

# РАЗРАБОТКА МЯГКИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ФРОНТА И ПЛОЩАДИ ПРИРОДНОГО ПОЖАРА

**В.С. Коморовский, кандидат технических наук.**  
**Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,**  
**Научно-технический центр, г. Красноярск**

Рассмотрены подходы к построению мягких моделей динамики площади природных пожаров. В качестве инструмента использовано имитационное моделирование. Проанализирована чувствительность модели к изменению ее параметров.

*Ключевые слова:* природные пожары, мягкие модели, имитационное моделирование, чувствительность

## DEVELOPMENT OF THE WILDFIRE SPREADING SOFT MODELS

V.S. Komorovsky.  
Siberian fire and rescue academy of EMERCOM of Russia, Scientific research center, Krasnoyarsk

The approaches of wildfire soft models development have been discussed. The imitational modeling has been used as instrument. The sensitivity of the model has been analyzed.

*Keywords:* wildfires, soft models, simulation modeling, sensitivity

Несмотря на огромное разнообразие моделей динамики площади и фронта природного пожара, все они работают в квазистационарных условиях: при постоянстве погодных, лесорастительных, орографических и других условий. Однако практически все существенно влияющие на распространение пожара факторы динамически меняются во время развития пожара. Следовательно, для получения наиболее корректных моделей природных пожаров следует использовать системы дифференциальных уравнений, описывающих не только временные изменения, касающиеся непосредственно пожара, но и всех (или почти всех) факторов, влияющих на пожар.

Преимущества такого подхода очевидны, однако есть существенный недостаток, делающий применение такого подхода очень сложным. Вообще говоря, вид функций, описывающих поведение погодных, лесорастительных, орографических условий не известен. Тем не менее, существуют методы, позволяющие делать некоторые выводы о характере даже таких моделей, называемых мягкими.

Предположим, что топологические характеристики системы уравнений, описывающих поведение природного пожара, не меняются при изменении типа функций, описывающих изменения характеристик. Это предположение следует из наблюдений: любой природный пожар развивается по сходному сценарию, в котором есть фазы роста площади и/или скорости и фазы затухания, завершающиеся погасанием. Таким образом, модель должна быть структурно устойчивой.

Целью данной работы является проведение предварительных исследований в области построения мягких моделей динамики площади природного пожара.

Использование для исследования существующих моделей сопряжено с существенными трудностями. Модели динамики площади пожаров, предложенные А.М. Гришиным, Г.А. Доррером, R. Rothermel, M. Finney и др., отличаются большим количеством факторов, принятых к учету. Для целей данного исследования ограничимся упрощенной моделью пожара, которая будет отражать только общий характер поведения динамики площади пожара.

Пусть  $S$  – площадь пожара, зависящая от времени и некоторых параметров  $\alpha$  и  $k$ ,  $S_0$  – начальная площадь пожара, в момент времени  $t_0$ . Здесь и далее, под площадью пожара

понимается площадь, пройденная огнем к моменту времени  $t$ . Таким образом, площадь пожара определяется как:

$$S = f(k, \alpha, t). \quad (1)$$

Изменение площади пожара запишем в следующем виде:

$$\frac{dS}{dt} = k \cdot \alpha \cdot t^{\alpha-1}. \quad (2)$$

Объясним смысл показателей  $\alpha$  и  $k$ . Показатель  $k$  определяет прирост площади в единицу времени, показатель  $\alpha$  определяет динамику пожара. Подробно данная модель и условия ее применимости рассмотрены в работах [1, 2]. Расширим эту модель функциями, определяющими зависимость показателей от времени:

$$k = \frac{h \cdot k_0 \cdot e^{c \cdot t}}{b + k_0 \cdot e^{c \cdot t - 1}}. \quad (3)$$

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_0 & t \leq t_k \\ \alpha_0 - q \cdot \ln(t) & t_k \leq t \leq p \cdot t_k \\ 0 & t > t_k \end{cases}. \quad (4)$$

Здесь  $k_0$ ,  $t_k$  и  $\alpha_0$  – начальные условия,  $b$ ,  $c$ ,  $q$ ,  $p$  – набор констант. Следует пояснить такой большой набор констант. На природный пожар на самом деле действует огромное число факторов. В данной работе сознательно упрощена модель для проверки гипотезы о применимости мягких моделей для описания динамики природных пожаров. Удобно проверить эту гипотезу с помощью имитационной модели. Такая модель была построена в системе AnyLogic. Принципиальная схема имитационной модели приведена на рис. 1.

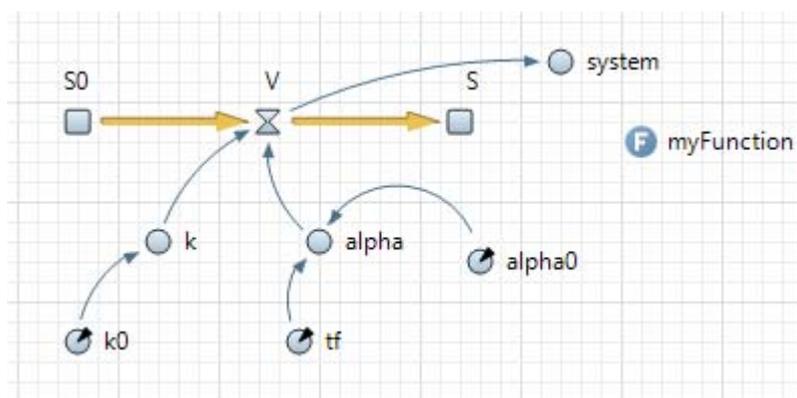


Рис. 1. Принципиальная схема имитационной модели

Имитационная модель структурно состоит из следующих элементов: накопители  $S_0$  и  $S$ , поток  $V$ , динамические переменные  $k$ ,  $\alpha$ ,  $system$ , параметры  $k_0$ ,  $t_f$ ,  $\alpha_0$  и функция  $myFunction$ .

Динамические переменные  $k$  и  $\alpha$  рассчитываются в ходе выполнения модели по формулам (1) и (2) соответственно. Параметры  $k_0$ ,  $t_f$ ,  $\alpha_0$  сопоставлены начальным условиям  $k_0$ ,  $t_k$  и  $\alpha_0$ . Накопители  $S_0$  и  $S$  представляют собой значения площади пожара

в моменты времени  $t_0$  и  $t$ . Динамическая переменная  $system$  и функция  $myFunction$  являются служебными и нужны для удобства реализации модели.

Начальные условия задаются при старте модели случайным образом в следующих пределах:

$$\begin{aligned} 0 &\leq k_0 \leq 1 \\ 10 &\leq t_k \leq 100 \\ 2 &\leq \alpha_0 \leq 3 \end{aligned}$$

Распределения данных случайных величин равномерные, однако, могут быть заданы и другие виды распределений, что будет рассмотрено ниже. Результатом выполнения имитационной модели будет график зависимости площади пожара  $S$  от времени  $t$ . При начальных условиях:

$$\begin{aligned} k_0 &= 0,894 \\ t_k &= 31,378 \\ \alpha_0 &= 2,090 \end{aligned}$$

за 100 единиц модельного времени получим зависимость, показанную на рис. 2.

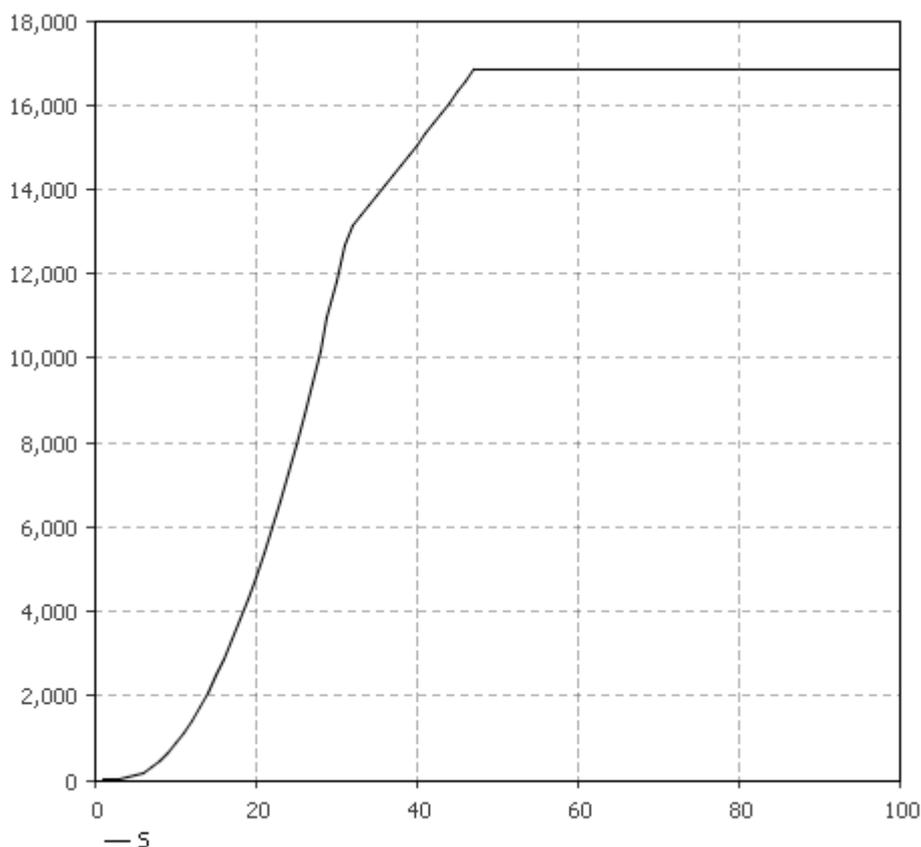


Рис. 2. Результат выполнения модели

Как видно из рис. 2, перелом в развитии пожара наступил в момент времени  $t_k$ , а общая площадь составила примерно 17 000 м<sup>2</sup> или 1,7 га.

Рассмотрим 500 запусков модели с начальными условиями, случайным образом варьируемыми в указанных выше пределах. Результаты приведены на рис. 3.

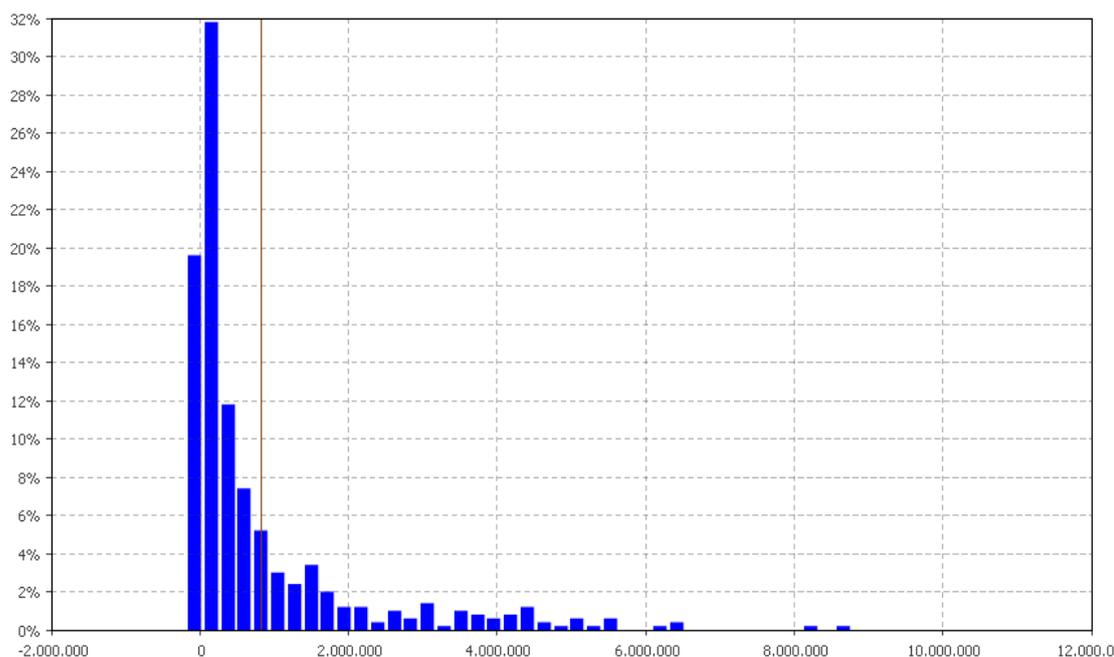
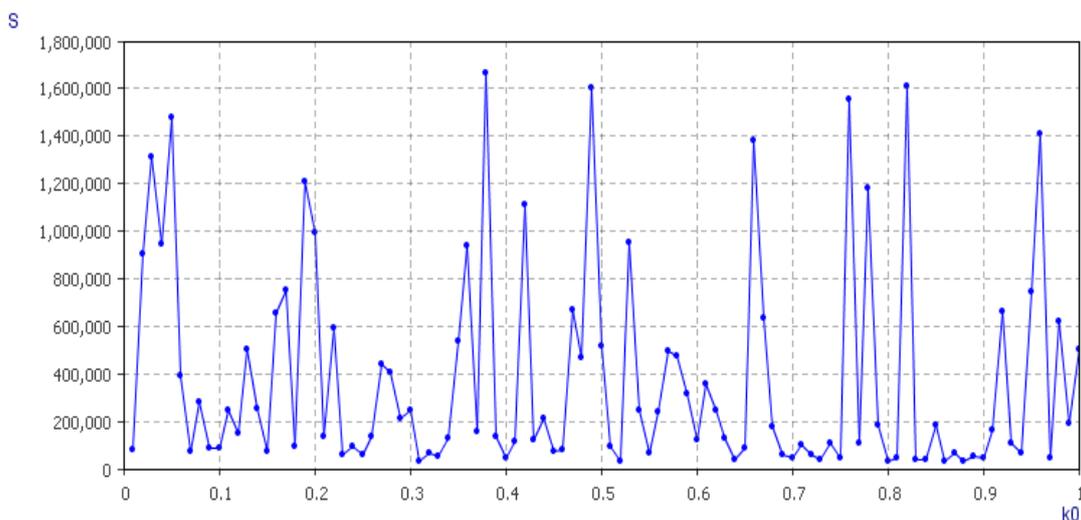


Рис. 3. Результат выполнения модели

Распределение, приведенное на рис. 3, показывает достаточно классическую картину распределения пожаров по площадям в каком-либо регионе (например, работы [1, 3]). Средняя площадь пожара (тонкая вертикальная линия на рис. 3) составляет около 100 га, однако возможны катастрофические пожары с площадью, много большей средней, то есть распределение площадей с так называемым «тяжелым хвостом».

Возникает вопрос, имеющий важное прикладное значение: при каких начальных условиях возможны катастрофические пожары? Практика показывает, что кроме достаточно очевидных ситуаций (низкая влажность, высокая температура воздуха, подходящая скорость ветра и т.д.) катастрофические пожары возможны и при достаточно «безобидных» сочетаниях начальных условий, при малом их изменении. Это говорит о неустойчивости состояния природной среды и лесорастительных условий в момент, предшествующий пожару, и, особенно, в течение пожара. Адекватные модели динамики природных пожаров должны учитывать такую неустойчивость.

Зафиксируем  $t_k=50$  и исследуем чувствительность системы к изменениям параметра  $k_0$  в пределах от 0 до 1 с шагом 0,01, одновременно задавая значения  $\alpha_0$  как случайной величины с равномерным распределением. Результат исследования приведен на рис. 4.



#### Рис. 4. Исследование чувствительности модели к параметру $k_0$

Как видно из рис. 4, при малом изменении параметра  $k_0$  и фиксированном  $t_k$  возможны резкие (на порядок) скачки значения  $S$ . Безусловно, если необходимо получить строгие кривые чувствительности модели к параметрам, следует зафиксировать все параметры, кроме исследуемого. Однако оставим вопросы чувствительности, устойчивости, управляемости и наблюдаемости данной системы для дальнейших исследований.

Предполагая неустойчивость системы в смысле малого изменения начальных условий, тем не менее, следует обеспечить выполнение условия структурной устойчивости модели, которое предполагает, что при изменении вида функций результат качественно не меняется. Предложенная имитационная модель тестировалась при изменении вида функций (3) и (4) на линейные, полиномиальные (до третьей степени), тригонометрические (синус и косинус с разными периодами и фазами). Также распределение случайных величин менялось на нормальное и биномиальное. Качественные результаты, касающиеся вида траектории изменения площади пожара, а также распределения площадей пожаров не изменялись.

Таким образом, применение мягких имитационных моделей позволяет, с одной стороны, обойти некоторые сложности при построении классических моделей, а с другой стороны, учесть важные условия, при которых возникает и развивается природный пожар. Возможно, применение подобных моделей позволит точнее прогнозировать катастрофические лесопожарные ситуации и эффективнее бороться с их последствиями. Полученные результаты носят предварительный характер и говорят о перспективности дальнейших исследований в данном направлении.

#### Литература

1. Коморовский В.С. Контроль и прогнозирование параметров крупных лесных пожаров как динамических процессов на поверхности Земли: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2010.
2. Доррер Г.А., Коморовский В.С., Якимов С.П. Методика оценки и прогнозирования параметров крупных лесных пожаров на основе спутниковой информации // Хвойные бореальной зоны. 2011. Т. XXVIII. № 1–2. С. 18–26.
3. Valendik E.N., Verkhovets S.V., Ponomarev E.I., Ryzhkova V.A., Kisilyakhov Ye.K. Large wildfires in taiga subzones of Central Siberia // Журн. Сиб. федер. ун-та. Сер: Биология. 2014. Т. 7. № 1. С. 43–56.