

*Рассматривается проблема оценивания сроков устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через фиксированные пороговые значения. Для решения этой проблемы предлагается использовать метод квантильной регрессии.*

---

© В.А. Пепеляев,  
А.Н. Голодников,  
Н.А. Голодникова, 2017

УДК 338.43

В.А. ПЕПЕЛЯЕВ, А.Н. ГОЛОДНИКОВ,  
Н.А. ГОЛОДНИКОВА

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КВАНТИЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОГОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В НЕКОТОРЫХ СЕКТОРАХ ЭКОНОМИКИ**

**Введение.** Результаты экономической деятельности в таких секторах экономики как аграрный и коммунальный напрямую зависят от погодных условий. Принятие ошибочных решений в этих отраслях могут привести к значительным экономическим потерям, экологическим бедствиям, социальным потрясениям. В данной статье анализируются различные ситуации, в которых необходимо принимать решения в условиях метеорологической неопределенности и риска потерь, приведен краткий обзор публикаций по указанной тематике. Особое внимание уделено проблеме оценивания сроков устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через фиксированные пороговые значения. Для решения этой проблемы предлагается использовать метод квантильной регрессии.

**Влияние метеорологической информации на качество управленческих решений в аграрном и коммунальном секторах экономики.** Посев полевых культур – одна из критических технологических операций в аграрном секторе. Например, от выбора правильного момента посева кукурузы зависят такие показатели, как полевая всхожесть семян и густота стояния растений, которые в конечном итоге определяют урожайность этой культуры. Наибольшую опасность для всходов кукурузы представляет возвращение

*Теорія оптимальних рішень. 2017*

длительного похолодания после кратковременного теплого периода. Всходы этой культуры появляются при температуре не ниже  $+10 - +12^{\circ}\text{C}$ . В фазе цветения растения кукурузы выдерживают кратковременные заморозки не более  $- +1^{\circ}\text{C}$ ,  $+2^{\circ}\text{C}$  [1]. При повреждении заморозками более 50 % листовой поверхности растения практически не восстанавливаются. В качестве примера можно привести гибель посевов кукурузы на 40 % посевной площади в 2008 г. в Винницком районе Винницкой области [2], вызванную трехдневным похолоданием в конце первой недели мая после теплой погоды, установившейся в апреле. Для предотвращения подобных ущербов необходимо усовершенствовать прогноз даты устойчивого перехода средней суточной температуры через  $+10^{\circ}\text{C}$ .

Роль метеорологической информации возросла учитывая то, что за последние годы во многих регионах Украины участились случаи почвенной засухи в августе – сентябре, в период оптимальных сроков посевов озимых культур. В таких случаях возникает необходимость в выборе одной из следующих альтернатив: 1) отказаться от посева озимых, и отвести площадь под ранние яровые зерновые культуры; 2) сеять озимые в сухую почву в надежде на то, что осадки выпадут до наступления холодов; 3) отложить посев до выпадения осадков.

Выбор первой альтернативы позволит избежать непроизводительных материальных затрат, обусловленных гибелью посевов и необходимостью пересева. При этом, даже при благоприятных стечениях обстоятельств валовой сбор урожая уменьшится, поскольку урожайность озимых культур значительно выше, чем яровых. Учитывая то, что озимые культуры рано восстанавливают весеннюю вегетацию и поэтому более эффективно используют весенние запасы влаги. Кроме того, эти культуры успевают созреть до наступления летней засухи. При выборе второй альтернативы возникает риск того, что посевы могут не взойти, если осадки не выпадут до наступления холодов. Третья альтернатива связана с риском того, что после поздних осадков существенно сократится период осенней вегетации. В результате, растения не успевают развить корневую систему, раскуститься, достичь этапа готовности к формированию зачаточного колоса и закалиться. Такие растения менее устойчивы к неблагоприятным условиям зимовки. Их сохранность за зиму, в среднем на 20 % ниже, чем у растений оптимальных сроков посева [3]. При отклонении сроков посева от оптимальных на 15 – 20 дней урожайность озимых в зависимости от почвенно-климатических условий района снижается на 15 – 45 % [4].

Важна метеорологическая информация и для принятия решений о целесообразности посева промежуточных культур. После уборки озимых культур поля длительное время остаются свободными. Для более производительного использования агроклиматических ресурсов в промежутках времени, свободных от возделывания основных культур севооборота, выращиваются промежуточные (познивные) культуры. Для принятия решения о целесообразности посева познивной культуры необходимо оценить соответствие основных требований

этой культуры к таким факторам как тепло и влага, а также продолжительность вегетационного периода агроклиматическим ресурсам, доступным в эти промежуточные времена. Для этого необходимо определить дату устойчивого перехода средней суточной температуры через  $+15^{\circ}\text{C}$  осенью и сопоставить продолжительность периода от уборки до этой даты с продолжительностью вегетационного периода данной пожнивной культуры. Кроме того необходимо оценить возможность обеспечения этой культуры необходимыми теплом и влагой.

Сезонный прогноз выпадения осадков имеет важное значение и для принятия решений в орошаемом земледелии. В пределах некоторых орошаемых систем на юге Украины подземные воды залегают наиболее близко к земной поверхности (на глубине до 2 м). В случае выпадения обильных дождей их уровень повышается, что приводит к подтоплению населенных пунктов и сельхоз-угодий. Прогнозирование таких ситуаций позволяет заблаговременно организовать откачку коллекторно-дренажных вод и избежать подтопления.

Для коммунального сектора экономики наиболее важна информация о сроках устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через  $+8^{\circ}\text{C}$  осенью и весной. Именно эти показатели определяют начало и окончание отопительного сезона и его продолжительность. Прогнозы продолжительности предстоящего отопительного периода, а также средняя температура наружного воздуха в этот период используется для прогноза показателя «градусо-сутки отопительного периода» [5]. Последний показатель позволяет определить сколько природного газа необходимо закачать в подземные хранилища, чтобы обеспечить бесперебойное снабжение теплом коммунальное хозяйство в предстоящий отопительный период. Согласно результатам статистического анализа исторических данных, приведенных в работе [6], максимальное отклонение продолжительности отопительного периода от среднего многолетнего значения в отдельных городах Украины составило 20 дней.

Ситуации, описанные в данном разделе, демонстрируют насколько важна точность прогноза дат устойчивого перехода температуры воздуха через заданные пределы и других метеорологических параметров для принятия оптимальных решений о сроках посева сельскохозяйственных культур, об объемах запасов газа и угля, необходимых для обеспечения отопительного сезона, и решения относительно проведения профилактических противопаводковых мероприятий на оросительных системах.

#### **Обзор подходов к прогнозированию метеорологических показателей.**

Даты устойчивого перехода температуры воздуха через заданные пределы ( $0^{\circ}\text{C}$ ,  $+5^{\circ}\text{C}$ ,  $+10^{\circ}\text{C}$ ) весной и осенью относятся к наиболее важным климатическим характеристикам, с которыми аграрии традиционно согласовывают выполнение разных агротехнологических операций. С переходом среднесуточной температуры воздуха через  $0^{\circ}\text{C}$  весной начинается таяние снежного покрова и разморозание почвы. При переходе среднесуточной температуры воздуха через  $+5^{\circ}\text{C}$  весной

возобновляется вегетация озимых и холодостойких растений. При этой температуре начинается также вегетация ранних сельскохозяйственных культур [7]. Дата устойчивого осеннего перехода температуры воздуха через  $+5^{\circ}\text{C}$  считается окончанием периода вегетации. При переходе среднесуточной температуры воздуха через  $+10^{\circ}\text{C}$  весной начинается вегетация более поздних культур и активно вегетируют большинство растений.

В научных статьях предложены несколько определений дат устойчивого перехода температуры воздуха через заданные пределы. Часто авторами используется определение, предложенное Д.А. Педем в [8], согласно которому за дату устойчивого перехода принимается первый день с температурой, превосходящей предельное значение, после которого обратного перехода совсем не наблюдалось или, если он был, то сумма положительных отклонений температуры от предела превышала сумму отрицательных отклонений.

Сведения о средних датах устойчивого перехода через  $+5^{\circ}\text{C}$ , определенных по данным за 1890 – 1960 гг., опубликованы в справочниках по Климату СССР [9]. В 1980 г. на основе данных многолетних наблюдений за 1890 – 1979 гг. в работе [10] разработаны ранние, поздние и средние даты перехода температуры воздуха через  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $+5^{\circ}\text{C}$ ,  $+10^{\circ}\text{C}$  и  $+15^{\circ}\text{C}$  для каждой области Украины. В 1987 г. в [11] были определены даты перехода через  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  по станциям западной части территории СССР. В 2012 г. в [12] уточнены ранние и поздние весенние даты переходов средней суточной температуры через  $0^{\circ}\text{C}$  и  $+5^{\circ}\text{C}$  по данным за 1890 – 2012 гг. Согласно полученным в этой работе результатам, промежуток времени между поздними и ранними датами устойчивого перехода варьировался в широких пределах. Например, в Киеве ранняя дата устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через  $+5^{\circ}\text{C}$  за 1890 – 2012 гг. соответствует 22 февраля, а поздняя – 30 апреля [12]. Результаты этих работ длительное время использовались в качестве практических рекомендаций по срокам проведения посевных работ, выбору культур для посева и оценке теплообеспеченности вегетационного периода.

В работе [13] приведена информация о датах начала и конца отопительного сезона (даты осеннего и весеннего перехода средней суточной температуры воздуха через  $+8^{\circ}\text{C}$ ) в городах Украины, полученные в результате статистической обработки наблюдений за 50 – 70-летние периоды, предшествующие 1980 гг.

Учитывая потепление климата значимость оценок, основанных на статистическом анализе длинных рядов метеорологических наблюдений, уменьшается. Возникла острая необходимость в разработке прогнозных моделей, основанных на информативных предикторах. В работе [12] для прогнозирования дат перехода температуры воздуха через  $0^{\circ}\text{C}$  и  $+5^{\circ}\text{C}$  предложено использовать одномерную регрессионную модель. При этом в качестве предиктора предложено использовать двухмесячный прогноз на март – апрель. В работе [13] предложен подход к прогнозу осадков по отдельным месяцам зимнего сезона. Наиболее слабым местом в этом подходе является прогноз интенсивности зональной циркуляции атмосферы. В работе [14] изучается вопрос о возможности использования более доступных метеорологических факторов в качестве предикторов при про-

гнозировании дат устойчивого перехода температуры воздуха через  $+10^{\circ}\text{C}$  весной. Показано, что наиболее информативными для этой цели являются такие легкодоступные показатели: средняя месячная температура воздуха за февраль, количество осадков в зимний период и другие. Именно эти предикторы целесообразно использовать при разработке регрессионных моделей.

В последние годы учитывая необходимость моделирования глобального изменения климата бурно развивались модели общей циркуляции атмосферы и методы ансамблевого прогнозирования. Прогресс, достигнутый в этом направлении, стимулировал проведение исследований, направленных на использование полученных результатов для метеорологических прогнозов на месяц и сезон [15].

**Квантильная регрессия.** Информация о датах устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через заданный предел содержит элемент неопределенности, степень которой характеризуется промежутком времени между ранней и поздней датами этого перехода. При выборе даты посева в пределах указанного промежутка времени существует риск возвращения длительного похолодания после этой даты. Чем ближе выбранная дата к поздней, тем ниже риск. В случае посева сельскохозяйственной культуры после поздней даты риск наступления этого неблагоприятного события практически отсутствует, но при этом ожидаемая урожайность уменьшается.

Таким образом, для выбора срока посева аграрию необходимо проанализировать риски потерь урожая при разных сроках посева и выбрать оптимальный срок, которому соответствует максимальная урожайность при минимально возможном риске. Для решения этой задачи можно воспользоваться подходом, предложенным в [16 – 17], в которых максимизируется средняя урожайность сельскохозяйственных культур при ограничениях на риск потерь. Но для этого необходимо представить информацию о датах устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через заданный предел в виде функции распределения.

Пусть  $Y$  – случайная величина, которая принимает все возможные значения, соответствующие датам устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через заданный предел в заданном районе. Пусть  $F_Y(y) = P(Y \leq y)$  – функция распределения случайной величины  $Y$ , и  $\theta$  – фиксированное число,  $0 \leq \theta \leq 1$ . Определим  $\theta$ -квантильную функцию

$$Q_Y(\theta) = F_Y^{-1}(\theta) = \inf \{y | F_Y(y) \geq \theta\}.$$

Исторические даты устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через заданный предел в заданном районе,  $Y_1, \dots, Y_n$ , можно рассматривать как случайную выборку с эмпирической функцией распределения  $\hat{F}_Y(y)$ . Эмпирическую  $\theta$ -квантильную функцию

$$\hat{Q}_Y(\theta) = \hat{F}_Y^{-1}(\theta) = \inf \{y | \hat{F}_Y(y) \geq \theta\},$$

можно построить путем решения следующей задачи минимизации:

$$\hat{Q}_Y(\theta) = \arg \min_y \left\{ \sum_{i: Y_i \geq y} \theta |Y_i - y| + \sum_{i: Y_i < y} (1 - \theta) |Y_i - y| \right\}.$$

Используя эту формулу при разных значениях  $\theta$  из интервала  $0 \leq \theta \leq 1$ , можно построить эмпирическую функцию распределения дат устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через заданный предел в заданном районе. Однако, поскольку эта функция построена по выборке малого объема (количество исторических данных,  $n \ll 1000$ ), ее нельзя использовать для прогнозирования.

В работе [18] предложен метод квантильной регрессии, который позволяет при построении  $\theta$ -квантильной функции, соответствующей данному району, использовать информацию собранную в нескольких районах. Объединяя данные по датам перехода в нескольких районах можно существенно увеличить объем выборки и тем самым способствовать получению статистически значимой функции распределения дат перехода. Аналогичным образом можно построить функции распределения сроков выпадения осадков после длительного безосадочного периода и их количества.

В работе [18] введена в рассмотрение  $\theta$ -квантильная регрессионная функция, которая обобщает эмпирическую  $\theta$ -квантильную функцию на случай, когда  $Y$  – линейная функция, зависящая от  $K+1$  независимых переменных  $\vec{x}' = [1, x_1, \dots, x_K]$ ,  $Y = \vec{x}'\vec{\beta} + \varepsilon$ , где вектор коэффициентов  $\vec{\beta}' = [\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_K]$ , а  $\varepsilon$  – случайная ошибка, математическое ожидание которой равно 0. Случайная ошибка вводится в модель для того, чтобы объяснить избыточную изменчивость или разброс зависимой переменной  $Y$ , который нельзя объяснить с помощью независимых переменных  $x_1, \dots, x_K$ . Как правило, кумулятивный эффект переменных, которые невозможно измерить или предусмотреть, моделируется введением случайной ошибки  $\varepsilon$ .  $\theta$ -квантильную регрессионную функцию можно записать в виде

$$Q_Y(\theta|\vec{x}) = \inf \{ y | F_Y(y|\vec{x}) \geq \theta \} \equiv \vec{x}'\vec{\beta}_\theta.$$

Оценки коэффициентов  $\theta$ -квантильной регрессионной функции можно найти минимизируя нормализованную ошибку Коенкера – Бассета

$$\frac{1}{n} \left\{ \sum_{i: Y_i \geq \vec{x}_i'\vec{\beta}_\theta} \frac{\theta}{1-\theta} |Y_i - \vec{x}_i'\vec{\beta}_\theta| + \sum_{i: Y_i < \vec{x}_i'\vec{\beta}_\theta} |Y_i - \vec{x}_i'\vec{\beta}_\theta| \right\}.$$

В отличие от классической линейной регрессии, при построении квантильной регрессионной функции не требуется, чтобы функция распределения  $Y$  бы-

ла нормальной. Кроме того, допускается неоднородность данных, т. е. дисперсия случайной ошибки  $\varepsilon$  может быть неодинаковой для разных значений независимых переменных.

**Выводы.** В результате проведенного анализа разных ситуаций, в которых необходимо принимать решения в условиях метеорологической неопределенности и риска потерь мы пришли к выводу о необходимости усовершенствования существующих методов оценивания сроков устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через фиксированные пороговые значения. Предложено для этих целей использовать методы квантильной регрессии.

*В.А. Пепеляев, О.М. Голодников, Н.О. Голоднікова*

#### ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ КВАНТИЛЬНОЇ РЕГРЕСІЇ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОГОДНО-КЛІМАТИЧНИХ УМОВ У ДЕЯКИХ СЕКТОРАХ ЕКОНОМІКИ

Розглядається проблема оцінювання термінів стійкого переходу середньої добової температури повітря через фіксовані порогові значення. Для вирішення цієї проблеми пропонується використовувати метод квантильної регресії.

*V.A. Pepelyaev, A.N. Golodnikov, N.A. Golodnikova*

#### APPLICATION OF THE QUANTILE REGRESSION METHOD FOR FORECASTING WEATHER CONDITIONS IN SOME SECTORS OF ECONOMICS

The problem of estimating the dates of stable transition of the mean daily temperature through fixed threshold values is considered. To solve this problem, it is proposed to use the quantile regression method.

1. <http://www.activestudy.info/kukuruza-na-zerno>.
2. Збір урожаю сільськогосподарських культур, плодів та ягід у Вінницькій області за 2008 рік. Статистичний бюлетень. Головне управління статистики у Вінницькій області. В., 2009. 179 с.
3. *Моисейчик В.А.* Агрометеорологические условия и перезимовка озимых культур. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 294 с.
4. *Страшная А.И., Максименкова Т.А., Чуб О.В.* Об изменении агроклиматических условий вегетации и сроков сева озимых культур осенью в Центральном федеральном округе в связи с потеплением климата. *Тр. Гидрометцентра России*. М.: 2009. Вып. 343. С. 141 – 158.
5. *Отопительный* период и его показатели: градусо-сутки отопительного периода, наружная температура. [http://teplo-info.com/snip/otopitelnyy\\_period](http://teplo-info.com/snip/otopitelnyy_period).
6. *Бабиченко В.Н., Гуцина Л.М., Николаева Н.В.* Продолжительность отопительного периода на Украине. *Труды УкрНИИ Госкомгидромета*. 1980. Вып. 180. С. 56 – 65.
7. *Мирвис В.М., Гусева И.П., Мещерская А.В.* Тенденции изменения временных границ теплого и вегетационного сезонов на территории бывшего СССР за длительный период. *Метеорология и гидрология*. 1996. № 9. С. 106 – 116.

8. Педь Д.А. Об определении дат устойчивого перехода температуры воздуха через определенные значения. *Метеорология и гидрология*. 1951. № 10. С. 38 – 39.
9. *Справочник по климату СССР. Часть II. Температура воздуха и почвы*. Л.: Гидрометеоздат, 1965.
10. Бабиченко В.Н., Бондаренко З.С., Рудышина С.Ф. Даты перехода средней суточной температуры воздуха через определенные пределы по административным областям Украины. *Тр. УкрНИГМИ*. 1980. Вып. 180. С. 12 – 21.
11. Козельцева В.Ф., Педь Д.А. Данные о весенних датах устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 0 °С, ± 5 °С по станциям западной части территории СССР. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1987. 59 с.
12. Садоков В.П., Козельцева В.Ф., Кузнецова Н.Н. Определение весенних дат устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 0, +5 °С, их прогноз и оценка. *Тр. Гидрометцентра России*. 2012. Вып. 348. С. 162 – 172.
13. Педь Д.А. Распределение ожидаемых осадков в отдельных месяцах зимнего сезона. *Тр. Гидрометцентра СССР*. 1973. Вып. 115. С. 56 – 65.
14. Фридман А.М., Короткова А.Я. Статистическая оценка влияния метеорологических факторов на сроки устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 10° весной на Украине. *Тр. УкрНИГМИ*. 1973. Вып. 124. С. 53 – 59.
15. Мирвис В.М., Мелешко В.П., Гаврилина В.М., Матюгин В.А., Львова Т.Ю. Прогноз метеорологических величин на предстоящий месяц гидродинамико-статистическим методом ГГО. I. Категорические прогнозы – результаты 26-летних серий испытаний. *Метеорология и гидрология*. 2006. № 1. С. 5 – 18.
16. Пепеляев В.А., Голодникова Н.А. Математические методы оценки риска потерь урожая и его учет при планировании структуры посевных площадей. *Кибернетика и системный анализ*. 2014. 50, № 1. С. 67 – 77.
17. Голодникова Н.А. Оптимизация структуры посевных площадей с учетом риска. *Компьютерная математика*. Киев: Ин-т кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины, 2013. Вып. 1. С. 85 – 92.
18. Koenker R. and Bassett G. Regression quantiles. *Econometrica*. 1978. 46. P. 33 – 50.

Получено 10.03.2017