

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ МЕТОДИЧЕСКОЙ БАЗЫ ПО ПРОГНОЗИРОВАНИЮ НИЗОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Р.К. Анойкин

**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 методик и математических моделей по прогнозированию лесных пожаров. Рассмотрены математические модели низовых лесных пожаров.

Ключевые слова: лесной пожар; низовой лесной пожар; прогнозирование лесных пожаров; математическая модель лесного пожара.

ANALYSIS OF THE EXISTING METHODOLOGICAL BASIS FOR FORECASTING GROUND FOREST FIRES

R.K. Anoykin

**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 methods and mathematical models for forecasting forest fires is performed. Mathematical models of ground forest fires are considered.

Keywords: forest fire; ground forest fire; forest fires forecasting; mathematical model of forest fires.

Историей лесных массивов можно назвать историю пожаров, которые в них произошли. Наиболее старое подтверждение лесных пожаров найдено в пластах, состоящих главным образом из древесного угля, который был сформирован во времена крупнейших пожаров несколько сотен миллионов лет назад. Уничтоженные огнем лесные территории в последствии превратились в болотные местности, в результате чего и были созданы пласты угля. Данные лесные пожары, произошедшие порядка 300 миллионов лет тому назад, изначально были инициированы разрядом молнии, либо вулканической активностью. Возгорания пластов угля, а также их воздействие на соседние лесные территории происходили еще с древнейших времен.

Человечество пользуется огнем уже очень давно. Временной отрезок старейших очагов в пещерах южной части африканского континента свидетельствует о том, что предки человека стали использовать преимущества огня более полутора миллионов лет тому назад. Первые цивилизации использовали огонь не только в своем повседневном быте, например, для отопления помещения или приготовления еды, но и для решения огромного количества иных задач:

- для охоты, ведь диких животных гораздо проще поймать на расчищенной с помощью огня от растительности территории;

- для сохранения лесных массивов и иной растительности в первозданном виде с точки зрения безопасности (для защиты от нападений хищников или в военное время);
- для сельскохозяйственных нужд;
- для расчистки территорий под пастбища.

Большое количество народов до настоящего времени пользуются традиционными способами поджогов, например, выжиганием травяных тропических биомов для упрощенной рыбной ловли и выпаса скота, или массивным выжиганием территорий с целью посменного земледелия.

Нарушения текущего течения событий являются основополагающим звеном всех естественных экологических систем. В связи с этим лесному хозяйству следует быть подготовленным к случайным природным нарушениям, например, к пожарам лесных массивов. Необходимо видеть разницу между губительными и безобидными или, в особых случаях, губительными и целебными пожарами. Порой пожар может быть полезен для обновления лесной территории, также он может дать определенные блага местным жителям. В иных случаях пожар может полностью уничтожить лесной массив, а также иметь губительные последствия финансового, социального и экологического характера.

Российская Федерация является самой большой страной на Земле. Площадь ее лесного покрова составляет 815 млн. га. В зависимости от региона, в нашей стране варьируются показатели плотности населения и лесных экосистем. Области восточной и центральной части Российской Федерации, которая является малонаселенной, обладают неприспособленными к пожарам лесными массивами, в данных регионах лесные пожары являются частью экосистемы. С другой стороны, леса густонаселенной западной части Российской Федерации не приспособлены к лесным пожарам и состоят в основном из чувствительных к лесному пожару древесных пород.

Одним из основных факторов развития лесного пожара являются изменения в экономических и социальных структурах сельских территорий западной части Российской Федерации. Как и в большей части европейских областей, во многих регионах сельскохозяйственная деятельность постепенно отходит на второй план. Люди более молодого возраста часто переезжают в города. Большинство населенных пунктов, основывающих свою деятельность на сельском хозяйстве, становятся курортами. Тем не менее, горожане, приезжающие на отдых, зачастую не обращают внимания на собственное пренебрежительное отношение к окружающей их среде. За последние годы возросло число вышедших из-под контроля пожаров, равно как и загрязнение лесных массивов и водных объектов мусором, однако это не вызвало ответной реакции от властей или представителей сообщества.

Порядка 72 процентов лесных пожаров в Российской Федерации вызваны в основном пренебрежительным отношением к правилам безопасности или умышленными поджогами. Применение огня для решения сельскохозяйственных задач является причиной 7 процентов лесных пожаров. Иные источники пожаров, такие как искры, летящие с железнодорожных или электрических линий, являются причиной еще 14 процентов лесных пожаров. 7 процентов лесных пожаров вызываются молниями, однако в северных областях Российской Федерации, обладающих малой плотностью населения, доля лесных пожаров, причиной которых явились молнии, составляет от 50 до 70 процентов. Чрезвычайно опасные лесные пожары, как, например, в 2003 году, могут являться результатом сложного многофакторного взаимодействия: сильнейшей засухи, отсутствия необходимых сил, мощностей и ресурсов для тушения лесных пожаров, неподготовленными лесными хозяйствами, а также халатным отношением к нормам безопасности и умышленными поджогами для причинения экономического, экологического, социального и т.д. вреда. С 2002 по 2003 год в юго-восточных и северо-западных от озера Байкал областях количество осадков было чрезвычайно низко, вследствие засухи значительно пострадала

флора данной территории. Помимо этого, в данный временной интервал наблюдалось сокращение бюджета, что явилось причиной понижения числа полетов с наблюдательной целью. В связи с этим, начальные источники распространения огня не были выявлены вовремя, в дальнейшем вылились в неконтролируемые лесные пожары. Огромные лесные площади Сибири, в связи с ее неудовлетворительной лесопожарной инфраструктурой, могут стать одной из многочисленных территорий дальнейшего повышения количества лесных пожаров вследствие изменения климата.

Вырубка лесного массива, а также иные виды хозяйственной деятельности в лесу сильно увеличивают риск возникновения и распространения лесного пожара. Величина поперечного сечения значительно больше расстояния, пролетаемого древесными семенами вследствие действия сильного ветра. В связи с этим, не остается возможностей для натурального восстановления лесных массивов в экстремальном климате, который характерен для некоторых регионов Российской Федерации. Неоднократные лесные пожары создают подходящие условия для формирования огромных по площади пастбищ, на которых постоянно возникают и распространяются лесные пожары.

Умышленные поджоги тесно связаны с незаконной вырубкой леса, происходящей по всему Забайкалью и многим регионам юго-восточной части Российской Федерации. Порядка половины всей заготовленной древесины в этих областях изготавливается незаконными способами. Одним из главных факторов, способствующих этому, является невероятный спрос на дерево и деревянные изделия в Китае, который находится неподалеку. Совершается множество умышленных поджогов, а поврежденные стволы деревьев срубают за небольшие деньги. Также существует искушение заняться рубкой леса в соседних девственных лесах.

Дым от крупных лесных пожаров является огромной угрозой для здоровья населения. Чрезвычайно плотная пелена дыма может возникнуть вследствие иссушения сухих торфяников, как, например, произошло в 2010 году в Москве и Московской области. В западной части Российской Федерации во времена СССР огромные территории торфяников были искусственно высушены для сельскохозяйственных нужд, а также ради выработки энергии. Лесные пожары очень быстро переходят на данные иссушенные территории с торфяными почвами.

Дым от лесных пожаров оказывает чрезвычайно негативное влияние на людей с заболеваниями дыхательных путей, имеющих проблемы с сердечно-сосудистой системой, а также на детей и людей пожилого возраста, так как в его состав входят вещества, представляющие токсическую опасность, такие как угарный газ, маленькие частицы пыли, формальдегид, а также полиароматические соединения углеводородов. В то время, когда в Москве присутствовала дымовая пелена, показатели смертности повысились в два раза. Существует информация и о более высоком количестве выкидышей среди беременных женщин.

Множество российских экосистем леса хорошо переносят повторяющиеся лесные пожары. Однако данные пожары превратились в более частое явление. Дальневосточная часть Российской Федерации подвергается крупным лесным пожарам постоянно с периодичностью 40-80 лет. Данный интервал был понижен до десяти-двенадцати лет за последние четыре декады. Все это серьезным образом повлияло на окружающую среду. Крупные лесные пожары оказывают негативное влияние на лесную экосистему, так как ликвидируют как небольшие заросли, так и огромные пространства, покрытые разнообразными видами деревьев. Необходимо длительное время для восстановления этих территорий, которые в конечном итоге заселят животные и растения.

Неоднократные лесные пожары зачастую являются причиной опустынивания территорий. За последние полвека вырубка лесных массивов повысилась на 8 миллионов гектаров. Воссоздание леса потребует огромных затрат ресурсов и сил, а на естественное лесное регенерирование этих территорий может потребоваться не одна сотня лет. Тем не

менее, небольшие лесные пожары, действующие только на кустарники и оставляющие деревья незатронутыми огнем, могут также иметь отрицательные последствия при неоднократных случаях возгорания (вызванных непосредственным человеческим вмешательством). В данном случае лесные пожары являются причиной объединения видов деревьев, что приводит к более однородному лесному составу.

Утрата лесного покрова отрицательным образом сказывается на балансе влаги, а также уменьшает способность удерживать воду, следовательно, повышая частоту наводнений. Эрозия почвы, а также загрязнение пеплом могут явиться причиной большой количества смертей рыб. Результатом лесных пожаров становятся ослабевшие, погибшие или поврежденные древесные породы. Зачастую это способствует массовой репродукции насекомых, нападающих на нетронутые лесные массивы.

Острая потребность в воде может являться одной из главных трудностей в борьбе с пожарами. Проблема водоснабжения характерна для множества случаев возникновения лесных пожаров вследствие удаленного расположения источников воды, ведь перевозка или откачивание водных ресурсов должны быть эффективны даже при больших расстояниях до очага пожара. Необходимо также учитывать то, что пожары зачастую случаются на территориях годовой или сезонной засухи. Противостояние пожарам в лесных массивах требует затрат очень большого количества водных ресурсов, что, в свою очередь, приводит к их дефициту для решения иных важных задач, например, сельскохозяйственному орошению. Крупные лесные пожары довольно часто влияют на состояние водного хозяйства территории. Уничтожение лесных массивов становится причиной утраты возможности удержания водных ресурсов, а также их сбалансированного управления. Вместо задержки, вода стремительно стекает вниз с поврежденных огнем территорий и может являться причиной тотального разрушения почвы.

До настоящего времени многие методы по устранению поджогов полей в юго-западной части Приморья и повышению пирологической защиты показали свою крайнюю неэффективность. Один из новых способов защиты лесных массивов, которые находятся под угрозой возгорания – это защитные посадки лиственниц, высоты которых варьируются от 20 до 30 метров. Лиственницы затрудняют дальнейшее развитие низового лесного пожара, а также не дают дополнительного топлива для распространения мелких лесных пожаров, которые были спровоцированы в результате возгорания полей, и поэтому довольно успешно их останавливают. Однако для реализации данного метода защиты необходимо, чтобы возраст лиственницы был больше 10 лет. До достижения данного возраста лиственницы и граничащие с ними лесные массивы должны быть наиболее защищены от поражающих факторов огня.

Очевидно, что перед непосредственной борьбой с лесными пожарами, необходимо для начала понять их причины возникновения, которые могут объяснить их увеличивающуюся частоту и масштаб. Потенциал тушения пожаров необходимо увеличить для того, чтобы вовремя обнаруживать, и не допускать дальнейшего распространения огня, при этом понижая уровень угрозы для людей, а также снижая экономический и экологический ущерб. Помимо этого, пирологическая защита должна рассматриваться в качестве одной из частей управления лесными ресурсами. Необходимо ограничить масштабные вырубки лесных массивов, тем самым понизив уязвимость лесов к огню. Также подконтрольное человеку сжигание на лесных территориях необходимо рассматривать в качестве инструмента управления, который позволяет уменьшить расход топлива, способствует природной регенерации и улучшает естественную среду обитания лесной фауны.

Необходимо повышать человеческую осведомленность о риске лесного пожара для понижения числа возгораний, произошедших по вине людей. Это можно осуществлять, например, в качестве школьных образовательных лекций. Также риск возникновения и развития лесных пожаров стоит брать в расчет при планировании инфраструктуры опре-

деленной территории, например, при создании железнодорожного полотна или линий электропередач.

Всего лишь 4% лесных пожаров во всем мире являются следствием природных явлений, таких как чрезвычайные погодные условия (экстремально высокие температуры, засухи и ветра штормовой силы), разряды молний, извержения вулканов. Люди преднамеренно устраивают поджоги, либо становятся причиной пожара вследствие халатного пренебрежения мерами безопасности, например, оставляют непотушенный костер, бросают спички или окурки.

Брошенные стеклянные бутылки, а также битое стекло могут собирать солнечные лучи и являться причиной возникновения огня на опавших листьях или сухой траве. Достаточно распространенной, но недооцененной причиной возникновения лесных пожаров могут являться оставленные на территориях лесных массивов автомобили и мотоциклы с их выхлопными трубами. Чрезвычайные лесопожарные ситуации также возникают из-за случайной искры от электрических линий или железнодорожных путей.

Выделяют несколько стадий развития лесного пожара: первоначально начинает гореть сухая трава, а также подлесок. Это формирует легкоуправляемый поверхностный этап лесного пожара. В случае, если происходит дальнейшее развитие пирологического процесса, огонь может перейти на верхнюю часть древесных насаждений, что особенно заметно в случае хвойных видов деревьев, следствием чего может явиться быстро распространяющийся пожар кроны или лесного полога. Перекинувшиеся на крону лесные пожары гораздо труднее держать под контролем, они с легкостью могут перерасти в пожары, тушение которых может представлять практически невыполнимую задачу.

Необходимые меры и средства тушения лесного пожара зависят от его вида. Формирование пирологической защиты хорошо помогает при низовом пожаре. При данном типе пожара с земли удаляются лесные горючие материалы через контролируемое горение полос шириной несколько метров, что прекращает дальнейшее распространение огня, однако и в этом случае отдельные искры могут достичь противоположного конца полосы. При тушении верхового лесного пожара прибегают к помощи авиации, что может представлять серьезную опасность вследствие того, что пилотам необходимо летать в непосредственной близости от огня, а также существующей вероятности падения летательного судна. Несмотря на высокую пирологическую опасность и немалые затраты на тушение, меры профилактики пожаров в лесных массивах попросту игнорируются, зачастую средства инвестируются лишь в технологическое обновление оборудования.

Самый главный элемент эффективной системы управления лесными пожарами – это их профилактика. Необходимо существенно увеличить количество сил и ресурсов, направленных на профилактические действия в отношении уменьшения риска возникновения и дальнейшего распространения лесных пожаров.

В первую очередь, необходимо определить основные причины появления огня, для выявления которых потребуется подходящая статистическая база данных.

Сотрудникам лесного хозяйства необходимо брать в расчет роль лесных пожаров, избегать рубки деревьев, а также посадки иных видов древесных пород, если это увеличивает риск возникновения огня. Одной из главных целей лесохозяйства должно быть уменьшение вреда, причиненных древесным насаждениям лесными пожарами, увеличение защитных свойств лесных массивов через развитие поблизости естественных лесов. В экосистемах, сильно зависимых от пожаров, увеличение количества топлива необходимо контролировать через сжигание лишних ресурсов для поддержания естественных лесных процессов и циклов.

Риск возникновения и развития лесных пожаров должен учитываться при пространственном планировании. Строительство новых населенных пунктов недопустимо на территориях высокого риска пирологической опасности. Такие объекты инфраструктуры, как

железнодорожные пути или линии электропередач, должны быть приспособлены соответствующим образом для снижения риска возникновения пожарной угрозы.

Все соответствующие законы должны учитывать пирологическую опасность. В случаях, когда происходит субсидирование перехода лесных территорий в сельскохозяйственные, необходимы законодательные реформы вследствие высокого риска возникновения и развития неконтролируемых пожаров. Недопустимо использование сгоревших участков местности в качестве строительных площадок, так как риск повторного пожара чрезвычайно высок.

Необходимо постепенное усиление вопросов законодательного регулирования незаконной рубки леса для уменьшения риска пирологической опасности.

Следует однозначно определить и разграничить обязанности по устранению пожаров в лесных массивах, а также обеспечить эффективное взаимодействие между задействованными в пожаротушении управлениями. Необходимо выделять достаточные материальные ресурсы, направленные на мониторинг лесопожарной обстановки. Данная мера позволит находить лесные пожары вовремя и ликвидировать их на начальной стадии развития. Помимо материалов учебных программ, следует разработать различные сценарии пожаров для более качественной подготовки сил аварийного реагирования.

Анализ ближайших и длительных расходов на тушение пожаров в лесных массивах требуется для разработки апробированных на областном уровне оптимальных и результативных стратегий ликвидации лесных пожаров. Существование данной информации может существенно упростить принятие необходимых мер в зависимых от пожара экологических системах, в которых пожары можно продолжительное время выносить по экологическим и финансовым причинам. Подсчет всех ближайших и длительных расходов на тушение лесных пожаров в лесных массивах может явиться убедительным политическим доводом в пользу ликвидации лесных пожаров как более экономически эффективной альтернативы.

В случае возникновения лесного пожара реагирование должно быть немедленным и стратегически осмысленным, чтобы очаги лесного пожара могли быть ликвидированы на зачаточных этапах своего появления, прежде чем произойдет переход на более серьезную стадию. Также не следует вторгаться на нетронутые территории лесного массива, так как наличие непосредственного доступа серьезно повышает риск возникновения техногенных пожаров.

Необходимо всецело применять способность к природному восстановлению экологических систем. Пострадавшие от огня территории лесного массива должны подвергаться восстановлению лишь в том случае, когда натуральное восстановление попросту невозможно. При этом также стоит ожидать нанесения вреда окружающей среде: эрозии почвы и т.д. Восстановление лесных массивов необходимо сосредоточить на сохранении естественного ряда лесных культур, присущих данной территории. Необходимо избегать гомогенных насаждений и монокультур вследствие их повышения риска возникновения и развития лесных пожаров. Для эффективной и успешной реализации данных мер восстановления, в подготовку и дальнейшее их осуществление должны быть подключены все причастные стороны.

Примеры мер, которые должны быть приняты в срочном порядке:

- корректировка выделения средств на реализацию мер профилактики и ликвидации лесных пожаров, восстановления экосистем;
- анализ и оценка полных экономических последствий лесных пожаров;
- формирование дополнительных рабочих мест в сфере пиробезопасности;
- внесение необходимых поправок в законодательство, а также разработка целесообразных законов для устранения изменений в хозяйственной деятельности на территориях, подвергшихся действию пожара, усиление санкционных мер за поджоги, регулировка спекуляционных действий на рынке древесины.

При моделировании лесных пожаров выделяют модели динамики лесных пожаров и модели последствий лесных пожаров, особенно тех, которые приводят к чрезвычайным лесопожарным ситуациям.

Среди математических моделей, которые предназначены для информационно-аналитической поддержки управленческих решений по борьбе с лесными пожарами и вызываемыми ими чрезвычайными лесопожарными ситуациями, самыми трудными и важными являются модели, которые описывают динамику лесных пожаров. Данные модели условно можно разделить на экспериментальные и аналитические. Указанные модели описывают динамику различных видов лесных пожаров и разработаны разными авторами.

В табл. 1 приведена сравнительная характеристика математических моделей лесных пожаров.

Таблица 1

Математические модели лесных пожаров

Имена исследователей	Годы исследований	Основные особенности исследований и математических моделей
А.М. Гришин	1980-ые	<p>Данная модель представляет собой модель многофазной пористой реагирующей среды и описывает горение, сушку, пиролиз, а также нагрев древесины. Эта модель основывалась на фундаментальных физических законах, таких как закон сохранения энергии, массы, а также количества движения. В ряде работ Гришина представлена компьютерная и алгоритмическая реализация процессов возникновения, протекания и распространения лесных пожаров в республике Беларусь. Наиболее быстро распространяющиеся и наносящие огромный материальный ущерб беглые верховые лесные пожары являются отличным примером показателей эффективности данной математической модели [1].</p> <p>На базе модели Гришина построено огромное количество математических моделей, к примеру, модель теплового взаимодействия пожара с сооружениями из дерева (А. Фильков), двумерная модель распространения верховых пожаров (В.А. Перминов) и другие.</p>
R.R. Linn	1997	<p>Данная физико-математическая модель турбулентности течений при лесных пожарах использует вычислительный метод частиц в ячейках, а также элементы теории процессов переноса в многофазных реагирующих средах. С помощью этой модели был численно подтвержден известный из эксперимента эффект повышения скорости продвижения нижнего лесного пожара с ростом угла уклона подстилающей поверхности, получены поля скоростей, температуры и концентрации компонентов, рассчитаны задачи вычисления параметров нижних лесных пожаров.</p>
W.L. Fons	1946	<p>Впервые аналитические и экспериментальные исследования природных пожаров появились в 1940-х годах. Карри вместе с Фонсом начали изучать физику пожара с конца 30-х годов. В 1946 году Фонс опубликовал математическую модель прогнозирования скорости распространения пожара. Исследования Фонса явились предпосылками создания двух школ североамериканского континента, разработавших модели возникновения и продвижения природных пожаров, которые стали стандартами в Канаде и Соединенных Штатах Америки. В Канаде в качестве данного стандарта используются созданные Байрамом основанные на уравнении интенсивности пожара модели, а в США - математические модели, разработанные Р. Ротермелом .</p>

Имена исследователей	Годы исследований	Основные особенности исследований и математических моделей
G.M. Вугам	1956	<p>Данная математическая модель основана на выполненных во время экспериментальных пожаров в реальных лесных условиях (в сосновых лесах) измерениях, она позволяет определить взаимосвязь между долей потребляемого топлива, теплотой сгорания и длиной пламени. Выведенное Байрамом уравнение интенсивности лесного пожара выглядит следующим образом:</p> $I = HwR, \quad (1)$ <p>где I - интенсивность лесного пожара, кВт/м, H - теплота сгорания горючего, кДж/кг, w - масса горючего, потребляемого на единицу площади, кг/м², R - скорость продвижения фронта лесного пожара, м/сек. Спустя 10 лет после вывода данной зависимости она была широко признана среди исследователей канадских лесных пожаров. В 1960-х годах было решено использовать уравнение интенсивности природного пожара Байрама для прогнозирования параметров канадских лесных пожаров. В итоге это уравнение было добавлено в систему оценки опасности лесных пожаров Канады. Одним из недостатков модели Байрама являются входные переменные, включающие параметры, которые можно измерить только во время течения пожара, например, длина пламени. Это доставляет затруднения при использовании модели в случае прогнозирования скоростей горения. Попытка избавления от данного недостатка путем прогнозирования, например, длины пламени, снижает точность математической модели [2].</p>
Г.А. Доррер	1979	<p>Модель описывает процесс продвижения лесных пожаров как подвижную волну в анизотропной и неоднородной среде. Используя методы гамильтоновой механики, была разработана геометрическая теория движения плоских фронтов лесных пожаров, а также формулы для расчета площадей, периметров и контуров природных пожаров, созданы алгоритмы построения фронтов лесного пожара. Данная сложная система моделирования процессов локализации и распространения лесных пожаров включает в себя вспомогательные математические модели, например, модели структуры слоев лесного горючего, а также изменения содержания в нем влаги.</p>
R.C. Rothermel	1972	<p>Математическая модель основана на уравнении сохранения энергии, полученном из результатов многочисленных работ Франдсена. Скорость распространения лесного пожара была представлена Ротермелом следующим образом:</p> $R = R_0(1 + \varphi(U) + \varphi(S)), \quad (2)$ <p>где R – скорость распространения лесного пожара, R_0 – плотность слоя горючих материалов, $\varphi(U)$ – размер частиц растительной горючей материи, $\varphi(S)$ – скорость сгорания растительного горючего.</p> <p>Математическая модель не использует каких-либо новых теоретических положений, касающихся процесса горения, она основана на обобщении большого количества экспериментального материала, который прошел серию полевых испытаний.</p>

Имена исследователей	Годы исследований	Основные особенности исследований и математических моделей
		<p>Даже при наличии некоторой критики в сторону математической модели Ротермела, она является одной из наиболее эффективных зарубежных аналитических экспериментальных моделей, которые предназначены для расчета скорости распространения огня при низовых пожарах по лесным горючим материалам.</p> <p>Следует также отметить значительные недочеты модели Ротермела, несмотря на ее широчайшее применение. Изначальная модель - одномерная, результат ее применения - скорость распространения фронта лесного пожара по направлению ветра. Математическая модель не дает ответа на вопрос, какова скорость пожара в направлении флангов и тыла пожара. Программные системы, разработанные позже, реализуют различные подходы, не содержащие соответствующего обоснования и зачастую являющиеся интуитивными.</p> <p>В ходе дальнейших исследований модель Ротермела обобщалась для создания расчетных методов. В ряде работ представлена адаптация, а также компьютерная реализация математической модели Ротермела с учетом лесных условий Белоруссии. Программный комплекс позволяет моделировать распространение природных пожаров в режиме реального времени с учетом различных барьеров (ручьев, минерализованных полос и так далее) и неоднородности распределения растительности. Программный комплекс позволяет рассчитать площадь, периметр лесного пожара в разное время, а также форму контура. Была реализована возможность просмотра результатов на электронных картах местности и дальнейшего экспорта в географические информационные системы.</p>
С.Е. Van Wagner	1973	<p>Модель концептуально основана на теории, согласно которой излучение пламени является наиболее важным фактором в механизме распространения лесных пожаров. Главными входными параметрами данной математической модели являются запас горючего по отношению к единице площади, длина пламени, доля поглощаемой горючим радиации, интенсивность испускаемой пламенем радиации, угол наклона пламени к горючему слою, влажность горючего. В 1973 году Ван Вагнер вывел формулу для высоты смертельного ожога кроны, основываясь на наблюдениях в хвойных лесах. В данной математической модели, равно как и в модели Байрама, часть входных переменных не может быть заранее измерена.</p>
Г.Н. Коровин	1969	<p>Г.Н. Коровин получил математическую модель скорости продвижения огня, основанную на результатах огневых экспериментов. Главная особенность модели Коровина заключается в том, что она вычисляет не только скорость природного пожара в направлении ветра, но и скорость продвижения пламени в направлениях, которые перпендикулярны ветру. Также находятся значения длины кромки пожара и пройденной огнем площади.</p>
М.А. Софронов	1967	<p>Математическая модель распространения низового пожара М. А. Софронова проста и пригодна для практических расчетов:</p> $V_x = V_0 * K_w * K_r * K_\phi, \quad (3)$ <p>где V_0 - базовая скорость, м/мин; K_w - коэффициент воздействия ветра; K_r - коэффициент воздействия относительной влажности воздуха; K_ϕ - коэффициент воздействия уклона поверхности [3].</p>

Имена исследователей	Годы исследований	Основные особенности исследований и математических моделей
		<p>В этой математической модели главными факторами, которые оказывают влияние на скорость продвижения огня при низовых пожарах, являются не только уклона поверхности и ветер, но и имеющая ощутимые суточные колебания относительная влажность воздуха.</p> <p>При этом в качестве основной скорости принимается скорость продвижения кромки низового лесного пожара при следующих условиях:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) отсутствие ветра - штиль, 2) отсутствие уклона - горизонтальная поверхность, 3) относительная влажность атмосферного воздуха - 40 %. <p>Важно отметить, что воздействие ветра, влажности воздуха и уклона на скорость продвижения огня определялось в процессе опытных выжиганий и огневых экспериментов.</p>

Серия работ Ю. А. Гостинцева и Ю.И. А. Суханова об аэродинамике атмосферы во время крупных пожаров является одним из примеров аналитического подхода описания лесных пожаров. Авторами был рассмотрен плоский турбулентный атмосферный поток, который был вызван точечным пожаром.

Исследования А.Л. Сухинина и Э.В. Конева посвящены созданию на основе механизмов теплообмена при сгорании растительных материалов математической модели скорости распространения лесного пожара. Опираясь на уравнения теплового баланса и закон сохранения энергии, а также учитывая усредненные значения угла направленности, расстояния между частицами, времени горения и зажигания, они предложили уравнение скорости распространения горения слоев лишайника и хвои сосны.

Конев внес огромный вклад в дальнейшее изучение механизма продвижения процесса горения по лесным горючим материалам. Его математические модели трудно реализовать, поскольку он рассматривает распространение огня в твердой фазе от одной частицы к другой. Помимо этого, Э.В. Конев не учитывает изменение фазы газа при лесном пожаре.

Концепцией, близкой к математическим моделям Ван Вагнера и Байрама, стала модель, предложенная Телицыным и Курбацким. Курбацкий предложил описать форму лесного пожара в качестве фигуры, которая состоит из двух полуэллипсов с общей осью.

Полезная для проведения прикладных расчетов по динамике низовых лесных пожаров математическая модель скорости низового пожара Н.П. Курбатского и Г.А. Ивановой также основана на обработке большого количества экспериментальных данных.

Среди иностранных математических моделей необходимо также отметить модель Дж. Дэвиса и А. Линдермута, предназначенную для прогнозирования скорости распространения пламени в зарослях карликового дуба на основе опытов с огнем.

Исследования динамики лесных пожаров в Австралии связаны с необходимостью предсказания поведения внеплановых пожаров с целью их тушения и организацией преднамеренных пожаров. Индекс пожароопасности МакАртура широко распространен на территории Австралии. Проведенное для территории восточной Австралии исследование МакАртура, было распространено на юго-восточную часть континента. Для достижения этой цели использовались разработанные Питом таблицы, также были взяты в расчет условия природы юго-восточной Австралии. Пит и МакАртур являются первопроходцами в изучении природных пожаров Австралии. Необходимо отметить разработанные улучшения этих работ, которые были отражены в индексе пожарной опасности и

в ряде большого числа редакций таблиц распространения лесных пожаров, характерных для Западной Австралии.

Анализ проблем и задач в области моделирования лесных пожаров и, прежде всего, низовых лесных пожаров свидетельствует об большой сложности и неоднозначности моделирования, так как в основе данного процесса лежат вероятностные процессы. Действительно все природные процессы носят вероятностный характер. Нельзя заранее точно предсказать как будет развиваться опасный природный процесс, каковы будут последствия такого развития. Поэтому многие ученые нашей страны и мира, занимавшиеся и занимающиеся вопросами лесной пирологии не смогли создать достаточно точных математических моделей прогнозирования динамики лесных пожаров. Проведен анализ ретроспективных работ в данной области знаний.

Таким образом, анализ математических моделей прогнозирования лесных пожаров различных видов, включая низовые, свидетельствует о большом разнообразии методических подходов к прогнозированию динамики лесных пожаров.

Литература

1. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров. / А.М. Гришин. - Томск: Изд-во ТГУ. - 1981. - 278 с.
2. Byram G.M. The modeling of fire whirlwinds. / G. M. Byram, R. E. Martin // Forest Science. – 1970. - Vol. 16, № 4. - P. 386-398.
3. Софронов М.А. Лесные пожары в горах Южной Сибири / М.А. Софронов. - М.: Наука. - 1967. - 150 с.

Сведения об авторе

Анойкин Роман Константинович, аспирант ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). Тел.: 8-929-975-18-41; e-mail: notsuperman@yandex.ru.

УДК 002.66

DOI: 10.36535/0869-4176-2020-03-12

НАУКОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗРАБОТКИ ТЕЗАУРУСА РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ЧС В РОССИИ: РИСКИ, ВЫЗОВЫ, УГРОЗЫ, КОНФЛИКТЫ

**Доктор техн. наук С.С. Терещенко, доктор техн. наук С.М. Резер, Г.С. Дугин,
З.В. Тимошенко, А.С. Терещенко, И.С. Терещенко
ВИНИТИ РАН**

Исследуются приграничные факторы и семантика проектных решений сети региональных аналитических служб, создаваемых согласно Проекту Совета Безопасности РФ (1995 г.), Распоряжения Президента РФ и Постановления Правительства РФ (1994-1995 гг.). Учитывается Концепция Критических Систем Жизнеобеспечения в условиях международного научного, технологического, индустриального и гуманитарного