

УДК 528;004.9

Применения параметрической модели оценки рисков для сельскохозяйственных регионов Республики Бурунди

Applications of the parametric model of risks assessment for agricultural regions in the Republic of Burundi

Ндикумана / Ndikumana E.

Элиас

(eliasndikuman@gmail.com)

ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ), аспирант.

г. Санкт-Петербург

Яготинцева / Yagotinceva N.

Наталья Владимировна

(solnishko234@yandex.ru)

кандидат технических наук.

РГГМУ, доцент кафедры прикладной информатики.

г. Санкт-Петербург

Истомин / Istomin E.

Евгений Петрович

(biom@bk.ru)

доктор технических наук, профессор.

РГГМУ, директор института информационных систем и геотехнологий.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: экономика – economy; модель – model; управление – management; риск – risk.

Данная статья посвящена геоинформационному управлению на основе рисков, угрожающих сельскохозяйственной деятельности в Бурунди. Был проведен анализ показателей о температуре и количестве осадков на основе геопространственных данных, собранных в различных регионах Бурунди. В статье также описывается разработка и функционирование параметрической модели управления рисками для сельскохозяйственной деятельности в Бурунди. Анализ эффективности данной модели проводился на основе результатов, полученных с ее помощью, путем сравнения их с реальными результатами.

This article focuses on the management of risks to agricultural activities in Burundi. Temperature and rainfall data were analyzed on the basis of geospatial data collected from different regions of Burundi. The paper also describes the development and operation of a parametric risk management model for agricultural activities in Burundi. The effectiveness of this model was analyzed on the basis of the results obtained from it by comparing them with real results.

По данным Всемирного банка и Министерства охраны окружающей среды, сельского хозяйства и животноводства Бурунди, изменение климата представляет собой серьезную угрозу для Бурунди, поэтому необ-

ходимо срочно устранить совокупные риски, возникающие в результате ухудшения последствий изменения климата.

Бурунди чрезвычайно подвержена последствиям изменения климата, которые вызывают такие стихийные бедствия, как наводнения, засуха, проливные дожди, оползни и т. д.

В связи с изменением климата многие районы Бурунди уже сталкиваются с более частыми, сильными и продолжительными засухами. Засуха – это необычный и временный дефицит доступной воды из-за недостатка осадков и повышенного испарения (из-за высоких температур).

Засухи часто влияют, например, на сельское и лесное хозяйство, водные ресурсы и биоразнообразие. Они снижают уровень воды в реках и грунтовых водах, замедляют рост деревьев и сельскохозяйственных культур, способствуют нападению вредителей и возникновению пожаров.

С другой стороны, в сезон дождей (с февраля по май) увеличение количества осадков в течение длительных периодов времени в основном приводит к наводнениям, в то время как короткие, интенсивные ливни могут вызвать дождевые наводнения.

Наводнение – распространенное стихийное бедствие в Бурунди, которое, наряду со штормами, за последние десятилетия стало причиной гибели людей, нанесло ущерб миллионам людей и привело к значительным экономическим потерям.

Учитывая, что изменение климата оказывает негативное влияние на национальную экономику и, в частности, на сельскохозяйственную деятельность, в данной работе будет рассмотрена возможность использования параметрической модели, которая позволит предсказать поведение различных параметров, определяющих засуху и наводнения. Этот метод позволит решить проблемы, связанные с изменением климата и, в частности, с засухой и наводнениями.

Поскольку одним из важнейших условий возделывания сельхозкультур в Бурунди является изменение температур, данное исследование было основано на температурных условиях, необходимых для роста растения. [1]

В Бурунди сельскохозяйственный сектор является опорой национального экономического роста. Он является гарантом продовольственной безопасности населения. По данным Министерства сельского хозяйства сельское хозяйство является традиционным и практикуется примерно у 90% населения. [1]

В ходе исследования были поставлены следующие задачи:

- изучить принцип работы параметрической модели управления рисками в ГИС,
- проанализировать пространственные данные о параметрах, ответственных за засуху и наводнение,
- разработать параметрическую модель управления рисками,
- проверить эффективность модели.

Анализ данных

В рамках поставленных задач для эффективного управления географическими рисками, угрожающими сельскохозяйственной деятельности, был проведен анализ данных о температуре и количестве осадков, собранных в различных регионах Бурунди [1, 2].

Анализ был основан на определении следующих параметров:

- коэффициент автокорреляции;
- математическое ожидание;
- коэффициент Стьюдента;
- коэффициент корреляции.

Этот анализ был проведен для определения подходящих средств прогнозирования и управления рисками, связанными с температурой и осадками. Поскольку температура и осадки варьируются в каждом году по-разному в зависимости от месяца и сезона, ряды данных о температуре и осадках были проанализированы в соответствии с тремя сельскохозяйственными сезонами, которые встречаются в Бурунди, и каждый параметр был проанализирован как случайный процесс. Каждый случайный процесс состоит из девяти реализаций, соответствующих 9 годам анализируемых данных [1, 2].

Пусть дискретный случайный процесс представлен временным рядом.

$X(n); X(n-1); \dots; X(n-M)$, среднее определяется как [2, 3]:

$$\mu_x(n) = M\{X(n)\}, \quad (1)$$

где $M\{\cdot\}$ – оператор математического ожидания. Аналогично автокорреляция принимает форму:

$$r(n, n-k) = M\{X(n)X^*(n-k)\}, \\ k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (2)$$

где звездочка обозначает комплексное сопряжение. Функция автоковариации записывается:

$$c(n, n-k) = M[X(n) - \mu_x(n)] - \mu_x(n-k)]^* \}; \\ k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots; k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3)$$

Процесс считается строго стационарным, если все его моменты не зависят от времени. Считается, что процесс является слабостационарным или стационарным в широком смысле, если:

$$\mu_x(n) = \mu \quad \forall n \quad (4)$$

$$r(n, n-k) = r(k) \quad \forall n \quad (5)$$

Пусть X – это ряд значений размера n , среднего m и стандартного отклонения S . Сравнение наблюдаемого среднего значения (n) с теоретическим значением μ позволяет рассчитать коэффициент Стьюдента по следующей формуле:

$$t_\phi = \frac{\mu - \mu_0}{S/\sqrt{n}} \quad (6)$$

Был рассчитан критерий Стьюдента для проверки наличия стационарности в рядах данных, используемых для выбора подходящего метода управления рисками [2].

Итак, нужно сравнить среднее значение μ совокупности с нормальным распределением и неизвестным стандартным отклонением σ с заданным значением μ_0 . Нулевой гипотезой является $H_0: \mu = \mu_0$, т. е. предварительно предполагается, что среднее значение равно μ_0 . Опишем нулевую гипотезу. Рассматривается выборка размером n из этой совокупности (X_1, \dots, X_n) . Среднее значение оценивается по эмпирическому среднему [3]:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (7)$$

При нулевой гипотезе распределение среднего \bar{X} также распределяется нормально со стандартным отклонением $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$. Поскольку дисперсия σ^2 неизвестна, она оценивается с помощью собственного несмещенного показателя:

$$S_n^{*2} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2 \quad (8)$$

По теореме Кокрана при нулевой гипотезе среднеквадратическое отклонение S_n^{*2} следует закону χ_n -квадрата с $n-1$ степенями свободы.

Применяется следующая тестовая статистика:

$$Z = \sqrt{n} \frac{\bar{X}_n - \mu_0}{S_n^*} \quad (9)$$

По определению статистика Z следует распределению Стьюдента с $n-1$ степенью свободы. Выбираем риск α , обычно равный 0,05 или 0,01, и вычисляем реализацию тестовой статистики:

$$Z = \sqrt{n} \frac{\bar{X}_n - \mu_0}{S_n^*},$$

или

$$S_n^* = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2} \quad (10)$$

Пусть необходимо проверить $H_0 = \mu = \mu_0$. Таким образом, если $|Z|$ больше квантиля порядка $1 - \frac{\alpha}{2}$ закона Стьюдента с $n-1$ степенями свободы, то отвергается нулевая гипотеза.

- Случай, когда нужно проверить $H_0 = \mu \leq \mu_0$: если Z больше квантиля порядка $1 - \alpha$ закона Стьюдента с $n-1$ степенями свободы, то отвергается нулевая гипотеза.

- Случай, когда нужно проверить $H_0 = \mu \geq \mu_0$: если Z меньше квантиля порядка α закона Стьюдента с $n-1$ степенями свободы, то отвергается нулевая гипотеза.

Чтобы узнать, является ли разница значимой, необходимо сначала прочитать в t -таблице критическое значение t_k , соответствующее риску α для одной степени свободы d :

$$d = n - 1 \quad (11)$$

Если абсолютное значение t_Φ больше критического значения t_k , то разница значима. Если нет, то она не является значительной [3].

Процесс считается строго стационарным, если t_Φ меньше критического значения t_k [2, 3].

Чтобы убедиться, прослеживается ли какая-то связь между величиной температуры и количеством осадков, был рассчитан коэффициент корреляции.

Коэффициент корреляции – это особая мера, которая количественно определяет силу линейной связи между двумя переменными в корреляционном анализе. Коэффициент обозначается r в отношении корреляции [2, 3].

Корреляция включает только две переменные и не дает информации о возможных связях, содер-

жащих больше данных. Этот анализ не обнаружит выбросы, присутствующие в данных, и не сможет обнаружить криволинейные отношения.

Коэффициент корреляции может быть представлен формулой:

$$r_{xy} = \frac{\sum [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 * \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (12)$$

Коэффициент корреляции представляет собой безразмерное значение от -1 до 1.

Анализируя полученные значения автокорреляционной функции для температуры и для количества осадков для трех сезонов, можно сделать вывод о наличии четкой линейной тенденции в исследуемом временном ряду, что дает основание утверждать, что эти параметры не зависят от времени.

На рис. 1.1 показана коррелограмма с зависимостями порядка коэффициентов автокорреляции от длины задержки (лага).

Анализ графика, представленного на рис. 1.1, показывает, что линейная функция коэффициента автокорреляции приводит к выводу о наличии стационарности, поскольку линейная функция автокорреляции почти не меняется со временем в сезоне с июня по август.

Аналогичный анализ позволил нам сделать вывод, что ряды количества воды являются квазистационарными или стационарными в различных регионах Бурунди во время сезона Б. Исходя из этого, можно легко сделать вывод, что количество осадков в период с февраля по май характеризуется стационарностью.

Для проверки стационарности также использовался критерий Стьюдента. Для проверки этой стационарности значение коэффициента значимости было выбрано равным 5 процентам. Результат показан на рис. 1.2.

Анализируя рассчитанное значение t -Стьюдента для температуры для района Ньямусвага в сезон Б, можно увидеть, что значение t -Стьюдента ниже критического значения t -Стьюдента, как показано на рис. 1.2 и в таблице 1, из чего легко сделать вывод о стационарности временного ряда температуры [3, 4].

Для всех сезонов и для обоих параметров было замечено, что значение t -Стьюдента ниже критического значения t -Стьюдента. Поскольку значение t -Стьюдента остается ниже критического значения t -Стьюдента, легко видеть, что температура и осадки не зависят от времени, следовательно, можно утверждать, что для временного ряда температуры и осадков существует стационарность [3, 4, 5].

Корреляционный анализ приводит к выводу об отсутствии сильной линейной связи между температурой и осадками.

Как видно из рис. 1.3, в анализируемых данных нет сильной линейной зависимости между темпе-

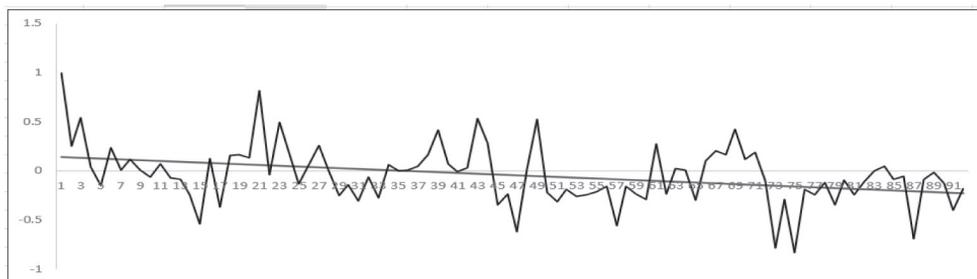


Рис 1.1. Коэффициент автокорреляции для температуры для сезона С в Гитега

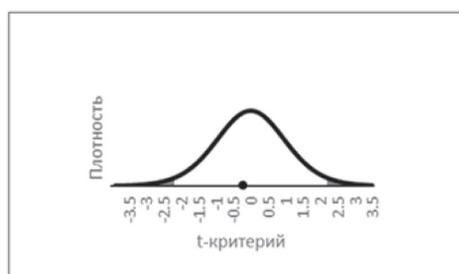


Рис 1.2. Распределение t-критерия

Таблица 1

Расчет t-критерия

Показатель	Значение
μ	27,5
X_{cp}	27,3
n	15
s	3,89
t_{ϕ}	-0,19913
α	0,05
d.f.	14
$t_{критич}$	2,145

ратурой и осадками для сезона С. Аналогичный сценарий наблюдался при расчете коэффициентов корреляции между температурой и осадками для других сезонов [4, 5].

Поскольку между температурой и осадками нет сильной корреляции, эти два параметра будут рассматриваться отдельно для прогнозирования рисков для сельскохозяйственной деятельности, вызванных температурой и осадками.

Уровень ущерба, вызванного изменением температурного режима и режима выпадения осадков, не является константой, а изменяется по стохастическим законам. Все параметры, условия функционирования и характеристики состояния прогнозируемого объекта представлены случайными величинами и связаны стохастическими (т. е. случайными, нерегулярными) зависимостями. Поэтому характеристики состояния в модели определяются не однозначно, а по законам их вероятностного распределения [6].

Поскольку рост и развитие растений могут происходить при определенных условиях (заданная температура, заданное количество осадков, заданное количество света, заданное количество кислорода и т. д.), выход значений параметров за пределы этих условий является фактором неустойчивого земледелия и приводит к низким урожаям (фактический ущерб). С помощью математической модели управления рисками можно определить вероятность выхода за определенный уровень параметра, после которого для определенного растения может наблюдаться повреждение [6, 7].

Параметрическая модель оценки риска

При прогнозировании риска от какого-либо события, необходимо спрогнозировать вероятность наступления такого события $Q(t_3)$, где t_3 – глубина прогноза.

Событие (например, засуха, наводнения, эрозия, и т. д.) считается наступившим, если уровень значения температуры или осадков $X(t)$ превысил определенные границы, т. е. событие не началось, если уровень заданного параметра находится в пределах $D(t) = [a(t), b(t)]$, где $a(t) = 0, b(t)$ – ординатор [7].

Предположим, что закон изменения во времени температуры воздуха и осадков хорошо описывается гауссовским процессом с параметрами $m_x(t), \sigma_x(t)$ и $r_x(t_1, t_2)$.

Будем считать, что событие имеет двухсторонний предел $D(t) = [a(t), b(t)]$, где $a(t)$ и $b(t)$ могут иметь любое значение в зависимости от условий, необходимых для развития конкретного растения.

$a(t)$ – нормальное значение параметра (температуры, осадков), начиная с которого растение хорошо растет.

$b(t)$ – уровень параметра (температуры, осадков), при котором урожай начинает повреждаться.

Для оценки рисков используем выражения:

$$P^*(t_3 / x_0) = \Phi \left\{ \frac{b - m_x(t_3) - r_x(0, t_3) \cdot [x_0 - m_x(0)]}{\sigma_x(t_3) \sqrt{1 - r_x^2(0, t_3)}} \right\} - \Phi \left\{ \frac{-m_x(t_3) - r_x(0, t_3) \cdot [x_0 - m_x(0)]}{\sigma_x(t_3) \sqrt{1 - r_x^2(0, t_3)}} \right\} \quad (2.1)$$

где

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\{-z^2/2\} dz \quad (2.2)$$

$P^*(t_3 / x_0)$ – это вероятность того, что случайный процесс не выходит из заданных пределов при условии, что известно значение этого процесса в начальный момент времени $t = 0, (x(t = 0) = x_0)$ [7, 8].

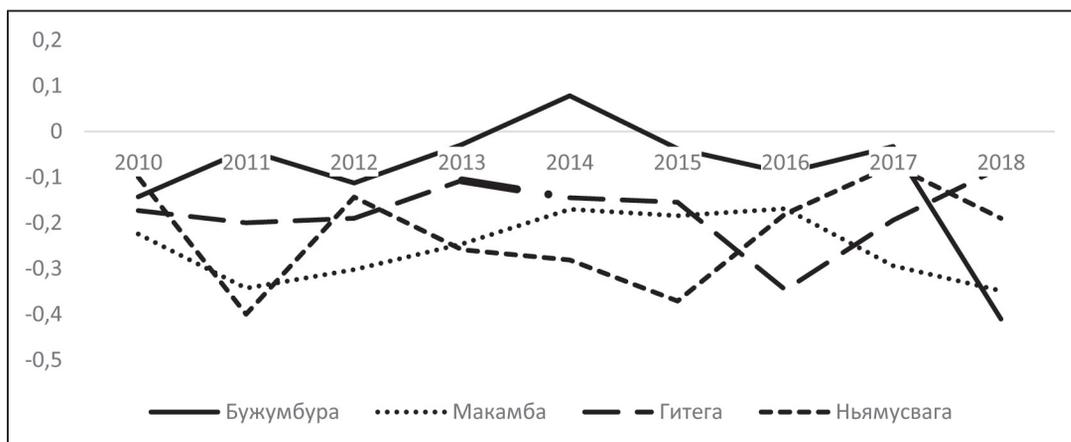


Рис 1.3. Графики коэффициентов корреляции между температурой и осадками для 4 регионов за сезон С

Пусть $R^*(t_s / x_0)$ – это вероятность того, что случайный процесс выходит из заданных пределов при условии, что известно значение этого процесса в начальный момент времени $t = 0, (x(t = 0) = x_0)$.

Тогда можно найти значения по формуле

$$R^*(t_s / x_0) = 1 - P^*(t_s / x_0) \quad (2.3)$$

Считается, что на величину ущерба от заданного параметра (температуры, осадков) оказывают влияние ряд факторов: максимальный уровень заданного параметра (выше ординара), скорость нарастания заданного параметра, длительность события, вызванного заданным параметром. С учетом этого сделаем некоторые предположения [7, 8].

Ущерб, нанесенный событием, пропорционален площади фигуры, ограниченной кривой $X(t)$ и уровнем C (рис. 2.1).

Обозначим:

$$I = \int_{T_n}^{T_k} (X(t) - c) dt, \quad (2.4)$$

где I – показатель ущерба;

T_n – начало события;

T_k – окончание события;

I_{\max} – максимальный показатель ущерба.

Тогда:

$$k_u = \frac{I}{I_{\max}}, \quad (2.5)$$

где k_u – коэффициент ущерба.

Для верификации эффективности данной модели в данной работе рассчитаны статистические критерии, которые дают общее представление о качестве прогноза вероятности невыхода из заданных пределов [10]. Рассчитанные статистические характеристики являются следующими:

- относительная ошибка (RE),
- средняя абсолютная ошибка (MAE),

- систематическая ошибка (ME),
- средняя квадратичная ошибка ($RMSE$),
- коэффициенты корреляции Пирсона ($CORR_{P,F}$) между прогностическими и фактическими результатами.

$$RE = \sum_i^n \frac{P_i - F_i}{F_i} \times 100 \quad (2.6)$$

$$ME = \sum_{i=1}^n \frac{P_i - F_i}{F_i} \quad (2.7)$$

$$MAE = \sum_{i=1}^n |P_i - F_i| \quad (2.8)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - F_i)^2} \quad (2.9)$$

$$CORR_{P,F} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{P_i - \mu_P}{\sigma_P} \times \frac{F_i - \mu_F}{\sigma_F} \quad (2.10)$$

где P_i – это прогнозируемая вероятность невыхода из заданного предела,

F_i – это фактическая вероятность невыхода из заданного предела.

Значения относительной и систематической ошибок позволяют оценить точность моделирования с точки зрения завышения или занижения вероятности невыхода из заданных пределов, а среднеквадратическая и средняя абсолютная ошибка дают информацию о качестве прогноза по всей исследуемой области. Коэффициенты корреляции Пирсона ($CORR$) между прогностическими и фактическими результатами дают информацию о линейной связи между прогностическими и фактическими результатами вероятностей невыхода из заданных пределов температуры [9, 10].

Для реализации этой модели на практике использован Visual Basic for Applications (VBA). Этот язык программирования позволил создать скрипт, который

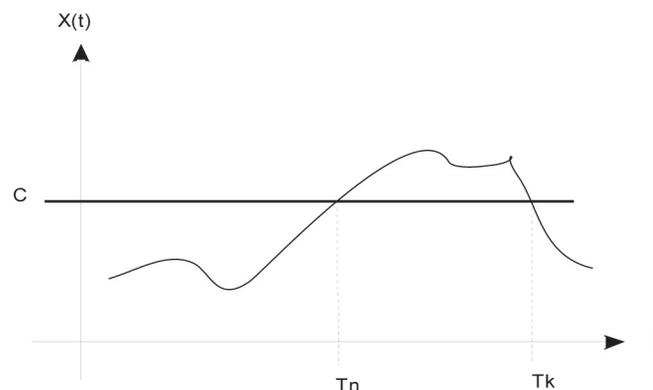


Рис. 2.1. Начало и окончание события, приводящего к риску [7, 8].

может автоматически рассчитать все характеристики, составляющие функцию, позволяющую спрогнозировать вероятность наступления риска. С помощью этого языка была создана модель, которая удобна в использовании и позволяет пользователю легко манипулировать ею в зависимости от требований к уровню параметров, при которых можно ожидать ущерба. Наша модель масштабируется в различных диапазонах, что позволяет пользователю прогнозировать риски на разных уровнях по необходимости.

Эта модель может быть запущена через Майкрософт офис (Эксель). Через диалоговые окна модель просит пользователя вручную указать диапазон, в котором значения данного параметра не приводят к возникновению ущерба. Затем модель автоматически рассчитывает прогноз вероятности выхода за пределы, вероятности невыхода за пределы, коэффициента ущерба в зависимости от уровня параметра и автоматически строит графики ряду параметров, включая уровни, при которых был сделан прогноз для облегчения визуальной интерпретации полученных результатов.

Поскольку при отсутствии достаточного количества осадков повышение температуры оказывает негативное влияние на рост и развитие некоторых растений, в данном исследовании была сделан прогноз рисков, вызванных повышением температуры. Например, была спрогнозирована вероятность того, что температура превысит 25 градусов, затем 27 градусов, затем 29 градусов и, наконец, 31 градус. В качестве нормального уровня температуры была взята температура 15 градусов, так как при этой температуре почти все растения растут нормально. Прогноз рисков для сельскохозяйственной деятельности касался июля месяца, когда в Бурунди обычно не выпадает достаточного количества осадков. Этот недостаток осадков может быть усугублен повышением температуры в регионе. Для проведения этого исследования модель использует основные температурные характеристики, наблюдаемые в течение месяцев июня и июля, и затем было прогнозировано возникновение рисков для месяца августа.

После запуска этой модели были получены следующие результаты в таком виде:

Расшифровка представленных на рисунке 2.2 видов результатов заключается в следующем:

B_i – представляет собой уровень температуры, выше которого температура может нанести ущерб сельскохозяйственной деятельности. Для данного исследования были выбраны четыре различных температурных уровня.

$P(Tz / X_0)$ – эквивалентно $P^*(t_3 / x_0)$ и представляет собой в вероятность того, что температура не выходит из заданных пределов заданного уровня « B_i ».

$R(Tz / X_0)$ – эквивалентно $R^*(t_3 / x_0)$ и представляет собой в вероятность того, что температура выходит из заданных пределов заданного уровня « B_i ».

Dr – представляет собой разницу между наблюдаемым риском на уровне « B_i » по сравнению с наблюдаемым риском на начальном уровне.

Ku – представляет собой коэффициент ущерба в зависимости заданного уровня « B_i ».

Как показано в результатах на рисунке 2.2, чем ниже уровень температуры « B_i », тем выше вероятность того, что он будет сопровождаться большим риском и, соответственно, коэффициент ущерба Ku увеличивается. С другой стороны, если уровень температуры « B_i » повышается, вероятность того, что он будет иметь большой риск, уменьшается и, соответственно, уменьшается коэффициент ущерба. В нашем случае для температурного уровня выше 29 градусов риск равен нулю, и поэтому модель показывает, что коэффициент ущерба Ku не существует, и модель вместо значения показывает (#DIV/0!). Если при температурном уровне « B_i » ущерб отсутствует, рекомендуется сажать наиболее устойчивые растения при температуре ниже этого уровня [10, 11].

Кроме того, модель отображает результаты в графическом виде, чтобы облегчить пользователю быструю расшифровку результатов.

Как показывают результаты на рисунке 2.3, по мере уменьшения температурного уровня « B_i » вероятность того, что температура не превысит этот уровень, уменьшается, а вероятность того, что температура

B_i	$P(Tz/X_0)$	$R(Tz/X_0)$	Dr	Ku
25	0.00588111	0.99411889		0.492601
27	0.512638653	0.487361347	0.506757543	0.291207
29	0.995096631	0.004903369	0.989215521	#DIV/0!
31	0.999999858	1.42236E-07	0.994118748	#DIV/0!

Рис. 2.2. Пример результатов при применении модели для данных температур, полученных со станции Гитега

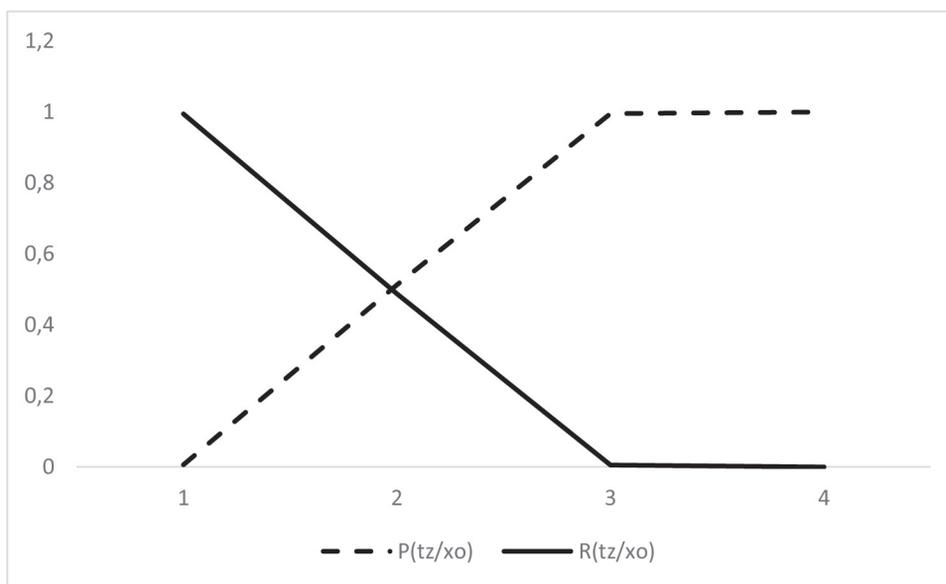


Рис 2.3. Пример результатов в виде графика при применении модели для данных температур, полученных со станции Гитега

Таб 2.1

статистические характеристики	значения
ME	0,0000051
MAE	0,0000051
RMSE	$4,434 \cdot 10^{-06}$
RE	0
CORR _{P,F}	1

Таб 2.2

статистические характеристики	значения
ME	-0,015957997
MAE	0,015957997
RMSE	0,011151709
RE	0
CORR _{P,F}	0,999976292

Таб 2.3

статистические характеристики	значения
ME	-0,008784
MAE	0,008784
RMSE	0,013074848
RE	0
CORR _{P,F}	0,999920297

Таб 2.4

статистические характеристики	значения
ME	0,018093
MAE	0,018093
RMSE	0,019980684
RE	0
CORR _{P,F}	0,986781689

превысит этот уровень, увеличивается. Наоборот, по мере увеличения уровня температуры « B_i » вероятность того, что температура не превысит этот уровень, увеличивается, а вероятность того, что температура превысит этот уровень, уменьшается.

Оценка эффективности модели

Для оценки эффективности модели был сделан прогноз вероятности того, что температура не превысит установленные уровни температуры ($B_1 = 25; B_2 = 27; B_3 = 29; B_4 = 31$), он был сделан на основе данных, собранных с десяти метеорологических станций в Бурунди. Оценка была сделана на основе статистических характеристик, которые позволяют оценить точность эффективности по отношению к фактическим данным.

По результатам анализа, представленным в таблицах таб. 2.1, таб. 2.2, таб. 2.3, таб. 2.4, соответствующих результатам анализа по уровням температуры ($B_1 = 25; B_2 = 27; B_3 = 29; B_4 = 31$), можно легко заметить, что модель идеально подходит для прогнозирования рисков, связанных с температурой, поскольку видно, что относительная ошибка равна нулю в четырех случаях, более того, корреляция между результатами прогноза и реальными результатами намного выше 0,95, что показывает, что модель обеспечивает наиболее надежные результаты. Кроме того, систематическая ошибка не превышает 2 процентов, что доказывает, что модели можно доверять при принятии решений о том, какой тип растений сажать в зависимости от меняющихся погодных условий [11].

В заключении следует отметить, что модель подходит не только для прогнозирования рисков по температуре, но также может быть использована для прогнозирования рисков, связанных с другими параметрами различных событий, представляющих опасность для экономической деятельности, таких как, например, сельскохозяйственная деятельность, работоспособность дорог и т. д.

Результаты, предоставляемые данной моделью, позволяют пользователю принять соответствующее решение при осуществлении своей сельскохозяйственной деятельности. Основываясь на вероятности ожидаемых рисков, пользователь данной модели может предпринять стратегии, которые помогут ему снизить потери и хорошо спланировать свою деятельность

Литература

1. Liersch, S. Rapport sur le changement climatique au Burundi / S. Liersch, R. Rivas, K. Fritzsche // Projections des changements climatiques pour le Burundi – Résumé. – 2014. – URL: https://www.adelphi.de/de/system/files/mediathek/bilder/changement_climatique_auburundi_r%C3%A9sum%C3%A9_fr_1.pdf (дата обращения: 03.03.2022).

2. Аргучинцева, А. В. Методы статистической обработки и анализа гидрометеорологических наблюдений : учеб. пособие / А.В. Аргучинцева. – Иркутск : Иркутский государственный университет, 2007. – 105 с.

3. Методы теории вероятностей и математической статистики в моделировании транспортных процессов : учебное пособие / Е.П. Истомин, Т.П. Кныш, А.П. Нырков, А.Р. Шкадова. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций, 1999. – 168 с.

4. Национальный доклад на Всемирной конференции по уменьшению опасности бедствий, 2005. Кобе, Япония, 18–22 января 2005 г. – 2005. – 64 с.

5. Истомин, Е. П. Управленческие решения : учеб. по направлению "Менеджмент" / Е.П. Истомин, А.Г. Соколов. – Санкт-Петербург : Андреев. изд. дом, 2005. – 247 с.

6. Истомин, Е. П. Применение стохастических моделей для прогнозирования рисков в геосистемах / Е.П. Истомин, Л.С. Слесарева // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2011. – № 17. – С. 145–149.

7. Ветрова, Н. А. Анализ и моделирование технологических инноваций / Н.А. Ветрова, Е.Н. Горлачева, А.Г. Гудков // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 2005. – № 11. – С. 47–58.

8. Соколов, А. Г. Анализ современных моделей пространственного управления организационно-техническими системами / А.Г. Соколов, Я.А. Петров // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. – 2013. – № 2-2 (11). – С. 122–123.

9. Risk Management Strategy EEA & Norway Grants 2014-2021 / Financial Mechanism Committee. – 2016. – URL: <https://eeagrants.org/sites/default/files/resources/2014-2021%20Risk%20management%20strategy.pdf> (дата обращения: 11.04.2023).

10. Истомин, Е. П. Оценка риска экстремальных гидрометеорологических явлений / Е.П. Истомин, Л.С. Слесарева // Ученые записки РГГМУ. – 2010. – № 16. – С. 14–21.

11. Оценка качества прогноза // Open Forecasting : сайт. – URL : https://forecasting.svetunkov.ru/etextbook/forecasting_toolbox/models_quality/ (дата обращения : 11.04.2023).