационно-производственных условий. Поэтому объективную количественную оценку рискованности земледелия можно производить только при высокой культуре земледелия, которая

характеризуется полным соответствием техники и технологий возделывания сельскохозяйственных культур научно обоснованным регламентам.

Для количественной оценки земледельческих рисков рекомендуется использовать обобщающие показатели – потери урожайности культур, вызванные неустойчивостью погодно-климатических условий, по годам и их распределение за многолетний период.

Предложенный нами алгоритм расчета земледельческого риска основан на математической модели урожая и подобен концепции Главной геофизической обсерватории им. В. А. Воейкова и ВНИИСХМ. Принципиальное отличие наших предложений состоит в трех позициях: 1) алгоритм расчета погодно-климатического риска основан на математической модели урожая; 2) математическая модель урожая для каждой культуры строится по статистическим данным – фактическим урожаям, полученным в полевых исследованиях, проведенных в соответствии с научно обоснованными методиками; 3) биоклиматический потенциал территории как некий теоретический термин, опосредованно относящийся ко всем культурам, заменен на урожай конкретной культуры, получаемый (согласно математической модели урожая) при оптимальном сочетании суммы атмосферных осадков и температур воздуха за период активной вегетации.

Относительные (в %) показатели земледельческого риска не реагируют на уровень питания культуры, а зависят для каждого года только от атмосферных осадков и температур воздуха за активный период вегетации.

Расчеты земледельческих рисков для зерновых культур, возделываемых в Белорусском Полесье, показали, что из пяти лет возделывания ячменя один год (2007) по тепло- и влагообеспеченности вегетационного периода можно характеризовать как критический. Потери урожая культуры от неблагоприятных погодных условий превысили 50 %. В 2005 г. получен минимальный риск, относящийся к устойчивому земледелию. Возделывание при погодных условиях 2006 и 2008 гг. характеризуется как земледелие с невысоким риском, а условия 2009 г. следует отнести к высокому риску возделывания ячменя. По среднему показателю рискованности за пять лет исследований, составившему для ячменя 28,6 %, регион по своим погодно-климатическим условиям соответствует земледелию со средним риском. Для озимой тритикале из четырех лет возделывания один год (2007) по тепло- и влагообеспеченности вегетационного периода можно характеризовать как критический. Потери урожая культуры превысили 50 %. В 2008 г. потери урожая соответствовали устойчивому земледелию. Возделывание в 2006 г. для озимой тритикале было высокорискованным, а в 2009 г. – с невысоким риском. В среднем за 4 года показатель рискованности возделывания культуры составил 28,1 %. Для озимой тритикале регион Белорусского Полесья по своим погодно-климатическим условиям, как и для ячменя, соответствует земледелию со средним риском.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Сельскохозяйственные технологии и продовольственная безопасность» на 2021–2025 годы, подпрограмма «Плодородие почв и защита растений», по заданию «Разработка методики оценки комплексного влияния водно-пищевого режима на урожайность сахарной свеклы».

Acknowledgments. The research has been carried out within the framework of the State Scientific Research Program “Agricultural Technologies and Food Security” for 2021–2025, subprogram “Soil Fertility and Plant Protection”, under assignment “Development of a methodology for assessing the combined impact of water and food regime on the sugar beets yield”.

Список использованных источников

1. Грановская, Л. Н. Научное обоснование системы экологического страхования рисков в зоне орошения / Л. Н. Грановская, Р. А. Киселева // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2018. – Вып. 3 (71). – С. 127–131.

2. Беньковская, Л. В. Совершенствование статистического анализа рисков производства зерна и их страхования : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.12 / Л. В. Беньковская. – Оренбург, 2015. – 206 л.

3. Гусаков, В. Г. Механизм рыночной организации аграрного комплекса: оценка и перспективы / В. Г. Гусаков. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 363 с.

4. Жуковский, Е. Е. Вероятностный анализ влияния изменений климата на потенциал продуктивности агроэкосистем / Е. Е. Жуковский, Г. Г. Бельченко, Т. М. Брунова // Метеорология и гидрология. – 1992. – № 3. – С. 92–103.

5. Якушев, В. П. Анализ рисков – как основа оценки последствий изменений климата в земледелии / В. П. Якушев, Е. Е. Жуковский // Докл. Рос. акад. с.-х. наук. – 2009. – № 5. – С. 54–57.

6. Якушев, В. П. Климатические изменения и риск в земледелии / В. П. Якушев, Е. Е. Жуковский // Вестн. Рос. акад. с.-х. наук. – 2010. – № 2. – С. 13–16.

7. Михайленко, И. М. Точное земледелие как информационно-техническая база современного риск-менеджмента / И. М. Михайленко // Актуальные проблемы регулирования природной и техногенной безопасности в XXI веке : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайн. ситуаций, 19–21 апр. 2005 г. / МЧС России. – М., 2005. – С. 245–247.

8. Насонов, Д. В. Методика и комплекс компьютерных программ оценки динамики агроклиматических рисков земледелия / Д. В. Насонов // Материалы научной сессии Агрофизического института «Современное состояние агрофизики и ее задачи», Санкт-Петербург, 23–24 дек. 2010 г. / Рос. акад. с.-х. наук, Агрофиз. науч.-исслед. ин-т. – СПб., 2011. – С. 16–23.

9. Меденников, В. И. Методика количественной оценки агроэкологических рисков при внедрении точного земледелия / В. И. Меденников, Л. Г. Муратова // Актуальные проблемы экологии и природопользования : сб. ст. по материалам III Всерос. (нац.) науч.-практ. конф., 10 апр. 2019 г. / Кург. гос. с.-х. акад. ; под общ. ред. С. Ф. Сухановой. – Курган, 2019. – С. 199–203.

10. Иванов, А. Л. Глобальное изменение климата и его влияние на сельское хозяйство России / А. Л. Иванов // Земледелие. – 2009. – № 1. – С. 3–5.

11. Павлова, В. Н. Оценка климатических рисков потерь урожая в региональных системах земледелия / В. Н. Павлова, С. Е. Варвачева // Фундам. и приклад. климатология. – 2017. – Т. 3. – С. 122–132. https://doi.org/10.21513/2410-8758-2017-3-122-132

12. Оценка рисков потерь урожая и эффективность управления в современных региональных системах земледелия при наблюдаемых и ожидаемых изменениях климата на примере Калужского региона / В. Н. Павлова [и др.] // Труды регионального конкурса проектов фундаментальных научных исследований / Рос. фонд фундам. исслед., М-во образования и науки Калуж. обл. – Калуга, 2017. – Вып. 22. – С. 207–214.

13. Сиротенко, О. Д. Чувствительность сельского хозяйства России к изменениям климата, химического состава атмосферы и плодородия почв / О. Д. Сиротенко, Е. В. Абашина, В. Н. Павлова // Метеорология и гидрология. – 1995. – № 4. – С. 107–114.

14. Павлова, В. Н. Наблюдаемые изменения климата и динамика продуктивности сельского хозяйства России / В. Н. Павлова, О. Д. Сиротенко // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова / Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – СПб., 2012. – Вып. 565. – С. 132–151.

15. Уланова, Е. С. Засухи в России и их влияние на урожайность зерновых культур / Е. С. Уланова, А. И. Страшная // Труды / Всерос. науч.-исслед. ин-т с.-х. метеорологии. – СПб., 2000. – Вып. 33 : Проблемы мониторинга засух. – С. 64–83.

16. Страшная, А. И. Оперативное агрометеорологическое обеспечение аграрного сектора экономики России в условиях изменения агроклиматических ресурсов / А. И. Страшная, Т. А. Максименкова, О. В. Чуб // Труды / Всерос. науч.-исслед. ин-т с.-х. метеорологии. – СПб., 2013. – Вып. 38 : Агрометеорологическое обеспечение устойчивого развития сельского хозяйства в условиях глобального изменения климата. – С. 21–40.

17. Николаев, М. В. Проявление климатически обусловленных рисков в земледелии и способы смягчения их последствий / М. В. Николаев // Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. – 2013. – Т. 8, № 2. – С. 888–890.

18. Анализ экономической эффективности возделывания яровой пшеницы в системе точного земледелия / В. П. Якушев [и др.] // Агрофизика. – 2016. – № 1. – С. 43–52.

19. Половинкина, Н. В. Агроэкологическая оценка почв как основа для управления почвенно-экологическими рисками (на примере почв сухой степи Волгоградского Заволжья) / Н. В. Половинкина, С. Ю. Розов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17, Почвоведение. – 2017. – № 1. – С. 47–54.

20. Земледелие : учебник / С. А. Воробьев [и др.]. – М. : Агропромиздат, 1991. – 527 с.

21. Лихацевич, А. П. Математическая модель урожая сельскохозяйственных культур / А. П. Лихацевич // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2021. – Т. 59, № 3. – С. 304–318. https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-3-304-318

22. Семененко, Н. Н. Торфяно-болотные почвы Полесья: трансформация и пути эффективного использования / Н. Н. Семененко. – Минск : Беларус. навука, 2015. – 282 с.

23. Лихацевич, А. П. Использование математического моделирования для повышения достоверности оценки результатов полевого агрономического опыта / А. П. Лихацевич // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2018. – Т. 56, № 3. – С. 321–334. https://doi.org/10.29235/1817-7204-2018-56-3-321-334

24. Формирование механизма управления рисками / С. Основин [и др.] // Аграр. экономика. – 2019. – № 11 (294). – С. 45–53.

References

1. Granovskaya L. N., Kiseleva R. A. Scientific substantiation of the system of environmental risks insurance in the irrigation zone. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya = Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture*, 2018, iss. 3 (71), pp. 127–131 (in Russian).

2. Ben'kovskaya L. V. *Improving the statistical analysis of the risks of grain production and their insurance*. Orenburg, 2015. 206 p. (in Russian).

3. Gusakov V. G. *The mechanism for market organisation of the agricultural complex: assessment and prospects*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2011. 363 p. (in Russian).

4. Zhukovskii E. E., Belchenko G. G., Brunova T. M. Probabilistic analysis of climate change impact on the potential productivity of agroecosystems. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], 1992, no. 3, pp. 92–103 (in Russian).

5. Yakushev V. P., Zhukovskii E. E. Risk analysis as the basis for evaluating the consequences of climate changes in agriculture. *Doklady Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk* [Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences], 2009, no. 5, pp. 54–57 (in Russian).

6. Yakushev V. P., Zhukovskii E. E. Climate change and risk in arable farming. *Vestnik Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences], 2010, no. 2, pp. 13–16 (in Russian).

7. Mikhailenko I. M. Precision farming as an information and technical basis for modern risk management. *Aktual'nye problemy regulirovaniya prirodnoi i tekhnogennoi bezopasnosti v XXI veke: materialy desyatoi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii po problemam zashchity naseleniya i territorii ot chrezvychainykh situatsii, 19–21 aprelya 2005 g.* [Actual problems of regulation of natural and technogenic safety in the XXI century: proceedings of the 10th International scientific and practical conference on the problems of protecting the population and territories from emergency situations, April 19–21, 2005]. Moscow, 2005, pp. 245–247 (in Russian).

8. Nasonov D. V. Methodology and a set of computer programmes for assessing the dynamics of agroclimatic risks in agriculture. *Materialy nauchnoi sessii Agrofizicheskogo instituta "Sovremennoe sostoyanie agrofiziki i ee zadachi", Sankt-Peterburg, 23–24 dekabrya 2010 g.* [Proceedings of the scientific session of the Agrophysical Institute "The current state of agrophysics and its tasks", St. Petersburg, December 23–24, 2010]. St. Petersburg, 2011, pp. 16–23 (in Russian).

9. Medennikov V. I., Muratova L. G. Technique of quantitative assessment of agroenvironmental risks at introduction of exact agriculture. *Aktual'nye problemy ekologii i prirodopol'zovaniya: sbornik statei po materialam III Vserossiiskoi (natsional'noi) nauchno-prakticheskoi konferentsii, 10 aprelya 2019 g.* [Actual problems of ecology and nature management:collection of articles based on the proceedings of the 3rd All-Russian (national) scientific and practical conference, April 10, 2019]. Kurgan, 2019, pp. 199–203 (in Russian).

10. Ivanov A. L. Global climate change and its impact on Russian agriculture. *Zemledelie*, 2009, no. 1, pp. 3–5 (in Russian).

11. Pavlova V. N., Varcheva S. E. Assessment of climatic risks of the yield loss in regional crop production systems. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and Applied Climatology*, 2017, vol. 3, pp. 122–132 (in Russian). https://doi.org/10.21513/2410-8758-2017-3-122-132

12. Pavlova V. N., Varvacheva S. E., Romanenkov V. A., Karachenkova A. A. Crop loss risk assessment and management effectiveness in modern regional farming systems under observed and expected climate change on the example of the Kaluga region. *Trudy regional'nogo konkursa proektov fundamental'nykh nauchnykh issledovanii = The proceeding of the regional competition of scientific projects of basic research*. Kaluga, 2017, iss. 22, pp. 207–217 (in Russian).

13. Sirotenko O. D., Abashina E. V., Pavlova V. N. Sensitivity of Russian agriculture to changes in climate, chemical composition of the atmosphere and soil fertility. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], 1995, no. 4, pp. 107–114 (in Russian).

14. Pavlova V. N., Sirotenko O. D. Observed climate trends and dynamics of Russian agriculture productivity. *Trudy Glavnoi geofizicheskoi observatorii im. A. I. Voeikova* [Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory]. St. Petersburg, 2012, iss. 565, pp. 132–151 (in Russian).

15. Ulanova E. S., Strashnaya A. I. Droughts in Russia and their impact on crop yields. *Trudy Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta sel'skokhozyaistvennoi meteorologii* [*Proceedings of the All-Russian Scientific Research Institute of Agricultural Meteorology*]. St. Petersburg, 2000, iss. 33, pp. 64–83 (in Russian).

16. Strashnaya A. I., Maksimenkova T. A., Chub O. V. Operational agrometeorological support for the agrarian sector of Russian economy under conditions of changing agroclimatic resources. *Trudy Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta sel'skokhozyaistvennoi meteorologii* [Proceedings of the All-Russian Scientific Research Institute of Agricultural Meteorology]. St. Petersburg, 2013, iss. 38, pp. 21–40 (in Russian).

17. Nikolaev M. V. Climate-related risks in agriculture and mitigation options. *Zdorov'e – osnova chelovecheskogo potentsiala: problemy i puti ikh resheniya = Health – the base of human potential: problems and ways to solve them*, 2013, vol. 8, no. 2, pp. 888–890 (in Russian).

18. Yakushev V. P., Lekomcev P. V., Pervak T. S., Voropaev V. V. Analysis of the economic efficiency of spring wheat cultivation in the system of precision agriculture. *Agrofizika = Agrophysica*, 2016, no. 1, pp. 43–52 (in Russian).

19. Polovinkina N. V., Rozov S. Yu. Agroecological assessment of soils as a basis for soil-ecological risk's control (on the example of the dry steppe zone of the Volgograd region at the left bank of Volga river). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17, Pochvovedenie = Moscow University Bulletin. Series 17. Soil Science*, 2017, no. 1, pp. 47–54 (in Russian).

20. Vorob'ev S. A., Kashtanov A. N., Lykov A. M., Makarov I. P. *Arable farming*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1991. 527 p. (in Russian).

21. Likhatsevich A. P. Mathematical model of agricultural crop yield. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2021, vol. 59, no. 3, pp. 304–318 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-3-304-318

22. Semenenko N. N. *Peat-bog soils of Polesie: transformation and ways of effective use*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2015. 282 p. (in Russian).

23. Likhatsevich A. P. Mathematical simulation for improvement of reliability of evaluation of the field agronomic experiment results. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2018, vol. 56, no. 3, pp. 321–334 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1817-7204-2018-56-3-321-334

24. Osnovin S., Maltsevich N., Osnovin V., Osnovina L. Formation of risk management mechanism. *Agrarnaya ekonomika = Agrarian Economics*, 2019, no. 11 (294), pp. 45–53 (in Russian).

Информация об авторе

Лихацевич Анатолий Павлович – член-корреспондент, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт мелиорации Национальной академии наук Беларуси (ул. Некрасова, 39–2, 200040, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alikhatsevich@mail.ru. https://orcid.org/0000-0003-1154-9843

Information about the author

Anatoly P. Likhatsevich – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Professor, Chief Researcher, Institute of Land Reclamation of the National Academy of Sciences of Belarus (39–2, Nekrasova Str., Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alikhatsevich@mail.ru. https://orcid.org/0000-0003-1154-9843