

9. «Речь идёт о процентах ВВП» — Хазин оценил ущерб от коронавируса для Китая // ИА REGNUM – URL: <https://regnum.ru/news/polit/2841819.html>

10. Терновсков В.Б., Балилый Н.А., Ефимов А.И. Использование современных мобильных приложений для популяризации экологической безопасности среди населения. Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. - 2019. № 1 (63). С. 180-186.

11. Гончаров М.М., Терновсков В.Б. Модели стратегического менеджмента с использованием инновационных технологий. Транспортное дело России. - 2018. № 6. С. 174-177.

### Сведения об авторах

*Грушицын Александр Степанович*, МИРЭА – Российский Технологический Университет г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78, 8(903)7607987, nicifor@bk.ru

*Зайченко Алиса Николаевна*, МПГУ, г. Москва, Малая Пироговская, д.1, 8(929)9285292, alisazaicenco@mail.ru

*Терновсков Владимир Борисович*, Финансовый университет при Правительстве РФ, ул. Кибальчича, 1, 8(929)9285292, vternik@mail.ru

*Данилина Марина Викторовна*, Финансовый университет при Правительстве РФ, ул. Кибальчича, 1, 8(910)4307831, marinadanilina@ya.ru

УДК 519.8

DOI: 10.36535/0869-4176-2020-03-7

## АНАЛИЗ ПРЕИМУЩЕСТВ И НЕДОСТАТКОВ МОДЕЛЕЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

*И.М. Михайлов*

**Федеральное государственное бюджетное учреждение  
“Всероссийский научно – исследовательский институт по проблемам  
гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России”  
(федеральный центр науки и высоких технологий).**

*Выполнен анализ существующих математических моделей лесных пожаров, а именно движение кромки лесного пожара. Рассмотрены математические модели, применяемые в мире на данный момент.*

**Ключевые слова:** лесной пожар, прогнозирование лесных пожаров, математическая модель лесного пожара.

## ANALYSIS OF ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF MODELS DESCRIBING THE SPEED OF FOREST FIRE SPREAD

*I. Mikhailov*

Federal state budgetary institution "all – Russian research Institute on problems of civil defense and emergency situations of EMERCOM of Russia" (Federal center of science and high technologies)

*The analysis of existing mathematical models of forest fires, namely the movement of the edge of a forest fire, is performed. Mathematical models currently used in the world are considered.*

**Key words:** forest fire; forest fire forecasting; mathematical model of a forest fire.

Любые процессы моделирования, а особенно в природной среде, очень сложны. Связано это с их большой неоднозначностью развития и влиянием большого количества природных и техногенных факторов на их динамику.

Данное высказывание относится и к землетрясениям; и к наводнениям; и к оползням; и к сходам снежных лавин; и к ураганам и штормам; и к снежным бурям; и к цунами и ряду других опасных природных процессов.

Но это относится и к природным пожарам, большую часть которых составляют именно лесные пожары.

Существуют большие сложности моделирования динамики лесных пожаров из-за стохастичности протекающих при этом процессов и влияния на их ход большого числа факторов.

Ученые многих стран, прежде всего с большими лесными площадями, пытались моделировать динамику различных видов лесных пожаров: низовых, верховых, пятнистых, лесоторфяных.

Ниже рассмотрим результаты ряда работ ученых внесших заметный вклад в лесопирологическую науку.

На текущий момент для прогнозирования скорости распространения лесных пожаров используются различные модели, в основном основанные на эмпирических данных. Требования к этим моделям в разное время предъявлялись различные, такие, как использование измеримых и доступных параметров, простота применения (в первую очередь, во времена, когда ЭВМ были мало распространены), достаточная точность и достоверность получаемых параметров. Кроме того, серьезные требования предъявлялись всегда, предъявляются и сейчас к точности, полноте и своевременности получения входных (исходных) данных для моделирования процессов движения кромки пожара (огня) и других характеристик лесных пожаров.

Сложность в разработке таких моделей состоит в том, что лесной пожар является многофакторным стохастическим процессом, и выделить определяющие физические параметры практически весьма сложно, поэтому обоснование упрощений также сильно затруднено, и из-за этого наибольшее развитие получили именно статистические и вероятностные модели. Также развитие в данном направлении можно объяснить особенностями применения моделей. Их применяют в момент возникновения пожара для прогноза положения его кромки во времени, и в таких условиях нет возможности подробного изучения местности для точного определения всех входных параметров моделей. Иначе говоря, трудно получить мониторинговые данные о лесном пожаре и о влияющих на его динамику условиях (характеристиках, процессах).

Поэтому представляет интерес анализ физических процессов при лесных пожарах, их моделирование с целью определения степени применимости математических моделей на территории Российской Федерации.

Это связано с тем, прежде всего, что сбор исходных данных для моделирования зависит от своевременности и полноты мониторинговых данных, который, в свою очередь, зависит от наличия и оснащенности территорий, занятых лесами различными сетями наблюдения и контроля обстановки, иначе говоря, мониторинговыми системами.

### **Анализ математических моделей динамики лесных пожаров**

#### *Модель Митчелла*

В 1937 году Митчелл опубликовал статью, в которой оценивал изменения в огневом фронте. В этой оценке Митчелл предложил оценить зависимость увеличения периметра пожара от диаметра круга и окружности. Для определения периметра предлагается умножить скорость движения кромки фронта огня на 3 (для удобства расчета вместо числа  $\pi$  берется число 3). Этот метод очень прост и может быть рассмотрен только в случае моделирования пожаров в простой конфигурации - в виде круга [1].

#### *Модель Фонса*

Одной из первых моделей прогнозирования лесных пожаров является модель В.Л. Фонса (1946). Теоретической предпосылкой этой модели была идея горения как серии последовательных воспламенений частиц топлива и получения на этой основе уравнения теплового баланса. Кроме того, значения коэффициентов, входящих в модель, определяются на основе сравнительно небольших экспериментов по сжиганию искусственно созданных слоев сосновых веток и падению сосновой хвои в аэродинамической трубе.

#### *Модель Байрама*

В 1956 году были разработаны модели Байрама. Они основаны на уравнении интенсивности пожара. Так, уравнение Байрама выглядит следующим образом [1]:

$$I = HwR \quad (1)$$

где  $I$  – интенсивность пожара, кВт/м;  
 $H$  – теплота сгорания топлива, кДж/м;  
 $W$  – масса топлива, потребляемого на единицу площади, кг/м<sup>2</sup>;  
 $R$  – скорость распространения фронта пожара, м/сек.

#### *Модель И.Е. Ван-Вангера*

Эта модель была предложена Ван Вагнером в 1967 году. Модель основана на следующем концептуальном положении: радиация пламени является наиболее важным фактором в механизме распространения огня. Основными входными параметрами модели являются длина пламени, запас топлива, интенсивность радиации, излучаемого пламенем, доля радиации, поглощаемого топливом, влажность топлива и угол наклона пламени к топливному слою. В этой модели, как и в предыдущей, часть входных переменных не может быть измерена и получена заранее.

#### *Модель Н.П. Курбатского*

Модель Курбатского направлена на прогнозирование конфигурации контуров лесного пожара. Пожар здесь рассматривается в виде фигуры, состоящей из двух полу-

эллипсов с общей осью. Для того, чтобы рассчитать периметр пожара автор предлагает простую формулу [1]:

$$P = (1,21 + 6,28U)t \quad (2)$$

где  $P$  – длина периметра, м;  
 $U$  – скорость перемещения фронта пожара, м/ч;  
 $T$  – время распространения пожара, ч.

У этой модели есть свои недостатки. Модель рассчитана на работу в реальных условиях. Недостатком является то, что модель адекватно описывает пожар только в течение небольшого начального периода времени развития лесного пожара, причем на однородной (плоской) площади.

#### Модель Р. Ротермеля

Среди известных моделей выделяется модель Р. Ротермеля, которая имеет теоретическую основу работы В. Франдсена. В этих работах скорость распространения огня определяется на основе уравнения сохранения энергии горючего материала, то есть предполагается, что скорость распространения горения пропорциональна отношению энергии, выделяющейся при горении, к энергии, необходимой для нагрева новых порций топлива до температуры воспламенения. Для расчета скорости горения автор опирается на уравнения сохранения энергии, полученные по результатам работы Франдсена, при этом предполагается, что [1]:

$$V \div \frac{E}{U} \quad (3)$$

где  $V$  – скорость горения, м/с;  
 $E$  – энергия, выделяющаяся при сгорании, кДж;  
 $U$  – энергия, необходимая для нагрева новых порций горючего до температуры воспламенения, кДж.

Без использования каких-либо новых теоретических принципов в процессе горения модель Р. Ротермеля основана на обобщении большого экспериментального материала. В нем слой горючих материалов может содержать две категории топлива: живое и мертвое, а для мертвых горючих материалов выделяются три класса [2,3]:

- до 6 мм;
- от 6 до 25 мм;
- от 25 до 75 мм.

Для каждого класса требуется знание следующих показателей: запас топлива, кг/м<sup>2</sup>; теплотворная способность, ккал/кг; влагосодержание, кг/кг; поверхностно-объемное отношение, 1/м; содержание минеральных веществ, в том числе не силикатов, кг/кг; плотность материала, кг/м<sup>3</sup>. Кроме того, требуется знание показателей, общих для всего слоя: глубина слоя, м; уклон местности, м/м; скорость ветра, м/ч; критическое влагосодержание, при котором прекращается горение, кг/кг. Выходными параметрами модели являются интенсивность горения кромки, ккал/(м<sup>2</sup>·мин), и скорость распространения огня в направлении ветра, м/мин. При этом, в более поздних модификациях модели также дается еще и высота пламени.

В частности, модифицированная формула для скорости распространения огня по многокомпонентному горючему имеет вид [3]:

$$V_{\phi} = \frac{r' \xi (1 + \varphi_w + \varphi_s) \sum_{i=1}^2 \varepsilon_i \omega_i h_i \eta_{Mi} \eta_{Si}}{\rho \sum_{i=1}^2 f_i \sum_{j=1}^{n_i} f_{ij} \varepsilon_{ij} Q_{ij}} \quad (4)$$

где  $V_{\phi}$  – скорость распространения фронта пожара;  
 $r'$  – потенциальная скорость реакции горения, общая для всего слоя;  
 $\xi$  – безразмерный коэффициент, зависящий от удельной поверхности горючего и коэффициента заполнения слоя горючего (по характеристикам слоя в целом);  
 $\varphi_w$  – коэффициент ветра (по характеристикам слоя в целом);  
 $\varphi_s$  – склона (по характеристикам слоя в целом);  
 $\varepsilon_i$  – коэффициент эффективности нагрева для данной категории горючего;  
 $\omega_i$  – запас горючего;  
 $h_i$  – теплотворная способность горючего  $i$  – й категории;  
 $\eta_{Mi}$  – коэффициент замедления скорости сгорания по влагосодержанию;  
 $\eta_{Si}$  – коэффициент замедления скорости сгорания по содержанию минеральных веществ;  
 $\rho$  – плотность слоя горючего материала;  
 $n_i$  – число размерных классов в каждой категории горючего, где  $i=1,2$ ;  
 $f_i$  и  $f_{ij}$  – весовые коэффициенты;  
 $\varepsilon_{ij}$  – эффективная плотность горючего  $i$  – го класса  $j$  – й категории;  
 $Q_{ij}$  – теплота воспламенения горючего  $i$  – го класса  $j$  – й категории.

Для использования этой модели требуется большой объем исходных данных мониторинга, которые не могут быть получены оперативно, или же возможно получение отдельных данных, а получение части других данных весьма затруднительно.

#### Модель Коровина Г.Н.

Г.Н. Коровин, основываясь на обработке данных 72 пожарных экспериментов, построил полиномиальную модель, позволяющую определить не только скорость фронта низового лесного пожара, но и скорость кромки на флангах и в тылу.

Однако наиболее интересной с точки зрения моделирования потребностей в силах и средствах для ликвидации ЧЛС, моделирования ущерба при ЧЛС, является модель для прогнозирования динамики развития лесных пожаров, описанная в работе и разработанная специалистами ВНИИ ГОЧС И ВНИИ ПО. Эта модель позволяет предсказывать динамику площади и периметра верховых и низовых пожаров, в зависимости от класса пожарной опасности и погодных условий, природной горимости лесных насаждений, скорости приземного ветра и рельефа местности [2].

### Используемые модели лесных пожаров

Проведем сравнительный анализ существующих систем моделирования лесных пожаров. В них используются входные параметры как пространственные, так и числовые (в основном погодные параметры). На выходе данные системы в основном генерируют кар-

ты с изображением прогнозируемой формы пожара, а некоторые имеют возможность дополнительного отображения данных, таких как динамику площади пожара, скорости его распространения. Стоит отметить, что данные системы основаны на модели Ротмелла в разных модификациях. Сравнительная характеристика систем моделирования представлена в табл. 1 ниже [1].

Таблица 1

**Сравнительная характеристика наиболее известных систем моделирования лесных пожаров**

Система моделирования пожаров	Математическая модель	Область применения	Входные параметры	Выходные параметры
BehavePlus	Физико-статистическая	Моделирование динамики низового пожара	уклон рельефа, номер модели топлива, влажность топлива, температура, относительная влажность, скорость ветра, направление ветра	динамика распространения низового пожара, высота факела пламени, площадь и периметр пожара.
FireLib	Физико-статистическая	Моделирование динамики низового пожара	номер модели топлива, влагосодержание топлива, скорость ветра, направление ветра	динамика распространения низового пожара, высота факела пламени, площадь и периметр пожара
DYNAFIRE	Физико-статистическая	Моделирование динамики низового пожара	стандартные типы топлива, возвышенности, уклон рельефа, экспозиция, температура, относительная влажность, влажность топлива, скорость ветра, направление ветра	Карты: периметра пожара, интенсивности пожара, средней скорости распространения, направления скорости распространения
EMBYR	Вероятностная	Моделирование горения растительных материалов, распределенных по территории Йеллоустоунского региона	Растительность, классифицированная по виду и возрасту, влажность топлива, скорость ветра, направление ветра	Карта сгоревшей области
NEXUS	Физико-статистическая	Моделирование характеристик низового и верхового пожара	влажность топлива, уклон рельефа, направление ветра, скорость ветра	количество тепла на единицу площади, высота факела пламени, направление максимальной скорости, динамика периметра, площади пожара
WILDFIRE	Физико-статистическая	Моделирование динамики низового пожара	стандартные типы топлива, возвышенности, скорость ветра, направление ветра	Карты: периметра пожара, интенсивности пожара

Представленные данные системы не плохо себя зарекомендовали, но у них ряд недостатков. Одни из недостатков – это специфическое программное обеспечение, требующее только определенное программное обеспечение. Так же как было сказано выше данные системы выдают информации трудную для понимания и интерпретации, например, система BehavePlus. Она выдает выходные параметры в виде таблиц, что затрудняет их наглядное восприятие. Но главный недостаток этих систем состоит в том, что они требуют получения метео данных практически в режиме реального времени, и точность данных моделей напрямую зависит от точности получаемых данных, притом чем меньше сетка, с которых идет получение данных тем точнее модель. Все представленные системы требуют ввода входного параметра как вид топлива. Данный параметр, получается эмпирически, с замером в определенных точках, и, чем плотнее замеры, тем точнее модель. Для применения данных систем на территории РФ - это существенный недостаток, из-за огромной площади и большого количества трудно доступных мест. Притом данные замеры нужно делать периодически, по причине накопления, как и отмирающей флоры, так и ее видовому изменению, что приведет просто к колоссальным затратам.

Очень интересная система моделирования лесных пожаров представлена в Швейцарии. В данной системе они отказываются от общепринятых терминов, как пожароопасность или лесопожарная опасность, данные термины они считают бесполезными при исследовании и управлении лесными пожарами. Они вводят термин «степень лесопожарной опасности», который они рассматривают как сам процесс лесного пожара. Основное определение, которым они пользуются, это «лесопожарный риск», данный термин подразумевает как комбинацию вероятности возникновения лесного пожара, так и его последствия. Риск лесного пожара определяется как вероятность лесного пожара в определенной точке на территории при определенных условиях в сумме с предполагаемым исходом, заданным как величина его воздействия на объекты подверженные его влиянию (расположенными по близости). Данная постановка задачи имеет дело с будущими событиями, поэтому данная модель конкретно отличается от аналитических моделей описанных выше. В данной модели лесной массив рассматривается как объект наравне с такими объектами как дороги, строения и т.д. Каждому объекту соответствует своя функция влияния, которая задает величину модификации в зависимости от влияния опасности. Для любых объектов задается условная вероятность индивидуального воздействия и индивидуального ущерба (рис. 1).

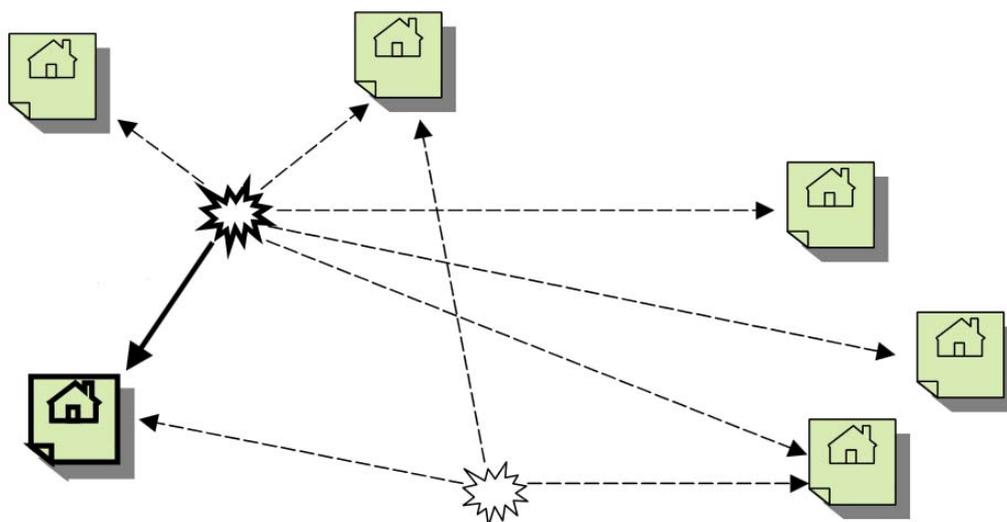


Рис. 1. Компоненты количественного анализа риска

Индивидуальный риск рассматривается только с одним объектом, подверженному воздействию риска. Со стороны объекта не имеет значения, какие события происходят, имеет значение только влияние этих событий на объект. При такой постановке задачи, выбирается область (точка), в которой назначается вероятность возникновения лесного пожара при определенных сценариях, после этого вычисляется вероятность для каждого объекта, представляющего интерес, и подверженному воздействию данных событий, с использованием соответствующих моделей пожара. В итоге оценивается ущерб в количественном эквиваленте – сумма ущерба, в соответствии с рассчитанными рисками. Данная модель может оценивать только риск только в краткосрочной перспективе. Притом оценивать лесной массив как объект, представляется возможным только для небольших массивов. По этой причине данная модель не подходит для лесных массивов расположенных на территории РФ. Но в плане принятий решений по предупреждению, управлению и ликвидации последствий лесных пожаров представляет интерес, потому что на выходе модели оценивается ущерб в денежном эквиваленте, что позволяет создавать резервы и планировать распределение материальных и человеческих ресурсов.

### **Физические процессы, лежащие в основе динамики лесных пожаров и их моделирование**

Лесной пожар в общем виде представляет собой сложную задачу, включающую в себя механику газа с учетом их распространения, поглощения и излучения для определения потоков воздуха непосредственно среди деревьев, у поверхности земли и над кромкой леса, а также процесс горения (окисления), в первую очередь по поверхности раздела воздуха и горючих материалов, где кинетика скорости реакций сильно зависит от температуры, состава газа (воздуха) и твердого горючего. Расчетная область в этом случае является сложной, где необходимо описать не только поверхность деревьев и кустарников, но и её изменение в процессе выгорания.

Для упрощения моделей и расчетов на практике используются некоторые усреднения параметров. Динамику воздушных потоков фактически заменяют тремя параметрами: вектором направления ветра вдоль земли и его скоростью. Кинетику горения в более простых моделях описывают только с применением параметра средней теплотворной способности топлива и скорости фронта пожара. В моделях посложнее добавляют влажность для описания свойств «горючего». В модели Ротмелла используется деление горючего по видам, а также удельной площади горения. Последний параметр влияет на скорость и полноту выгорания топлива.

Все применяемые упрощения являются довольно значительными и поэтому практически нет моделей, которые были бы общепризнаны и применялись бы повсеместно во всем мире. Для простых моделей наблюдается только их локальное применение, например, модели Курбатского и Коровина применяются на территории РФ или странах ближнего зарубежья.

Представляется, что модель Ротмелла как многофакторная и «гибкая» модель должна очень широко применяться. Однако, для этого необходимо проведения значительного объема исследований, и поэтому её развитие происходит только в экономически развитых странах. Притом в качестве развития здесь имеется ввиду определение значения входящих в неё исходных мониторинговых данных для конкретных территорий.

В качестве вывода можно сказать, что все модели являются либо слишком упрощенными, либо в них входят дополнительные параметры, которые на практике находятся из анализа динамики распространения реальных пожаров. Использование их в качестве исходных данных для моделирования процессов затруднено и проводится на основании

статистики пожаров на конкретных ограниченных территориях, соответственно, и применение моделей возможно только на данных территориях.

В результате приведенных выше рассуждений можно утверждать, что на территории РФ применение относительно сложных моделей типа Ротмелла не представляется возможным на данный момент. Сложность состоит в том, что на территории РФ представлено многообразие различных лесных массивов, с различным видовым составом растительности. Это требует слишком большой работы по сбору проб и проведению лабораторных исследований «горючего», иначе говоря, мониторинга лесорастительных и метеоусловий, а также анализа статистики пожаров, чтобы определить все необходимые исходные параметры моделей. Также в качестве входных параметров используются показания скорости ветра, текущей температуры воздуха и влажности, но в РФ из-за большой территории не создано достаточное количество инфраструктурных объектов (метеостанций) для решения данной задачи. Притом количество метеостанций и постов с 1986 года сократилось на 35%, а оставшиеся станции принадлежат различным ведомствам, таким как ИКИ РАН, Гидрометцентр РФ и Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации.

Стоит отметить, что в настоящий момент в нашей стране оценка пожароопасности производится по методике Нестерова с учетом региональных особенностей по сети действующих метеостанций. Учитывая этот фактор и то, что положение метеостанций в «масштабных» лесных массивах, (пример север и северо-восток Иркутской области), крайне разрежено, то оценка пожароопасности в таежной зоне крайне приближенная. То есть достоверность оценки возникновения лесного пожара крайне низка и зачастую приходится констатировать только уже факт наличия лесного пожара. И встает вопрос о прогнозировании динамики лесного пожара с момента обнаружения и оценки его масштаба. Моделирование скорости лесного пожара и приближение кромки пожара к населенным пунктам и объектам инфраструктуры, оценка области выгорания – даст возможность оценки возможного ущерба от лесного пожара и создание как краткосрочных мер по обеспечению защиты населения, например, эвакуация, так долгосрочных мер, как при строительстве объектов инфраструктуры.

Также можно сказать, что необходимо развитие таких моделей пожаров, в которые входят оперативно получаемые параметры на большой площади. Модели, основанные на движении кромки пожара, подтверждены не раз экспериментально, и собрано огромное количество статистической информации, данные модели могут стать основой для дальнейшего научного поиска для предупреждения, борьбы, минимизации ущерба и ликвидации последствий чрезвычайной ситуации как лесной пожар. Как представляется, для этого возможно создание специализированного оборудования воздушного или космического базирования, в том числе группировка спутников с гиперспектральной аппаратурой. Данная система позволила бы полностью покрыть территорию РФ, и обеспечиться данными по составу растительности и ее влагосодержанию. Эти параметры являются основными не только для прогнозирования движения кромки лесного пожара, но и для оценки пожароопасности, то есть возможности возникновения пожара. Система космического базирования позволила бы не создавать масштабную сеть метеовышек в труднодоступных местах нашей страны, притом стоимость эксплуатации спутников ниже, чем у сети наземных станций. Но данная группировка будет иметь «двойное назначение», и ее применение будет осложнено, так как для гражданского применения доступ будет ограничен.

Без учета вышесказанного прогнозирование развития пожаров возможно только при применении экспериментальных вырубок лесозащитных просек, что дает возможность только прогнозировать локализацию огня.

### Литература

1. Ходаков В.Е., Жарикова М.В. Лесные пожары: методы исследования. Херсон. - 2011, 470 с.
2. Подрезов Ю.В. Диссертация на тему: “Методологические основы прогнозирования динамики и последствий чрезвычайных лесопожарных ситуаций”.- Московский государственный университет леса. - 2005.
3. Подрезов Ю.В., Шахраманьян М.А. Методологические основы прогнозирования последствий чрезвычайных лесопожарных ситуаций. Монография. Издание первое. М.: ВНИИ ГОЧС. - 2001, 246 с.

### Сведения об авторе

*Михайлов Илья Михайлович*, аспирант - Федеральное государственное бюджетное учреждение “Всероссийский научно – исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России” (федеральный центр науки и высоких технологий); тел.: 8-926-780-53-96; e-mail: [mikhailov.im@mipt.ru](mailto:mikhailov.im@mipt.ru);