

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ВЕРНОСТЬ ПРЕДСКАЗАНИЯ И ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Гусейн Закир оглы Байрамов

Национальное Аэрокосмическое Агентство
Азербайджанская Республика, г. Баку, ул. С. Ахундова, AZ 1115

Аннотация. Статья посвящена исследованию проблемы влияния метеофакторов на вероятность возникновения лесных пожаров. Сформулирована частная задача исследования влияния взаимосвязи относительной влажности воздуха и удельной влажности, при которой появляется дополнительный фактор, содействующий возникновению лесных пожаров путем увеличения температуры воздуха. Составлена и решена вариационная оптимизационная задача, решение которой при некотором ограничительном условии позволяет вычислить оптимальную взаимосвязь относительной влажности и удельной влажности при которой температура воздуха достигает максимальной величины. Данный фактор может быть рассмотрен в качестве дополнительного фактора содействующего возникновению лесных пожаров.

Ключевые слова: метеофактор, оптимизация, лесные пожары, влажность воздуха, функционал цели.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 6, P. 64–67

STUDY OF THE INFLUENCE OF METEOROLOGICAL FACTORS ON THE ACCURACY OF PREDICTION AND THE ORIGIN OF FOREST FIRES

Huseyn Zakir oglu Bayramov

National Aerospace Agency
AZ 1115, Baku, S. Akhundova Str., Republic of Azerbaij

Abstract. The article is devoted to the study of the influence of meteorological factors on the probability of forest fires. A particular problem of studying the influence of the correlation between relative air humidity and specific humidity is formulated, at which an additional factor appears that contributes to the occurrence of forest fires by increasing the air temperature. A variational optimization problem is compiled and solved, the solution of which under a certain restrictive condition allows calculating the optimal correlation between relative humidity and specific humidity at which the air temperature reaches its maximum value. This factor can be considered as an additional factor contributing to the occurrence of forest fires.

Keywords: meteorological factor, optimization, forest fires, air humidity, objective functionality.

ВВЕДЕНИЕ

Как отмечается в работе [1] для предотвращения лесных пожаров необходимо усилить все противопожарные меры в отношении лесной экосистемы. Значение лесной экосистемы заключается не только в снабжении населения древесиной, но и в генерации кислорода, регулировании климата, поддержании почвы, предотвращении эрозии почвы, очищении воздуха и др. [2]. Леса играют важную роль в выживании людей и являются важным экологическим, экономическим и социальным фактором, необходимым для поддержания человеческой жизни [3]. По этой причине разработка высокоточных методов и систем для предсказания лесных пожаров имеет важное значение [4]. Используемые в настоящее время технические средства и технологии предсказания лесных пожаров включают спутниковое дистанционное зондирование, воздушную разведку, мониторинг средствами низколетящих средств, использование наблюда-

тельных вышек, беспроводных сенсорных сетей, проведение видео съемок и др.

Спутниковые методы включают проведение съемок в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах для идентификации лесных пожаров [5]. По сравнению с наблюдательными вышками [6], беспроводные измерительные сети используются сравнительно недавно и предназначены для измерения таких физических показателей как температура, влажность воздуха, давление, скорость ветра, концентрацию CO₂. Такие сети также способны детектировать дым и пламя [7].

Методы предсказания лесных пожаров включают относительно простые Пуассоновские модели учета метеофакторов [8] и методы машинного обучения [9]. В работе [10] сообщается о разработке беспроводных измерительных сетей, способных выдать информацию о состоянии лесной среды. В работах [11; 12] был показан пример использования различных моделей машинного обучения, с учетом таких факторов, как

метеорология, топография, состояние растительности и др. Вместе с тем, модели, основанные на изучении влияния метеофакторов, остаются одним из основных методов предсказания лесных пожаров. Так, например, в работе [13] был предложен вероятностный метод для предсказания лесных пожаров путем анализа взаимосвязи между тремя метеофакторами: влажностью, концентрацией кислорода, и температурой.

В общем случае, как указывается в работе [14], лесные пожары возникают в результате воздействия как природных, так и антропогенных факторов. Поэтому прогноз лесных пожаров должен включать также анализ географической среды и пространственную информацию о предыдущих лесных пожарах.

Так, например, согласно работе [15], основные факторы, влияющие на предсказание лесных пожаров, следующие:

- температура;
- атмосферное давление;
- относительная влажность;
- скорость ветра;
- осадки;
- покрытие растительностью;
- NDVI;
- содержание влаги;
- способность воспламенения;
- покатость рельефа;
- расстояние до железной дороги;
- расстояние до автодороге;
- расстояние до реки.

Несмотря на вышеприведенный расширенный список факторов учитываемых при предсказании лесных пожаров, согласно [16], основными факторами влияющими на прогнозы и предсказания лесных пожаров являются метеофакторы: температура, атмосферное давление, относительная влажность, скорость ветра и осадки. В соответствии с Китайской Системой Распространения Интегрированной Метеорологической информации (CIMISS) существует следующая связь между температурой, удельной влажностью и относительной влажностью и давлением воздуха:

$$RH = \frac{(T - 273,5)P \cdot 6,112}{[0,278(T - 273,5) + 0,622]} \exp\left(\frac{17,675SH}{SH + 243,5}\right), \quad (1)$$

где T – температура в Кельвинах; P – атмосферное давление в Паскалях; SH – удельная влажность, в кг/кг; RH – относительная влажность. В формуле (1) SH учитывает содержание влаги в воздухе. Отметим, что абсолютная влажность показывает массу водяного пара в единичном объеме воздуха и определяется как отношение абсолютной влажности воздуха к плотности насыщенного водяного пара при той же температуре, выраженное в процентах.

Насыщенный пар является таким состоянием пара, в котором количество испаряющихся молекул равно количеству конденсирующихся за единицу времени молекул.

Целью настоящей статьи является анализ взаимосвязи показателей RH , P , T , SH при которой при условии постоянства атмосферного давления среднеинтегральное значение температуры мог бы достичь максималь-

ной величины. Задачей исследования является вычисление оптимального вида взаимосвязи RH и SH при которой следовало бы ожидать появления максимальной величины температуры, при условиях наложения некоторого интегрального ограничительного условия на функциональную зависимость $RH = f(SH)$.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения поставленной задачи, в качестве базового воспользуемся выражением (1), преобразованным в следующий вид

$$\alpha = \frac{6,112}{RH} \exp\left[\frac{17,685SH}{SH + 243,5}\right], \quad (2)$$

где

$$\alpha = \left[\frac{0,278}{P} + \frac{0,622}{P(T - 273,5)} \right]. \quad (3)$$

Очевидно, что при условии $P = \text{const}$, показатель α будет полностью определяться величиной T в обратном порядке, т. е. минимум α будет означать максимум T и наоборот. Далее, введя на рассмотрение функциональную связь

$$RH = f(SH) \quad (4)$$

можно вычислить среднеинтегральную величину α , т. е.

$$\alpha_{\text{cp}} = \frac{1}{\Delta SH} \int_{SH_{\min}}^{SH_{\max}} \frac{0,112}{f(SH)} \exp\left[\frac{17,685SH}{SH + 243,5}\right] dSH. \quad (5)$$

Таким образом, задачей исследования является вычисление такой функциональной зависимости $f(SH)_{\text{opt}}$, при которой α_{cp} достиг бы минимума, а следовательно температура воздуха достигла бы максимума. Следовательно, поиску подлежит такая функциональная связь $f(SH)_{\text{opt}}$, которая может быть охарактеризована как дополнительный фактор, содействующий возникновению лесных пожаров.

Для решения поставленной выше задачи наложим на функцию (4) следующее интегральное ограничительное условие

$$\int_{SH_{\min}}^{SH_{\max}} f(SH) dSH = C; C = \text{const}. \quad (7)$$

Физический смысл условия (7) заключается в том, что при изменении SH в пределах $(SH_{\min} - SH_{\max})$ суммарная величина RH остается постоянной величиной.

Чисто математически условие (7) указывает на необходимость выбора функции $f(SH)_{\text{opt}}$ в пределах некоторого подкласса входящего в класс непрерывных и дважды дифференцируемых функций, который формируется их числа функций $f(SH)$, удовлетворяющих условию (7).

С учетом выражений (5) и (7) составим целевой функционал F безусловной вариацию

$$F = \frac{1}{\Delta SH} \int_{SH_{\min}}^{SH_{\max}} \frac{0,112}{f(SH)} \exp\left[\frac{17,685SH}{SH + 243,5}\right] dSH +$$

$$+\lambda \left[\int_{SH \min}^{SH \max} f(SH) dSH - C \right], \quad (8)$$

где λ – множитель Лагранжа.

Решение задачи (8) согласно [17] удовлетворяет условию:

$$d \frac{\left\{ \frac{0,112}{f(SH)} \exp \left[\frac{17,685 SH}{SH + 243,5} \right] + \lambda f(SH) \right\}}{df(SH)} = 0. \quad (9)$$

Из условия (9) получаем

$$-\frac{a_1}{\Delta SH \cdot RH^2(SH)} \left(\frac{a_2 SH}{SH + a_2} \right) + \lambda = 0. \quad (10)$$

В выражении (10) для удобства записи приняты следующие обозначения: $a_1 = 6,112$; $a_2 = 17,675$; $a_3 = 243,5$.

Из выражения (10) находим

$$RH(SH) = \sqrt{\frac{a_1 a_2 SH}{\lambda (SH + a_2) \Delta SH}}. \quad (11)$$

При решении (11) целевой функционал F достигает минимума. Это легко проверить по признаку Лагранжа, вычислив производную (10) по искомой функции, результат которой оказывается положительной величиной.

Для вычисления множителя Лагранжа λ можно воспользоваться выражениями (7) и (11). Учитывая (11) в (7) получаем

$$\int_{SH \min}^{SH \max} \sqrt{\frac{a_1 a_2 SH}{\lambda (SH + a_2) \Delta SH}} dSH = C. \quad (12)$$

Из выражения (12) находим

$$\lambda = \left[\frac{\sqrt{a_1 a_2}}{C \sqrt{\Delta SH}} \int_{SH \min}^{SH \max} \sqrt{\frac{SH}{(SH + a_2)}} dSH \right]^2. \quad (13)$$

Учитывая выражение (13) в (11) окончательно получим

$$RH(SH) = \frac{C \sqrt{\frac{SH}{(SH + a_2)}}}{\int_{SH \min}^{SH \max} \sqrt{\frac{SH}{(SH + a_2)}} dSH}. \quad (14)$$

Таким образом, при условиях $P = \text{const}$, и ограничительном условии (7) функциональная зависимость (14) может быть рассмотрен в качестве дополнительного фактора, содействующего возникновению лесных пожаров.

ОБСУЖДЕНИЕ

Подробно рассмотрены основные методы и технические средства предсказания лесных пожаров, а также факторы содействующие возникновению возгораний в лесу. Сформулирована задача исследования воздействия вида взаимосвязи относительной влажности воздуха и удельной влажности, при котором

появляется дополнительный стимул для возникновения лесных пожаров в виде максимизации температуры воздуха. Составлена и решена вариационная оптимизационная задача, учитывающая принятое интегральное ограничительное условие, а также условие постоянства атмосферного давления. Решение задачи оптимизации при указанных условиях позволило вычислить оптимальную взаимосвязь относительной влажности и удельной влажности при которой температура воздуха достигает максимальной величины. Отмечено, что вычисленная взаимосвязь RH и SH может быть рассмотрена в качестве дополнительного фактора, воздействующего на вероятность возникновения лесных пожаров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Метеорологические факторы, а также вид взаимосвязи между этими факторами являются основными параметрами, влияющими на вероятность появления лесных пожаров.

1. Выявлена некоторая взаимосвязь между RH и SH при которой при определенных ограничительных условиях температура воздуха может в среднеинтегральном смысле достичь максимума.

2. Указанная взаимосвязь между RH и SH может быть рассмотрена в качестве дополнительного фактора появления лесных пожаров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Feurdean, A.; Vannière, B.; Finsinger, W.; Warren, D.; Connor, S. C.; Forrest, M.; Liakka, J.; Panait, A.; Werner, C.; Andrić, M.; et al. Fire hazard modulation by long-term dynamics in land cover and dominant forest type in eastern and central Europe. *Biogeosciences* 2020, 17, 1213–1230.
2. Földi, L.; Kuti, R. Characteristics of forest fires and their impact on the environment. *Acad. Appl. Res. Mil. Public Manag. Sci.* 2016, 15, 5–17.
3. Hanewinkel, M.; Hummel, S.; Albrecht, A. Assessing natural hazards in forestry for risk management: A review. *Eur. J. For. Res.* 2011, 130, 329–351.
4. Tuyen, T. T.; Jaafari, A.; Yen, H. P. H.; Nguyen-Thoi, T.; van Phong, T.; Nguyen, H. D.; van Le, H.; Phuong, T. T. M.; Nguye, S. H.; Prakash, I.; et al. Mapping Forest Fire Susceptibility Using Spatially Explicit Ensemble Models Based On The Locally Weighted Learning Algorithm. *J. Abbr.* 2021, 63, 101292.
5. Yuan, C.; Zhang, Y.; Liu, Z. A survey on technologies for automatic forest fire monitoring, detection, and fighting using unmanned aerial vehicles and remote sensing techniques. *Can. J. For. Res.* 2015, 45, 783–792.
6. Sun, F.; Yang, Y.; Lin, C.; Liu, Z.; Chi, L. Forest fire compound feature monitoring technology based on infrared and visible binocular vision. *J. Phys. Conf. Ser.* 2021, 1792, 012022.
7. Singh, P.K.; Sharma, A. An insight to forest fire detection techniques using wireless sensor networks. In *Proceedings of the International Conference on Signal Processing, Computing and Control*, Solan, India, 21–23 September 2017.
8. Jiang, Y.; Zhuang, Q.; Mandallaz, D. Modeling large fire frequency and burned area in canadian

terrestrial ecosystems with poisson models. *Environ. Model. Assess.* 2012, 17, 483–493.

9. Stojanova, D.; Panov, P.; Kobler, A.; Džeroski, S.; Taškova, K.; Katerina, T. Learning to predict forest fires with different data mining techniques. In *Proceedings of the Conference on Data Mining and Data Warehouses*, Barcelona, Spain, 12–15 December 2006.

10. Dampage, U.; Bandaranayake, L.; Wanasinghe, R.; Kottahachchi, K.; Jayasanka, B. Forest fire detection system using wireless sensor networks and machine learning. *Sci. Rep.* 2022, 12, 46.

11. Ghaderizadeh, S.; Abbasi-Moghadam, D.; Sharifi, A.; Tariq, A.; Qin, S. Multiscale dual-branch residual spectral-spatial network with attention for hyperspectral image classification. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 2022, 15, 5455–5467.

12. Pang, Y.; Li, Y.; Feng, Z.; Feng, Z.; Zhao, Z.; Chen, S.; Zhang, H. Forest Fire Occurrence Prediction in China Based on Machine Learning Methods. *Remote Sens.* 2022, 14, 5546.

13. Zhang, F.; Zhao, P.; Xu, S.; Wu, Y.; Yang, X.; Zhang, Y. Integrating multiple factors to optimize watchtower deployment for wildfire detection. *Sci. Total Environ.* 2020, 737, 139561.

14. Román-Cuesta, R. M.; Gracia, M.; Retana, J. Environmental and human factors influencing fire trends in ENSO and non-ENSO years in tropical Mexico. *Ecol. Appl.* 2003, 13, 1177–1192.

15. Cao Y., Zhou X., Yu Y., Rao S., Wu Y. Forest fire prediction based on time series networks and remote sensing images // *Forests* 2024. 15. 1221.

16. Tošić, I.; Mladjan, D.; Gavrilov, M. B.; Živanović, S.; Radaković, M. G.; Putniković, S.; Petrović, P.; Mistrđželović, I. Potential influence of meteorological variables on forest fire risk in Serbia during the period 2000–2017. *Open Geosci.* 2019, 11, 414–425.

17. Эльсгольц Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М. : Наука, 1974. С. 432.

REFERENCE

1. Feurdean, A.; Vannière, B.; Finsinger, W.; Warren, D.; Connor, S. C.; Forrest, M.; Liakka, J.; Panait, A.; Werner, C.; Andrić, M.; et al. Fire hazard modulation by long-term dynamics in land cover and dominant forest type in eastern and central Europe. *Biogeosciences* 2020, 17, 1213–1230.

2. Földi, L.; Kuti, R. Characteristics of forest fires and their impact on the environment. *Acad. Appl. Res. Mil. Public Manag. Sci.* 2016, 15, 5–17.

3. Hanewinkel, M.; Hummel, S.; Albrecht, A. Assessing natural hazards in forestry for risk management: A review. *Eur. J. For. Res.* 2011, 130, 329–351.

4. Tuyen, T. T.; Jaafari, A.; Yen, H. P. H.; Nguyen-Thoi, T.; van Phong, T.; Nguyen, H. D.; van Le, H.; Phuong, T. T. M.; Nguye, S. H.; Prakash, I.; et al. Mapping Forest Fire Susceptibility Using Spatially

Explicit Ensemble Models Based On The Locally Weighted Learning Algorithm. *J. Abbr.* 2021, 63, 101292.

5. Yuan, C.; Zhang, Y.; Liu, Z. A survey on technologies for automatic forest fire monitoring, detection, and fighting using unmanned aerial vehicles and remote sensing techniques. *Can. J. For. Res.* 2015, 45, 783–792.

6. Sun, F.; Yang, Y.; Lin, C.; Liu, Z.; Chi, L. Forest fire compound feature monitoring technology based on infrared and visible binocular vision. *J. Phys. Conf. Ser.* 2021, 1792, 012022.

7. Singh, P. K.; Sharma, A. An insight to forest fire detection techniques using wireless sensor networks. In *Proceedings of the International Conference on Signal Processing, Computing and Control*, Solan, India, 21–23 September 2017.

8. Jiang, Y.; Zhuang, Q.; Mandallaz, D. Modeling large fire frequency and burned area in canadian terrestrial ecosystems with poisson models. *Environ. Model. Assess.* 2012, 17, 483–493.

9. Stojanova, D.; Panov, P.; Kobler, A.; Džeroski, S.; Taškova, K.; Katerina, T. Learning to predict forest fires with different data mining techniques. In *Proceedings of the Conference on Data Mining and Data Warehouses*, Barcelona, Spain, 12–15 December 2006.

10. Dampage, U.; Bandaranayake, L.; Wanasinghe, R.; Kottahachchi, K.; Jayasanka, B. Forest fire detection system using wireless sensor networks and machine learning. *Sci. Rep.* 2022, 12, 46.

11. Ghaderizadeh, S.; Abbasi-Moghadam, D.; Sharifi, A.; Tariq, A.; Qin, S. Multiscale dual-branch residual spectral-spatial network with attention for hyperspectral image classification. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 2022, 15, 5455–5467.

12. Pang, Y.; Li, Y.; Feng, Z.; Feng, Z.; Zhao, Z.; Chen, S.; Zhang, H. Forest Fire Occurrence Prediction in China Based on Machine Learning Methods. *Remote Sens.* 2022, 14, 5546.

13. Zhang, F.; Zhao, P.; Xu, S.; Wu, Y.; Yang, X.; Zhang, Y. Integrating multiple factors to optimize watchtower deployment for wildfire detection. *Sci. Total Environ.* 2020, 737, 139561.

14. Román-Cuesta, R. M.; Gracia, M.; Retana, J. Environmental and human factors influencing fire trends in ENSO and non-ENSO years in tropical Mexico. *Ecol. Appl.* 2003, 13, 1177–1192.

15. Cao Y., Zhou X., Yu Y., Rao S., Wu Y. Forest fire prediction based on time series networks and remote sensing images// *Forests* 2024. 15. 1221.

16. Tošić, I.; Mladjan, D.; Gavrilov, M. B.; Živanović, S.; Radaković, M. G.; Putniković, S.; Petrović, P.; Mistrđželović, I. Potential influence of meteorological variables on forest fire risk in Serbia during the period 2000–2017. *Open Geosci.* 2019, 11, 414–425.

17. Elsgolc L. E. Differencialnye uravneniya i variacionnoe ischislenie. M. : Nauka, 1974. S. 432.

© Байрамов Г. 3., 2025