

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОДОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ
СУТОЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА**
**MODELING THE ANNUAL PROBABILITY DISTRIBUTION OF DAILY AIR
TEMPERATURE VARIATIONS**

Крутских Ю.В., аспирант 2 года обучения
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет им.
Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия.

Krutskikh Yu.V., 2nd year postgraduate
student
FSBEI HE «Voronezh State University of
Forestry and Technologies named after
G.F. Morozov», Voronezh, Russia.

Камалова Н.С., кандидат физико-
математических наук, доцент, доцент
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет им.
Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия.

Kamalova N.S., PhD in Physics and
Mathematics, Docent, Associate professor
FSBEI HE «Voronezh State University of
Forestry and Technologies named after
G.F. Morozov», Voronezh, Russia.

Евсикова Н.Ю., кандидат физико-
математических наук, доцент, заведующий
кафедрой общей и прикладной физики
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет им.
Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия.

Evsikova N.Yu., PhD in Physics and
Mathematics, Docent, Head of department
FSBEI HE «Voronezh State University of
Forestry and Technologies named after
G.F. Morozov», Voronezh, Russia.

Аннотация: Вероятность возникновения катастрофических ситуаций в лесных массивах определяется процессами их взаимодействия с окружающей средой. Поэтому формирование моделей контроля за состоянием лесов невозможно без системного анализа динамики основных климатических характеристик: количества осадков и температуры в течение года. В работе предложена статистическая модель динамики вероятности наблюдения практического отсутствия суточных колебаний температуры в течение года. Для статистического моделирования температурных данных по месяцам применялся метод временных рядов. Применяемый подход может стать удобным инструментом в системах прогнозирования катастрофических ситуаций в экологических системах.

Ключевые слова: суточные колебания температуры, состояние лесных массивов, статистическое моделирование, функция Гаусса, анализ временных рядов.

Abstract: The probability of occurrence of catastrophic situations in forest areas is determined by the processes of their interaction with the environment. Therefore, the formation of models for monitoring the state of forests is impossible without a systematic analysis of the dynamics of the main climatic characteristics: precipitation and temperature throughout the year. The paper proposes a statistical model for the dynamics of the probability of observing the practical absence of daily temperature fluctuations during the year. For statistical modeling of temperature data by months,

the time series method was used. The applied approach can become a convenient tool in systems for predicting catastrophic situations in ecological systems.

Keywords: diurnal temperature fluctuations, state of forest areas, statistical modeling, Gaussian function, time series analysis.

Леса формируют основу экологической системы обитания человека [1, 2], и мониторинг их состояния важен для безопасности жизнедеятельности людей. Действующие системы прогноза пожарной опасности в лесных массивах основывают свои выводы на результатах мониторинга характеристик окружающей среды (температура, количество осадков, распределение влаги в подстилке в текущий момент времени) из-за отсутствия описывающих сами естественные экологические системы параметров, которые можно измерить приборами с контролируемой точностью [3, 4].

В настоящий момент разрабатываются способы автоматизированного контроля за состоянием лесов [5, 6]. Для создания приборов контроля за состоянием древостоев, как элементов лесного массива, исследуют динамику изменения физических свойств вещества древесины стволов или листьев, которые вызываются флуктуациями таких факторов окружающей среды, как температура или влажность [7-9]. Например, есть методики для оценки жизненного состояния растений, принцип работы которых основан на измерении характеристик газообмена в листьях (фотодыхании) [10]. Современные методики успешно практикуют использование влагомеров или томографии электрического сопротивления [3,11]. Существуют научные исследования корневой силы деревьев с использованием измерителя импульсного тока [12].

Вышеперечисленные методики формируют массивы данных для анализа динамики физических характеристик (влажности, электрического сопротивления и т.д.) в реальном времени. При этом они не содержат моделей факторов, которые вызывают эту динамику. Исследования флуктуаций внеклеточной разности потенциалов содержат попытки моделировать процессы перераспределения электрических зарядов в процессе жизнедеятельности растений или изменения влажности почвы [13,14], их результаты подтверждают тот факт, что жизнедеятельность лесных массивов определяется прежде всего активным взаимодействием древесных растений с окружающей средой. Исследованию влияния изменений температуры окружающей среды (суточных изменений при смене дня и ночи) на разность потенциалов в стволах деревьев посвящены работы [15-17]. Таким образом, системы анализа состояния и прогноза катастрофических ситуаций в лесных массивах невозможны без метеорологических наблюдений.

К настоящему моменту сформированы руководства по метеорологическим приборам и методам наблюдений (например, [18]), в которых собрано большое количество методик метеорологических измерений. Как показала практика, на репрезентативность наблюдений в этой области исследований влияют погрешности измерительных систем, ошибки при эксплуатации приборов, в том числе и грамотное обоснование временного режима измерений [19]. На современном этапе исследований выбор временного режима для проведения измерений может быть осуществлен по результатам анализа основных климатических переменных: количества осадков и температуры [20]. Сложность анализа состоит в том, что

эти переменные взаимосвязаны, а их величины флуктуируют случайно в интервалах, которые определяет смена месяцев и сезонов в течение года. При этом большинство баз данных содержит информацию об абсолютных значениях температуры, поскольку интересен вопрос о вероятности ее аномального значения. Тогда как о взаимовлиянии и динамике температуры и влажности больше информации содержит вероятность суточного изменения температуры в течение месяца в различные сезоны.

Целью данной работы является статистическое моделирование временного ряда вероятности отсутствия суточных изменений температуры в течение года в рамках формализованного моделирования с использованием гауссовских функций. Подобный подход позволит выявить закономерности динамики изменения температуры в течение года и на ее основе оценить роль подобного моделирования в области диагностики лесных пожаров.

Согласно общепринятым представлениям, на температуру окружающей среды оказывают влияние особенности движения нашей планеты вокруг Солнца (постепенная смена сезонов), интенсивность влаговыделения (например, формирование токов транспирации летом, весенние грозы и осенние дожди). Поэтому целесообразно выделить основные тенденции в динамике величины суточного изменения температуры. Например, в период с конца ноября по середину февраля следующего года наиболее вероятной является незначительная разность между средней температурой дня (полдень) и вечера (на закате), а максимальное значение разности редко превышает 3-4°C. В весенний период вероятность значительной по величине разности этих температур (свыше 5°C) станет неуклонно возрастать. Тогда как в период с середины мая по середину августа с окончательным формированием листвы и травянистого покрова величина силы токов транспирации достигают максимума, что стимулирует процессы изменения влажности окружающей среды, которая в свою очередь влияет на изменение температуры (летний сезон). Затем наступает постепенный осенний спад температуры и ее стабилизация в течение суток (осенне-зимний сезон). В рамках такого концептуального представления и с учетом стохастичности суточных изменений разности средней температуры дня и вечера моделирование ее динамики следует проводить методом временных рядов [21].

Объектом исследования для вычислительного эксперимента была выбрана вероятность наблюдения суточного изменения температуры величиной в 1°C. С учетом приборной ошибки термометра можно считать, что это практически вероятность стабилизации температуры окружающей среды в течение суток. Такой выбор обусловлен тем фактом, что подобное явление характеризует некоторую стационарность температуры окружающей среды в течение дня, которую формирует равновесие реализуемых в окружающей среде процессов.

Поскольку в каждый из описанных временных сезонов преобладает одна из тенденций, то соотношение для формализованного моделирования динамики целесообразно формировать суммой трех гауссовских функций, соответствующих осенне-зимнему $F_1(k)$, весеннему $F_2(k)$ и летнему $F_3(k)$ сезонам (k – порядковый номер месяца с начала года):

$$F(k) = F_1(k) + F_2(k) + F_3(k). \quad (1)$$

Каждая из функций $F_i(k)$ содержит три параметра A_i , a_i , σ_i , которые характеризуют максимальную вероятность наблюдения, математическое ожидание распределения

вероятности и величину дисперсии соответственно. Поэтому соотношение для формализованного моделирования запишется в форме

$$F(k) = \sum_{i=1}^3 A_i \exp\left(-\frac{(k - \alpha_i)^2}{2\sigma_i^2}\right). \quad (2)$$

Соотношение (2) является основой для определения параметров функций Гаусса для каждого из сезонов путем сопоставления результатов вычислительного эксперимента с данными мониторинга Gismeteo [20].

Для обработки данных мониторинга Gismeteo для города Воронежа была разработана программа (свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ №2020661824) по формированию распределения вероятности наблюдения разности температур по месяцам. Были обработаны данные с 2010 по 2020 год (см. рисунок 1). Определение параметров функций Гаусса осуществлялось с помощью критерия эффективности Нэша-Сатклиффа (ME) [22], который традиционно используется в экологических моделях:

$$ME = 1 - \frac{\sum_k (F_k^{emp} - F_k)^2}{\sum_k (F_k^{emp} - F_{mean})^2}, \quad (3)$$

где $F_k^{emp} = N_{in}/N$ – вероятность наблюдения разности температур дня и вечера в интервале от -1 до 1 градуса (N_{in} – число дней месяца, в которые температура практически не менялась; N – общее число дней в k -ом месяце от начала года); F_k – результаты вычислительного эксперимента (по соотношению (2)); F_{mean} – среднее значение F_k^{emp} в k -ом месяце. Величина критерия ME не может быть больше единицы. Причем чем она ближе к максимальной, тем модель больше соответствует идеальному описанию данных. Если величина $ME \rightarrow 0$, то модель соответствует качеству описания, которое совпадает со средним значением. Если величина $ME < 0$, то модель не пригодна для описания данных.

Вычислительный эксперимент состоял в том, чтобы определить параметры функций Гаусса из условия максимальности критерия Нэша-Сатклиффа (ME). Результаты за пять выборочных лет приведены в таблице 1 вместе с величиной критерия (графическое изображение сопоставления показано на рисунке 1). Поскольку величина критерия входит в доверительный интервал $ME = 0,9561 \pm 0,024$, то модель можно считать достаточно пригодной для анализа вероятности относительной стационарности температуры в течение месяца.

Таблица 1 – Результаты определения параметров функций Гаусса

Год	α_3	σ_3	A_3	α_2	σ_2	A_2	α_1	σ_1	A_1	ME
2010	5,40	0,75	12,90	1,90	1,13	32,14	12,00	2,00	51,61	0,9593
2011	6,30	0,46	23,33	1,20	1,70	45,16	12,00	1,80	67,74	0,9266
2012	7,75	0,49	12,90	1,19	2,10	51,00	11,35	0,95	60,00	0,9502
2015	6,50	0,70	19,36	1,00	1,30	64,52	11,80	1,20	51,61	0,9747
2020	6,40	1,00	9,00	0,73	1,50	71,00	11,30	0,80	67,00	0,9697

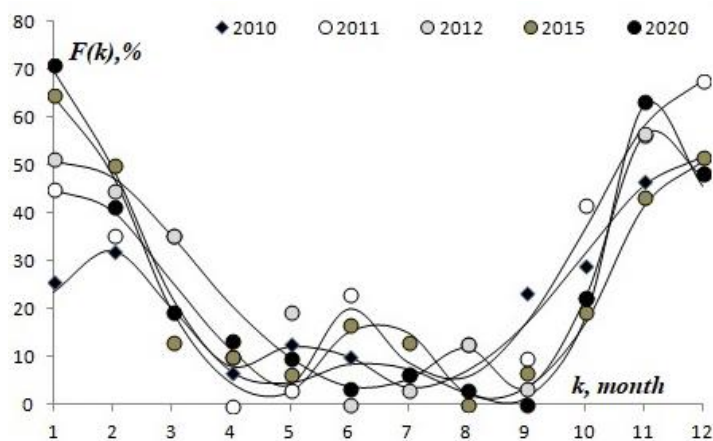


Рисунок 1 – Сопоставление результатов вычислительного эксперимента и обработки данных мониторинга Gismeteo

Таким образом, временной ряд исследуемой вероятности содержит три максимума, соответствующих каждому сезону (см. рис. 1). При этом минимумы распределения вероятности отсутствия суточных флуктуаций температуры уникальны для каждого года. Следовательно, выбор временного режима для прибора, принцип которого основан на существенной величине суточной флуктуации температуры, необходимо определять на выявлении минимума функции $F(k)$. Анализ метеорологических наблюдений показывают, что наиболее благоприятный режим для работы прибора [15] приходится на интервал с апреля по июнь и август.

По результатам вычислительного эксперимента были построены гауссовские функции для летнего и весеннего сезонов (см. рис. 2 и 3).

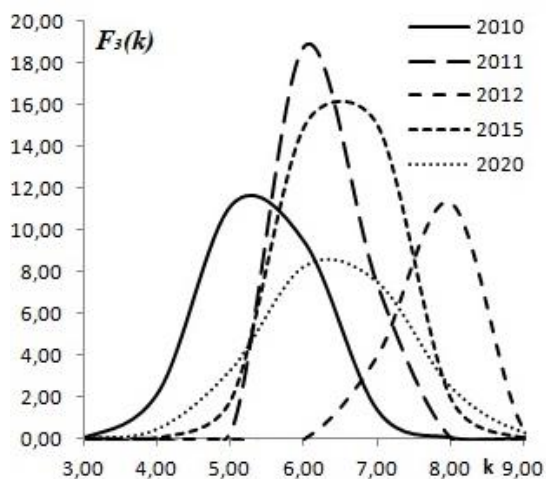


Рисунок 2 – Распределение вероятности для летнего сезона

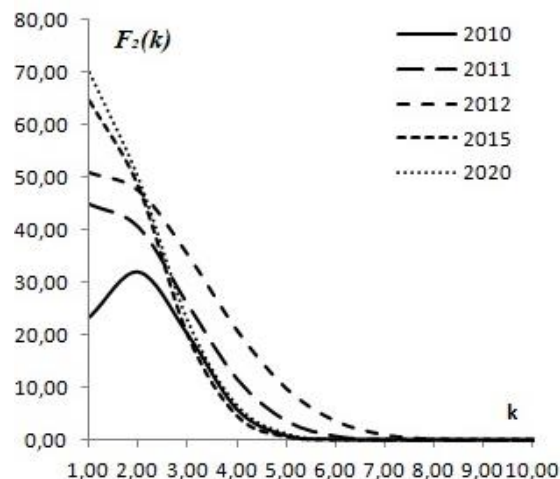


Рисунок 3 – Распределение вероятности для весеннего сезона

Очевидно, что функции $F_3(k)$ существенно изменяются год от года. Этот ожидаемый факт обусловлен тем, что стабилизацию температуры в период от середины мая до сентября во многом определяет равновесие процессов влагопереноса в окружающей среде и увеличение, а затем медленное сокращение длительности дня и, следовательно, уменьшение

потребления солнечной энергии. Закономерности этих процессов определяют запасы влаги в лесном массиве, величины токов транспирации и количество испаряемой воды, заморозки и многое другое. Таким образом, параметры модельной функции определяются целым комплексом взаимовлияющих процессов, которые в свою очередь формируют процессы предыдущего сезона.

При явной изменчивости функции $F_3(k)$ от года к году наблюдаются и некоторые общие закономерности. Например, с 2011 года до первой четверти мая вероятность отсутствия суточных флуктуаций практически равна нулю. Поскольку именно в середине мая формируется листва в южной части России, то этот факт можно объяснить влиянием на величину исследуемой вероятности процессов формирования токов транспирации и, следовательно, интенсивности испарений влаги в окружающую среду. Отклонения функции для 2010 года коррелирует с тем фактом, что именно в августе этого года в Воронеже и Воронежской области наблюдались серьезные пожары. В 2010 году уже в июле наблюдалась катастрофически низкая влажность воздуха. Поэтому в период летнего солнцестояния и в начале июля вероятность отсутствия флуктуаций для этого года практически равна нулю, тогда как в другие годы она существенно отличается от нуля (см. рис. 2).

Распределение вероятности отсутствия суточных флуктуаций температуры в весенний сезон тоже уникально для каждого года (см. рис. 3). Например, в 2012 году у функции $F_2(k)$ наблюдается самая большая дисперсия из представленных (см. табл. 1), что во многом определяет смещение наиболее вероятного наблюдения отсутствия суточных флуктуаций в летний период на конец лета и начало осени. Это предположение подтверждает явное смещение максимумов $F_3(k)$ с ростом величины дисперсии $F_2(k)$ для 2015-го, 2020-го и 2011-го года. Эту закономерность можно объяснить тем очевидным фактом, что плавное уменьшение вероятности отсутствия флуктуаций суточной температуры, говорит об относительно стационарном процессе нагревания окружающей среды и более позднем формировании лиственного и травяного покрова и, следовательно, более позднего установления процесса активного испарения.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

– распределение вероятности практического отсутствия суточных флуктуаций температуры окружающей среды можно успешно моделировать функциями Гаусса в рамках метода временных рядов;

– в результате вычислительного эксперимента по сопоставлению модели и данных мониторинга Gismeteo можно получить параметры распределения вероятности отсутствия суточных флуктуаций температуры, величина которых уникальна для каждого года;

– анализ вероятности отсутствия суточных флуктуаций во многом определяет временной режим использования приборов, принцип действия которых основан на существенной величине колебаний температуры в течение дня;

– в рамках предложенного подхода можно определять особенности взаимовлияния жизнедеятельности лесных массивов и процессов в окружающей среде;

– рассмотренный метод формализованного моделирования может стать основой для способов прогнозирования вероятности лесных пожаров в летний сезон по метеоданным весеннего сезона.

В заключение отметим, что предложенный подход открывает ряд возможностей для формирования представлений о процессах взаимодействия лесных массивов с окружающей средой, определения временных режимов приборов, принцип которых основан на процессах, вызванных суточными флуктуациями температуры, и может стать удобным инструментом для прогнозирования катастрофических ситуаций в экологических системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tooichi, E.C. Forest and environment: developments in global change ecology. / E.C. Tooichi Forestry Research and Engineering: International Journal. – 2017. – No 1(3). – P. 100-105.
2. Mori, A.S. Biodiversity and ecosystem services in forest ecosystems: a research agenda for applied forest ecology / A.S. Mori, K.P. Lertzman, L. Gustafsson // *Journal of Applied Ecology*. – 2017. – Vol. 54, Issue 1. – P. 12-27.
3. Scott, J.H. A wildfire risk assessment framework for land and resource management / J.H. Scott, M.P. Thompson, D.E. Calkin. – General Technical Report, 2013. – 83 p.
4. *Determining fuel moisture thresholds to assess wildfire hazard: A contribution to an operational early warning system* / J.P. Argañaraz, M.A. Landi, C.M. Scavuzzo, L.M. Bellis // *PLoS One*. – 2018. – Vol. 13, Issue 10. – e0204889.
5. Forest Monitoring – Assessment, Analysis and Warning System for Forest Ecosystem Status / O. Badea, D. Silaghi, I. Taut, S. Neagu, S. Leca // *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. – 2013. – Vol. 41, Issue 2. – P. 613-625.
6. Noninvasive Analysis of Tree Stems by Electrical Resistivity Tomography: Unraveling the Effects of Temperature, Water Status, and Electrode Installation / A. Ganthaler, J. Sailer, A. Bär, A. Losso, S. Mayr // *Frontiers in Plant Science*. – 2019. – Vol. 10. – 1455.
7. Царалунга, В.В. Проблема выявления и назначения в рубку аварийных деревьев на территории гослесфонда / В.В. Царалунга, А.В. Царалунга, А.В. Короткая // *Лесотехнический журнал*. – 2020. – Т. 10. – № 3 (39). – С. 86-94.
8. Холманский, А.С. Механизм генерации электрохимического потенциала дерева / А.С. Холманский, Ю.М. Кожевников // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 2016. – № 5. – С. 73-80.
9. Комплексная оценка состояния лесных генетических резерватов Свердловской области с помощью методов дистанционного и наземного обследования / С.А. Шавнин, В.А. Лебедев, В.А. Галако, В.Э. Власенко // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 2017. – № 1. – С. 104-118.
10. Bio Instruments S.R.L. 2020. – Дата обновления: 02.02.2020. – URL : <https://phyto-sensor.com/PTM-48A.ru> (Дата обращения: 14.02.2021).
11. Quantifying sapwood width for three Australian native species using electrical resistivity tomography / H. Wang, H. Guan, A. Guyot, C.T. Simmons, D.A. Lockington // *Ecohydrology*. – 2016. – Vol. 9, Issue 1. – P. 83-92.
12. Paysen, T. Monitoring Electrical Resistance in Canyon Live Oak Using a Shigometer / T. Paysen, M. Narog, M. Zavala // *Proceedings of Symposium on Ecology and Management of Oak and*

Associated Woodlands: Perspectives in the Southwestern, United States and New Mexico Symposium, April 27-30, 1992 Sierra Vista, AZ. – 1993. – P. 199-203.

13. Sap flow and daily electric potential variations in a tree trunk / D. Gibert, J.-L. Le Mouel, L. Lambs, F. Nicollin, F. Perrier // *Plant Science*. – 2006. – Vol. 171, Issue 5. – P. 572-584.

14. Electrical signal measurements in avocado trees: A potential tool for monitoring physiological responses to soil water content? / P.M. Gil, L.A. Gurovich, B. Schaffer, J. Alcayaga, R. Iturriaga // *Acta Horticulturae*. – 2011. – Vol. 889. – P. 371-378.

15. Kamalova, N.S. Justification of the device operation principle for measuring the potential difference in tree trunks / N.S. Kamalova, N.Yu. Evsikova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing Ltd, 2020. – Vol. 595, Issue 1. – 012018.

16. The possible mechanism for the water transport in the tree trunks in early spring / N.N. Matveev, A.A. Rychkov, N.S. Kamalova, N.Yu. Evsikova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 226. – 012047.

17. Сканирование электрического поля в стволах древесных растений как метод выявления жизненного состояния / Н.Ю. Евсикова, Н.Н. Матвеев, О.М. Корчагин, Н.С. Камалова, В.Ю. Заплетин // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 2008. – № 6. – С. 43-49.

18. Measurement of Meteorological Variables. Guide to Instruments and Methods of Observation. Volume I. – World Meteorological Organization (WMO), 2018. – p. 573.

19. Evaluating the Dependence between Temperature and Precipitation to Better Estimate the Risks of Concurrent Extreme Weather Events / H. Wazneh, M.A. Arain, P. Coulibaly, P. Gachon // *Advances in Meteorology*. – 2020. – Vol. 2020. – 8763631. – p. 16.

20. Gismeteo 2020. – Дата обновления: 19.01.2020. – URL : <https://www.gismeteo.ru/diary/5026/> (Дата обращения: 1.02.2021).

21. Афанасьев, В.Н. Анализ временных рядов и прогнозирование: Учебник. / В.Н. Афанасьев, М.М. Юзбашев. – Москва: Финансы и статистика, 2001. – 228 с.

22. Nash, J.E. River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principles / J.E. Nash, J.V. Sutcliffe // *Journal of Hydrology*. – 1970. – Vol. 10, Issue 3. – P. 282-290.