

DOI: 10.25629/SMW.2026.01.07

УДК: 519.876.5, 519.218.23

Прус М.Ю., Московский государственный технологический университет «Станкин»

Зверев А.П., Академия государственной противопожарной службы МЧС России

Прус Ю.В., Академия государственной противопожарной службы МЧС России;

Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России

Prus M.Yu., Moscow State Technological University "Stankin"

Zverev A.P., Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia

Prus Yu.V., Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia;
All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies of the Ministry of Emergency Situations of Russia

Моделирование динамики развития пожаров в системе «торфяник-разогрев-возгорание-пожар» по каскадному сценарию

Аннотация

Обсуждается подход к прогнозированию динамики пожарно-экологического состояния торфяников в перспективных территориальных системах автоматизированного мониторинга, основанный на дискретно-событийном моделировании событий в системе «торфяник-разогрев-возгорание-пожар» по каскадному сценарию. Особенность построенной общей модели состоит в применении трехпараметрических распределений Вейбулла при описании изменения интенсивностей переходов между состояниями для рассматриваемого неоднородного марковского процесса. Предложены оригинальные приемы моделирования с учетом данных текущего мониторинга о параметрах состояния и кинетике процессов, а также предполагаемых результатов целенаправленных воздействий, позволяющие найти локальные решения стохастических дифференциальных уравнений. Обоснованы показатели, связанные с каскадным характером рассматриваемого сценария событий, позволяющие проводить анализ своевременности, безопасности и эффективности мероприятий, рекомендуемых к выполнению на различных этапах развития торфяных пожаров.

Ключевые слова

моделирование, пожар, прогнозирование, торфяник, развитие пожара, стохастический процесс

Modeling fire development dynamics in a peatland-heating-ignition-fire system using a cascade scenario

Abstract

This paper discusses an approach to forecasting the fire and ecological status of peatlands in prospective territorial automated monitoring systems. This approach is based on discrete-event modeling of events in the peatland-heating-ignition-fire system using a cascade scenario. A distinctive feature of the developed general model is the use of three-parameter Weibull distributions to describe changes in the intensities of state transitions for the heterogeneous Markov process under consideration. Original modeling techniques are proposed, taking into account current monitoring data on state parameters and process

kinetics, as well as the expected results of targeted interventions, allowing for finding local solutions to stochastic differential equations. Indicators related to the cascading nature of the considered event scenario are substantiated, allowing for an analysis of the timeliness, safety, and effectiveness of measures recommended for implementation at various stages of peat fire development.

Keywords

modeling, fire, forecasting, peatland, fire development, stochastic process

1. Введение

Вызванное глобальными изменениями климатических условий, а также непродуманной хозяйственной деятельностью нарушение углеродного баланса лесных экосистем приводит к резкому возрастанию уровня пожарной опасности. Среди природных пожаров по за частую недооцененному масштабу негативных экологических, социальных, климатических и иных последствий выделяется особый вид – торфяные пожары, обусловленные сложными и недостаточно исследованными процессами возгорания торфяников.

Торфяные пожары представляют собой серьезную угрозу для устойчивого развития экологических, природных, социальных и технических систем, требующую решения комплекса проблем, связанных с созданием организационно-технических систем, эффективно выполняющих функции обеспечения пожарно-экологической безопасности. Построение территориальных систем пожарно-экологической безопасности невозможно без преодоления противоречия между имеющимися научно-техническими и технологическими предпосылками, с одной стороны и применяемыми в настоящее время методами, и средствами предотвращения, контроля и тушения торфяных пожаров [1].

Наиболее перспективным направлением развития новых инструментальных средств и методов непрерывного мониторинга торфяников представляется проектирование автоматизированных систем непрерывного мониторинга пожарно-экологического состояния территорий с торфяниками [1–3]. Эффективность автоматизированных систем мониторинга в значительной степени определяется построением научно обоснованного математического и информационного обеспечения, обеспечивающего анализ актуальных угроз, достоверность прогнозирования развития опасных процессов, генерацию алгоритмов поддержки оптимального планирования и реализации мероприятий как при долгосрочном, так и при оперативном управлении имеющимися финансовыми, материальными, трудовыми и техническими ресурсами, доступными силами и средствами.

Исследование специфики опасных процессов, способных привести к масштабным природным пожарам на территориях с торфяниками приводит к обоснованному предположению о применимости подходов к моделированию опасных процессов, развивающихся по каскадным сценариям [4–7]. Предложенный в [8] подход к моделированию динамики развития инцидентов основан на наборе процедур представления каскадных сценариев развития опасных процессов в различных предметных областях, включая моделирование развития природных катастроф.

2. Общая модель системы «торфяник–разогрев–возгорание–пожар»

В статье рассмотрен метод прогнозирования пожарно-экологического состояния территорий с торфяниками, основанный на моделировании каскадных сценариев развития процессов подготовки очага возгорания торфяника при определенных условиях. Для моделирования процессов возникновения торфяных пожаров построена дискретно-событийная модель для системы «торфяник–разогрев–возгорание–пожар» (Т–Р–В–П).

Динамика переходов в системе Т–Р–В–П качественно изменяется по мере возрастания степени пожарной опасности состояний, принадлежащим соответственно к смежным стратам. Адекватное описание возможных сценариев развития последовательности событий требует обоснования законов изменения интенсивностей переходов в системе Т–Р–В–П и оценки определяющих их параметров.

В связи с вышеуказанными обстоятельствами, необходимо введение следующих предположений:

- при развитии возможного сценария в последовательности событий выделяются отдельные этапы с соответствующими состояниями системы Т–Р–В–П,
- изменение интенсивностей переходов между состояниями описывается параметрическими функциями от времени.

На первом этапе в системе Т–Р–В–П возможен переход из начального в некоторые состояния, характеризующиеся различными потенциальными опасностями. При этом может быть принято предположение о неизменных интенсивностях соответствующих переходов, обусловленных рассматриваемыми стационарными процессами.

При определении набора дальнейших возможных переходов в системе Т–Р–В–П ограничимся рассмотрением ветви графа, обусловленной формированием условий саморазогрева торфяника, исключая из рассмотрения ветви, непосредственно связанные с обводнением торфяника, а также с его осушением без нагрева.

На втором этапе дальнейшее разветвление последовательности событий по рассматриваемому неблагоприятному сценарию связано с развитием в локальных объемах торфяника потенциально опасных биохимических и химических процессов, приводящих к формированию состояния S_{He} «активность микроорганизмов» и последующего состояния S_{Sm} «термическое разложение торфяника».

При этом состояния «активность микроорганизмов» и «термическое разложение» могут рассматриваться как агрегированные либо детализированы с учетом конкретного предшествующего состояния, включенного в агрегированное состояние «саморазогрев». При неопределенной информации о текущем состоянии и затрудненной детализации переходов, следует предусмотреть возможность описания переходов между состояниями, включенными в агрегированное состояние «саморазогрев».

Качественное отличие динамики второго этапа от первого связано с нестационарной интенсивностью переходов [8]. При этом возможен некоторый временной интервал задержки развития процесса, связанный с формированием предпосылок дальнейшего развития событий по неблагоприятному сценарию. Например, при переходах из состояния «начальное» в одно из состояний «саморазогрев», или между состояниями «активность микроорганизмов» и «термическое разложение».

Дальнейшее разветвление по определенному неблагоприятному сценарию последовательности событий на третьем этапе приводит к скачкообразной трансформации опасных процессов локального саморазогрева, сопровождающиеся тлением и образованием полукокса, приводящие к резкому росту интенсивности энергетического потока и достижению состояния S_F «формирование первичного очага торфяного пожара». Воздействие на соседние объемы торфяника приводит к переходу в состояние S_{Bu} «латентное развитие локального очага торфяного пожара» либо S_{Pr} «латентное распространение очагов торфяного пожара».

Четвертый этап связан с формированием ЧС с дальнейшим возрастанием расширением масштаба и распространения последствий в пространстве и времени. Последующее развитие процессов, связанных с выходом торфяного пожара на поверхность, приводит в зависимости от распространения одиночного либо формирования множества очагов торфяного пожара к соответствующим переходам в состояния S_{PF} «распространение лесоторфяного пожара» или S_{MF} «многоочаговый лесоторфяной пожар».

Моделирование развертывания последовательности событий по различным сценариям состоит в описании динамики изменения интенсивностей переходов между смежными состояниями на основе трехпараметрического распределения Вейбулла. Соответствующие распределения изменения интенсивностей для возможных переходов между смежными состояниями в системе Т–Р–В–П полностью определяются тремя параметрами – коэффициентами масштаба, формы и сдвига.

Интенсивности возможных переходов между состояниями смежных уровней в системе Т–Р–В–П, с учетом вышесказанного, могут быть представлены в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{Dr} = \frac{1}{\eta_{Dr}}, \lambda_{He} = \frac{1}{\eta_{He}}, \lambda_{Ir} = \frac{1}{\eta_{Ir}}, \\ \lambda_{Sm/He} = \beta_{Sm/He} \frac{(t-\theta_{Sm/He})^{\beta_{Sm/He}-1}}{\eta_{Sm/He}^{\beta_{Sm/He}}}, \\ \lambda_{F/Sm} = \beta_{F/Sm} \frac{(t-\theta_{F/Sm})^{\beta_{F/Sm}-1}}{\eta_{F/Sm}^{\beta_{F/Sm}}}, \\ \lambda_{Bu/F} = \beta_{Bu/F} \frac{(t-\theta_{Bu/F})^{\beta_{Bu/F}-1}}{\eta_{Bu/F}^{\beta_{Bu/F}}}, \lambda_{Pr/F} = \beta_{Pr/F} \frac{(t-\theta_{Pr/F})^{\beta_{Pr/F}-1}}{\eta_{Pr/F}^{\beta_{Pr/F}}}, \\ \lambda_{PF/Bu} = \beta_{PF/Bu} \frac{(t-\theta_{PF/Bu})^{\beta_{PF/Bu}-1}}{\eta_{PF/Bu}^{\beta_{PF/Bu}}}, \lambda_{MF/Pr} = \beta_{MF/Pr} \frac{(t-\theta_{MF/Pr})^{\beta_{MF/Pr}-1}}{\eta_{MF/Pr}^{\beta_{MF/Pr}}}. \end{array} \right. \quad (2)$$

где коэффициенты $\eta_{*/\dots}$, $\theta_{*/\dots}$ и $\beta_{*/\dots}$ определяют масштаб, сдвиг и форму для функции зависимости интенсивностей λ_* переходов между состояниями смежных страт (обозначенных $*/\dots$) от времени.

4. Моделирование с учетом данных текущего мониторинга

Описание возможных сценариев развития последовательности событий в системе Т–Р–В–П в значительной степени упрощается при разграничении общих сценариев возникновения и развития разнообразных критических ситуаций на этапы, характеризующиеся определенными уровнями текущей опасности и возможностями дальнейшего формирования переходов к более опасным состояниям, динамикой и длительностью развития опасных процессов.

Предлагаемый авторами настоящей статьи подход к формированию основ математического обеспечения перспективных систем автоматизированного мониторинга пожарно-экологического состояния на территориях с торфяниками заключается в эффективном использовании поступающих в информационно-аналитическую систему данных непрерывного мониторинга о текущем состоянии и о кинетике процессов, влияющих на интенсивности переходов между рассматриваемыми смежными состояниями. Представляется обоснованным применение разработанного в [8] метода прогнозирования на основе так называемых локальных решений системы уравнений (1), описывающих переходы в критические состояния системы Т–Р–В–П.

Неблагоприятные сценарии развития критических состояний в системе Т–Р–В–П представляют последовательность переходов между состояниями смежных этапов с нарастанием интенсивности опасных процессов и повышением уровня угроз до возникновения критического состояния катастрофического характера, с интенсивным воздействием опасных факторов на население и иные расположенные в зонах поражения объекты, с формированием ЧС значительного масштаба.

При своевременном реагировании оперативных подразделений и эффективных целенаправленных действиях аварийно-спасательных подразделений служб экстренного реагирования возникают возможности подавления опасных процессов и их проявлений, а также торможения развития событий по неблагоприятному сценарию, с последующим снижением уровня опасности вплоть до нейтрализации угроз и ликвидации негативных последствий инцидента.

Значительному повышению оперативности реагирования экстренных служб способствует применение информационно-аналитических систем поддержки управления безопасностью, обеспечивающих непрерывность мониторинга, а также идентификацию инцидентов и оперативное информирование в реальном времени о развитии кризисной ситуации.

Поэтому представляет интерес моделирование динамики развития опасных событий при инцидентах, основанное на получении отдельных локальных решений системы дифференциальных уравнений Колмогорова (1) с заданными параметрами распределений Вейбулла (2), описывающих переходы между принадлежащими к смежным этапам состояниями системы Т–Р–В–П.

Как следует из графа состояний (рисунок 1), вектор состояния системы Т–Р–В–П в общем случае содержит 10 компонент. Вместе с тем, при рассмотрении локальных решений строится вектор состояний с минимальным количеством компонент, соответствующим рассматриваемым переходным процессам и состояниям.

Результаты моделирования первого этапа развития в системе Т–Р–В–П событий при переходах от состояния «норма» к одному из состояний, агрегированных в страте «нарушение равновесия»:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{Dr}(t) = 1 - e^{-\lambda_{Dr}t} = 1 - e^{-\frac{1}{\eta_{Dr}}t} \approx \frac{1}{\eta_{Dr}}t, \\ P_{He}(t) = 1 - e^{-\lambda_{He}t} = 1 - e^{-\frac{1}{\eta_{He}}t} \approx \frac{1}{\eta_{He}}t, \\ P_{Ir}(t) = 1 - e^{-\lambda_{Ir}t} = 1 - e^{-\frac{1}{\eta_{Ir}}t} \approx \frac{1}{\eta_{Ir}}t, \\ \\ P_N(t) = e^{-\left(\frac{1}{\eta_{Dr}} + \frac{1}{\eta_{He}} + \frac{1}{\eta_{Ir}}\right)t}, \\ \\ P_A(t) = 1 - e^{-\left(\frac{1}{\eta_{Dr}} + \frac{1}{\eta_{He}} + \frac{1}{\eta_{Ir}}\right)t} \approx \left(\frac{1}{\eta_{Dr}} + \frac{1}{\eta_{He}} + \frac{1}{\eta_{Ir}}\right)t, \\ \quad \left(\text{при } \left(\frac{1}{\eta_{Dr}} + \frac{1}{\eta_{He}} + \frac{1}{\eta_{Ir}}\right)t \ll 1\right). \end{array} \right. \quad (3)$$

При моделировании динамики состояния системы Т–Р–В–П решения уравнений (3) определяют компоненты текущего вектора:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{P} = \{P_N, P_{Dr}, P_{He}, P_{Ir}\}, \\ P_N + P_{Dr} + P_{He} + P_{Ir} = 1. \end{array} \right. \quad (4)$$

При поступлении информации от системы мониторинга о переходе в определенное состояние остальные три компоненты вектора состояния системы Т–Р–В–П приравниваются к нулю, либо исключаются из дальнейшего рассмотрения развития пожарно-экологической обстановки.

Приведем пример моделирования динамики второго этапа развития событий в системе Т–Р–В–П. В случае имеющейся информации от средств мониторинга о характерных признаках, отличающих стадии биохимических и химических процессов саморазогрева, для соответствующих коэффициентов сдвига предполагаем $\theta_* = 0$.

Тогда результаты моделирования динамики перехода от первой стадии биохимических процессов ко второй стадии химических процессов саморазогрева можно представить в виде уравнений, описывающих текущие значения соответствующих вероятностей:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{He}(t) = e^{-\left(\frac{t-\theta_{Sm/He}}{\eta_{Sm/He}}\right)^{\beta_{Sm/He}}}, \\ P_{Sm/He}(t) = 1 - P_{He}(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\theta_{Sm/He}}{\eta_{Sm/He}}\right)^{\beta_{Sm/He}}}. \end{array} \right. \quad (5)$$

При поступлении от системы мониторинга данных, свидетельствующих о завершении перехода ко второй стадии химических процессов саморазогрева, начальная вероятность данного состояния принимается равной единице и вследствие этого динамика перехода к формированию первичного очага торфяного пожара представляется в виде уравнений, описывающих текущие значения соответствующих вероятностей:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{Sm}(t) = e^{-\left(\frac{t-\theta_{F/Sm}}{\eta_{F/Sm}}\right)^{\beta_{F/Sm}}}, \\ P_{F/Sm}(t) = 1 - P_{Sm}(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\theta_{F/Sm}}{\eta_{F/Sm}}\right)^{\beta_{F/Sm}}}. \end{array} \right. \quad (6)$$

Дальнейшее моделирование динамики третьего этапа развития событий в системе Т–Р–В–П проводится на основе уравнений, описывающих текущие значения вероятностей возникновения латентных торфяных пожаров – одноочагового или многоочагового:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{Bu/F}(t) \approx W_{L/F}(t) \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{t-\theta_{Bu/F}}{\eta_{Bu/F}}\right)^{\beta_{Bu/F}}} \right), \\ P_{Pr/F}(t) \approx W_{L/F}(t) \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{t-\theta_{Pr/F}}{\eta_{Pr/F}}\right)^{\beta_{Pr/F}}} \right), \\ P_{Bu/F}(t) + P_{Pr/F}(t) \approx 1 - e^{-\left\{ \left(\frac{t-\theta_{Bu/F}}{\eta_{Bu/F}}\right)^{\beta_{Bu/F}} + \left(\frac{t-\theta_{Pr/F}}{\eta_{Pr/F}}\right)^{\beta_{Pr/F}} \right\}}. \end{array} \right. \quad (7)$$

При составлении системы (7) используется введенная в [8] для подобных представлений решения уравнений вспомогательная функция, принимающая вид:

$$W_{L/F}(t) = \frac{\left(1 - e^{-\left\{ \left(\frac{t-\theta_{Bu/F}}{\eta_{Bu/F}}\right)^{\beta_{Bu/F}} + \left(\frac{t-\theta_{Pr/F}}{\eta_{Pr/F}}\right)^{\beta_{Pr/F}} \right\}} \right)}{\left(1 - e^{-\left(\frac{t-\theta_{Bu/F}}{\eta_{Bu/F}}\right)^{\beta_{Bu/F}}} \right) + \left(1 - e^{-\left(\frac{t-\theta_{Pr/F}}{\eta_{Pr/F}}\right)^{\beta_{Pr/F}}} \right)}. \quad (8)$$

При моделировании динамики четвертого этапа развития событий в системе Т–Р–В–П рассматриваются два основных сценария, обусловленные развитием и выходом на поверхность одиночного либо множества очагов торфяного пожара и соответствующим переходом в состояния S_{PF} «распространение лесоторфяного пожара» или S_{MF} «многоочаговый лесоторфяной пожар». Если имеется информация о реализации конкретного сценария, моделирование производится на основе выбора соответствующей системы уравнений.

Сценарию, обусловленному развитием и выходом на поверхность одиночного очага торфяного пожара, соответствует система уравнений:

$$\begin{cases} P_{Bu}(t) = e^{-\left(\frac{t-\theta_{PF/Bu}}{\eta_{PF/Bu}}\right)^{\beta_{PF/Bu}}}, \\ P_{PF}(t) = 1 - P_{Bu}(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\theta_{PF/Bu}}{\eta_{PF/Bu}}\right)^{\beta_{PF/Bu}}}. \end{cases} \quad (9)$$

Сценарию, обусловленному развитием и выходом на поверхность многоочагового торфяного пожара, соответствует система уравнений:

$$\begin{cases} P_{Pr}(t) = e^{-\left(\frac{t-\theta_{MF/Pr}}{\eta_{MF/Pr}}\right)^{\beta_{MF/Pr}}}, \\ P_{MF}(t) = 1 - P_{Pr}(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\theta_{MF/Pr}}{\eta_{MF/Pr}}\right)^{\beta_{MF/Pr}}}. \end{cases} \quad (10)$$

Таким образом, локальные решения систем уравнений Колмогорова, полученные для избранных сценариев развития аварийной ситуации, позволяют проводить численное моделирование и оценку вероятностных характеристик возникновения критических состояний.

Теоретические исследования процессов перехода между смежными состояниями саморазогрева, формирования первичного очага пожара и его латентного распространения с выходом на поверхность для различных краевых условий представляет достаточно трудоемкую задачу, которая может быть решена только при введении ряда упрощающих предположений [9]. К настоящему времени достаточно точное и соответствующее потребностям информационно-аналитического обеспечения управления при оперативном реагировании на события описание динамики таких переходов, с учетом разнообразных условий, на основе экспериментальных либо статистических данных также невозможно.

Поэтому создание экспертных методик для определения коэффициентов распределений Вейбулла, описывающих динамику вероятности перехода из состояния пожара во взрыв при различных реально возможных условиях не только целесообразно для решения задач поддержки управления при оперативном реагировании на инциденты, но и представляет значительный интерес с точки зрения теории горения и взрыва [10].

5. Прогнозирование кризисных ситуаций и эффективности реагирования

Рассмотренная стохастическая модель и предлагаемая общая методика ее применения позволяет прогнозировать динамику развития критических состояний по каскадному сценарию, а также отражает вероятностные характеристики своевременности и эффективности возможных воздействий при оперативном реагировании на опасные события.

Локальные решения, подобные (5–10), достаточно адекватно описывают динамику развития кризисных ситуаций в случаях, когда возможно ограничиться рассмотрением событий,

связанных с возникновением кризисной ситуации общего типа, обусловленной развитием реализовавшегося на предшествующем этапе иницирующего события. Практическим приложением данного решения может быть основанная на нем процедура определения «окна возможностей» - временного интервала, в течение которого целесообразно осуществление деятельности по подавлению либо локализации иницирующего события и предотвращению последующих событий, приводящих к развитию ситуации по одному из возможных неблагоприятных сценариев.

На рисунке 2 приведены обобщенные результаты моделирования с использованием (5–10) для описания динамики свободного развития опасного процесса с переходом в критическое состояние. Графики с пунктирными линиями отражают прогнозируемую динамику при реагировании и производстве аварийно-спасательных и других неотложных работ (АСНР).

Таким образом предлагаемый метод позволяет установить соответствующее данным текущего мониторинга локальное решение системы (1), с задаваемыми согласно (2) интенсивностями переходов между основными состояниями системы Т–Р–В–П, описывающее временные зависимости для вероятностей нахождения в состояниях «опасный процесс» и перехода в критическое состояние.

6. Выводы

Эффективность автоматизированных систем непрерывного мониторинга пожарно-экологического состояния территорий с торфяниками в значительной степени определяется построением научно обоснованного математического и информационного обеспечения, обеспечивающего анализ актуальных угроз, достоверность прогнозирования развития опасных процессов, а также генерацию алгоритмов поддержки обоснования и принятия решений при организации технологических процессов, планировании мероприятий и оперативном управлении.

Предлагаемый подход к построению математического обеспечения перспективных систем автоматизированного мониторинга пожарно-экологического состояния территорий с торфяниками заключается в эффективном использовании поступающих в информационно-аналитическую систему данных непрерывного мониторинга о текущем состоянии и о кинетике процессов, влияющих на интенсивности переходов между рассматриваемыми смежными состояниями системы «торфяник–разогрев–возгорание–пожар».

Построена дискретно-событийная модель развития событий в системе «торфяник-разогрев-возгорание-пожар» по каскадному сценарию, а также получена система стохастических дифференциальных уравнений, отличающаяся использованием трехпараметрических распределений Вейбулла для задания интенсивностей переходов между состояниями рассматриваемого неоднородного марковского процесса.

Реализованы оригинальные приемы моделирования с учетом данных текущего мониторинга о параметрах состояния и кинетике процессов, а также предполагаемых результатов целенаправленных воздействий, позволяющие найти локальные решения для рассматриваемого сценария событий, соответствующие общей системе стохастических дифференциальных уравнений.

Прогнозируемая на основе предлагаемых методов моделирования динамика рассматриваемого сценария событий обеспечивает возможности информационно-аналитической системы по генерации алгоритмов поддержки оперативного реагирования и производства процедур оценки показателей своевременности, безопасности и эффективности мероприятий, рекомендуемых к выполнению на различных этапах развития торфяных пожаров.

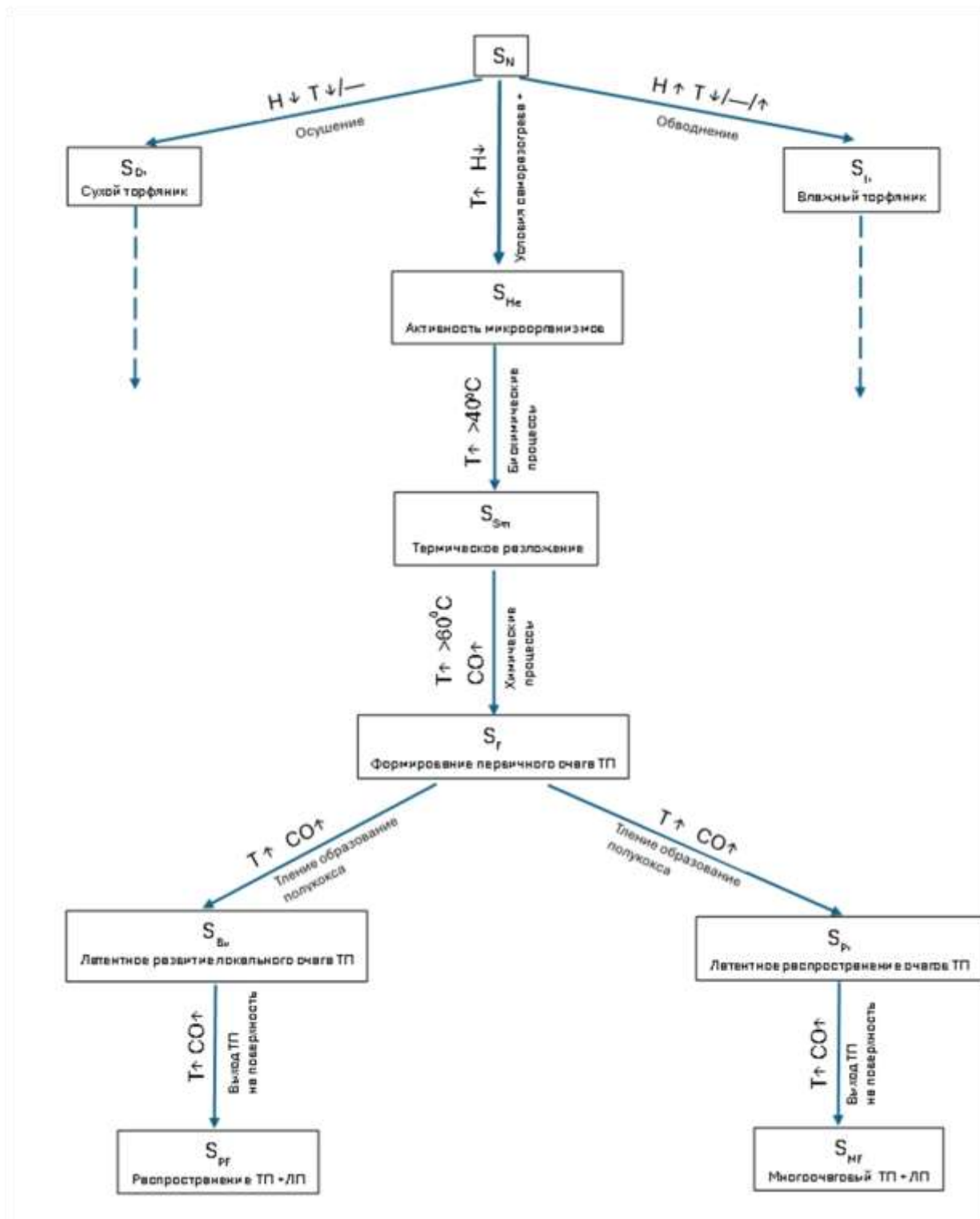


Рисунок 1 – Граф состояний и переходных процессов системы «торфяник-разогрев-возгорание-пожар». В обозначении состояний используется аббревиатура: Irrigation – орошение, drying – высушивание heating –нагревание, smouldering –тление, fire –возгорание, burning –горение, propagate – распространение, peat fire – лесной пожар, multi-focal peat fire – многоочаговый лесной пожар.

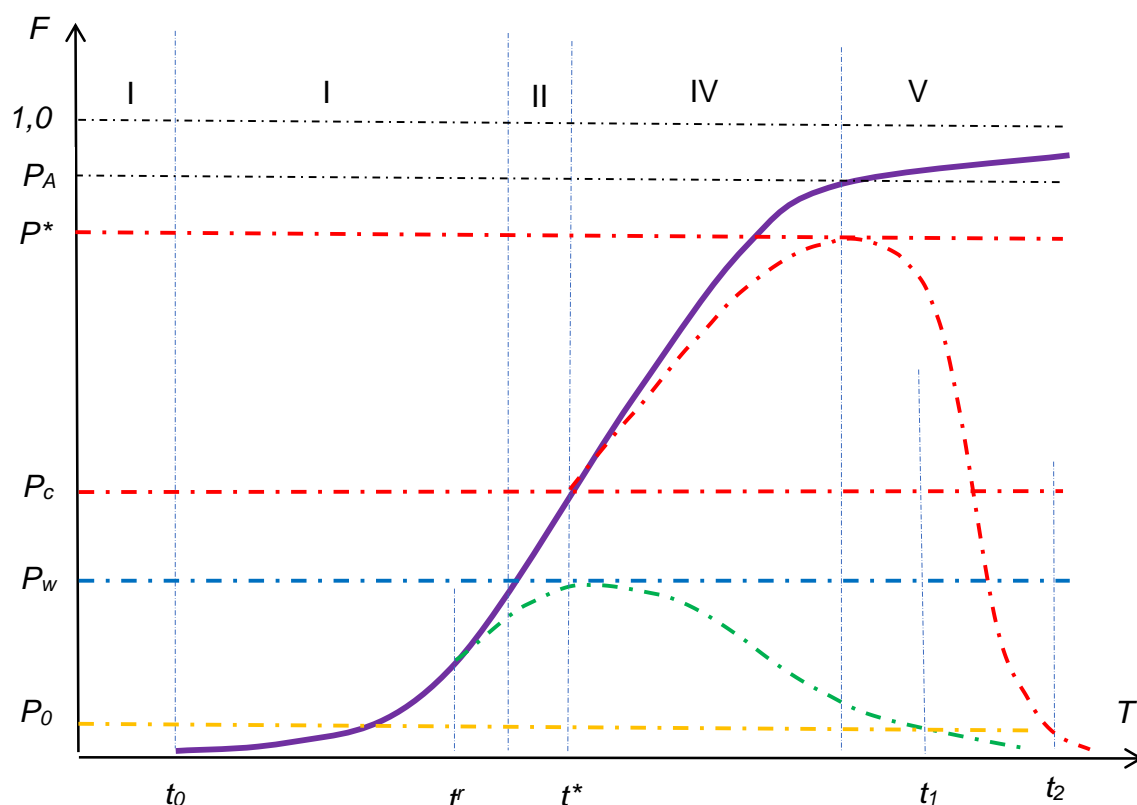


Рисунок 2 – Результаты моделирования динамики развития ЧС с текущими вероятностями возникновения критического состояния с оценкой целесообразности и допустимости производства АСНР: P_0 – незначительная, P_w – допустимая, P_c и P^* – предельно допустимые для начала АСНР и продолжения АСНР, P_A – аварийная (переход в критическое состояние)

Литература

1. Орешина, М. Н. Использование информационных технологий при разработке автоматизированной системы контроля возгорания торфяников / М. Н. Орешина, А. П. Зверев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 12. – С. 578–582. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-12-578-579. – EDN SGENKO.
2. Зверев, А. П. Развитие динамики фронта торфяного пожара / А. П. Зверев, П. С. Шевчук // Безопасность жизнедеятельности. – 2025. – № 12(300). – С. 26–33. – EDN KOMWFX.
3. Зверев, А. П. Оптоволоконная система пожароопасности возгорания торфяников / А. П. Зверев, Ю. В. Прус // Гражданская оборона на страже мира и безопасности: Материалы IX Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны. В 5-ти частях, Москва, 28 февраля 2025 года. – М.: Академия ГПС, 2025. – С. 212–217. – EDN ZXVZEY.
4. Пантелеев, В. А. Метод описания сценариев каскадных и межсистемных аварий с учетом вероятностных факторов / В. А. Пантелеев, И. А. Кириллов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2019. – № 5. – С. 53–61.
5. Johansen, C. Probabilistic multi-scale modeling of interdependencies between critical infrastructure systems for resilience / C. Johansen, I. Tien // Sustainable and Resilient Infrastructure. – 2018. – V 3. – N 1. – Pp. 1–15.

6. Dueñas-Osorio, L. Cascading failures in complex infrastructure systems / L. Dueñas-Osorio, S. M. Vemuru // *Structural safety*. – 2009. – V 31. – N 2. – Pp. 157–167.

7. Buldyrev, S. V. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks / S. V. Buldyrev, R. Parshani, G. Pau, H. E. Stanley, S. Havlin // *Nature*. – 2010. – N 464(7291). – Pp. 1025–1028.

8. Прус, М. Ю. Математическое моделирование структуры и динамики многокомпонентных рисков в социотехнических системах: 1.2.2: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: защищена 27.06.23 : утверждена 24.06.24 / Прус Михаил Юрьевич– Москва, 2023. – 227 с. – EDN DQVZNN.

9. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений / под ред. Дж. Холл и Дж. Уатт. – М.: Мир, 1979. – 312 с.

10. Зельдович, Я. Б. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. – М.: Наука, 1980. – 480 с.

Поступила в редакцию: 03.02.26

Принята к публикации: 20.04.26