

УДК 630

А.М. Гришин

**О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ
ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ И КАТАСТРОФ¹**

Дается краткий обзор основных результатов, полученных в Томском государственном университете и в мире по физическому и математическому моделированию природных пожаров.

Ключевые слова: *Математические модели, природные пожары, излучение, теплообмен с окружающей средой, предельные условия распространения природных пожаров, геоинформационные системы.*

Природными называют лесные, степные и торфяные пожары. Надо сказать, что влияние природных пожаров на окружающую среду неоднозначно оценивается разными учеными [1, 2]. В частности, в работе [1] отмечается факт повышения плодородия почв после пожаров и утверждается, что они позволяют повысить видовое разнообразие в природных экосистемах. Эта точка зрения обосновывается тем, что за миллионы лет эволюции лесные биогенные приспособились к такому периодическому действующему фактору, как лесные пожары, и поэтому огонь скорее надо рассматривать «как средство воздействия на окружающую среду, а не только как разрушающую силу» [1].

Противоположный вывод делается в [2], где утверждается, что с «появлением на Земле человека характер лесных пожаров стал меняться и они в большей степени превращаются из природного в антропогенный фактор, вредный не только для человека, но и для природы в целом».

Следует отметить, что в последнее время негативное влияние природных пожаров на состояние окружающей среды усилилось. В частности, считают установленным эффект глобального потепления климата, который объясняют в числе прочих причин и выбросами CO₂ и других многоатомных газов от природных и техногенных пожаров и возникновением так называемого парникового эффекта [3].

Помимо глобального влияния на климат Земли в результате действия природных пожаров возникают региональные катастрофы, например: массовые городские пожары (Лос-Аламос, США, май 2000 г.), катастрофическая задымленность огромных территорий, включая г. Москву осенью 2002 г. в результате горения торфяников на территории Московской области, а также многочисленные локальные пожары в поселках и на складах древесины, расположенных на территориях, охваченных лесными пожарами.

Цель данной работы – дать краткий обзор основных результатов, полученных по теории природных пожаров и катастроф в XX веке, и их внедрение в практику.

1. Краткий обзор математических моделей природных пожаров

За последние 50 лет выполнено огромное количество исследований и разработано много математических моделей лесных пожаров. Все они могут быть разбиты на два больших класса: лесопирологические и физико-математические.

¹ Статья выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ: 08-01-99019, 08-01-00496 и проекта РНП 2.1.1.2742 Федерального агентства по образованию (ФАО).

Содержательный обзор исследований в мире по проблеме моделирования распространения лесных пожаров, опубликованных до 1989 г., дан в работе [4]. Как показывает анализ, все математические модели лесных и торфяных пожаров можно разбить на четыре группы:

- 1) модели прогноза скорости распространения лесного пожара;
- 2) модели прогноза контуров лесного пожара;
- 3) модели прогноза характеристик течения, тепло- и массопереноса во фронте и зоне пожара;
- 4) общие математические модели, в рамках которых могут быть предсказаны все характеристики (скорость распространения, контур лесного пожара, поля температур, концентраций компонентов и скоростей) во фронте и в зоне лесного пожара.

Большой интерес представляют две научные работы, которые не рассматривались в обзоре [4], так как они были завершены только в 1997 г.

В диссертации R.R. Linn [5] используются элементы теории процессов переноса в многофазных реагирующих средах и метод частиц в ячейках, развитый его научным руководителем профессором F. Harlow. В работе дается физико-математическая модель турбулентности течений при лесных пожарах. На основе этой модели были решены двумерные задачи теории низовых лесных пожаров и получены поля скоростей, температур и концентраций компонентов в вертикальной плоскости x, z и численно подтвержден известный из эксперимента эффект увеличения скорости распространения низового лесного пожара с ростом угла наклона подстилающей поверхности.

К основным недостаткам этой модели следует отнести:

1. Отсутствие четкой физической модели лесного пожара – совокупности причинно-следственных связей, влияющих на поведение этого явления.
2. Игнорирование ограниченности скоростей физико-химических процессов в зоне лесного пожара.
3. Введение множества различных эмпирических постоянных значений температур, испарения, зажигания, окисления углерода, горения углеводородов, которые на самом деле являются функциями времени и координат.
4. Игнорирование эффекта аэроупругости лесной растительности.

В работе [6] последовательно используются теория многофазных реагирующих сред и известный алгоритм SIMPLE численного решения уравнений конвективного переноса Патанкара – Сполдинга. С использованием упомянутых выше численных методов в [6] также решена задача о распространении низового лесного пожара по слою лесных горючих материалов, расположенному на наклонной подстилающей поверхности. К недостаткам модели следует отнести допущение о сферичности элементов лесных горючих материалов, ограниченности числа компонентов в газовой фазе, отсутствие физически содержательной модели турбулентности и игнорирование эффекта аэроупругости растительности.

В известных в мире лесопирологических моделях, разработанных Fons и Emmons; Hottel, Williams и Steward; Albini; Thomas; Van Wagner; Anderson; Pagni и Paterson; Г.П.Телицыным, Э.В.Коновым и А.И.Сухининым; Sekidge, De Mestre, Catchpole, Anderson и Rothermal, Г.А. Дорпером и R. Weber, как правило, не учитываются законы сохранения массы химических компонентов и закон сохранения количества движения, а при определении контура лесного пожара используется эмпирически задаваемая скорость распространения фронта лесного пожара. Такой метод позволяет достаточно просто определять контур лесного пожара и площадь

лесного фитоценоза, пройденную огнем. В то же время этот упрощенный подход не позволяет учитывать взаимное влияние приземного слоя атмосферы и фронта лесного пожара друг на друга и предсказывать предельные условия воспламенения и распространения лесных пожаров, при реализации которых в окружающей среде процесс горения не возникает или прекращается.

В России работа по созданию физико-математической модели лесных пожаров была начата в ТГУ в инициативном порядке в 1976 г. В дальнейшем инициатива сотрудников ТГУ получила поддержку секции «Теплообмен излучением» (председатель секции – д.т.н. А.Г. Блох) Научного совета Государственного комитета по науке и технике (ГКНТ) СССР по проблеме «Массо- и теплоперенос в технологических процессах» (председатель совета – член-корреспондент АН СССР Р.И. Солоухин) и директора Института теоретической и прикладной механики СО АН СССР академика Н.Н. Яненко. Благодаря этой поддержке вышло Постановление ГКНТ СССР № 192 от 28 апреля 1977 г., в рамках которого ТГУ получил задание «Разработать математическую модель интенсивных лесных пожаров и программу численного решения системы уравнений для оперативных расчетов скорости и фронта распространения этих пожаров в конкретных метеорологических условиях».

Первое время работа по созданию математической модели лесных пожаров проводилась под контролем временной комиссии секции «Теплообмен излучением», которая была создана 24 февраля 1977 г. решением бюро Научного совета ГКНТ СССР по проблеме «Массо- и теплоперенос в технологических процессах». В работе комиссии в разное время принимали участие 25 специалистов из 15 организаций СССР, где проводились исследования лесных пожаров. На ее заседаниях на конкурсной основе обсуждались различные физико-математические модели лесных пожаров. В результате в декабре 1977 г. в качестве общей физико-математической модели лесных пожаров была принята модель, разработанная в ТГУ [7 – 9]. В дальнейшем эта модель была обсуждена и одобрена на заседании секции «Теплообмен излучением», а затем 6 – 7 апреля 1978 г. и на бюро упомянутого выше совета ГКНТ СССР [10, 11].

В рамках общей математической модели лес при пожаре считался пористодисперсной реакционноспособной сплошной средой, которая неоднородна по структуре и составу. Как показывают оценки, характерное расстояние между деревьями во много раз меньше характерного размера типичного лесного массива, что и позволяет использовать методы механики сплошной среды для математического описания лесных пожаров [7 – 9].

В процессе работы над математической моделью стало ясно, что необходима информация по механизму передачи энергии от фронта пожара к окружающей среде, по коэффициентам переноса по кинетическим характеристикам химических реакций, к которым относится пиролиз лесных горючих материалов (ЛГМ) и реакции окисления газообразных и конденсированных горючих продуктов пиролиза. Кроме того, необходимо было создать относительно простую полуэмпирическую модель сушки ЛГМ, а также знать объемные доли фаз, аэродинамические характеристики лесных массивов и другие параметры, характеризующие структуру такой своеобразной сплошной среды, как лес. В связи с этим были проведены многочисленные полунатурные и лабораторные экспериментальные исследования и разработаны методики решения обратных задач механики реагирующих сред [12], которые в первом приближении позволили определить указанные выше параметры и создать банк исходных данных, необходимый для математического моделирования лесных пожаров.

Другой особенностью лесных пожаров является их сильное влияние на приземный слой атмосферы, который, в свою очередь, влияет на состояние фронта пожара. Для учета этого взаимодействия при решении конкретных задач теории лесных пожаров использовались так называемые сопряженные постановки задач [13], в рамках которых используются одновременно несколько моделей механики сплошной среды и поэтому удается наиболее точно учесть влияние фронта пожара и приемного слоя атмосферы друг на друга. Для численного решения сопряженных задач использовался разработанный ранее так называемый итерационно-интерполяционный метод [14] и специальные методики численного счета, основанные на методе Патанкара.

2. Основные результаты исследования природных пожаров

На основе полученных в ТГУ результатов экспериментальных и теоретических исследований можно сделать следующие выводы [7 – 9, 15, 16]:

1. Большой лесной пожар представляет собой принципиально нестационарный и трехмерный аэротермохимический процесс, в котором значительную роль играет сила Кориолиса.

2. Полное физическое моделирование лесных пожаров невозможно без полного совпадения характеристик природы и модели.

3. Типы лесных пожаров удается идентифицировать при помощи таких существенных критериев подобия, как числа Струхала, Фруда, Кориолиса, Рейнольдса, безразмерного вдува и безразмерной температуры во фронте горения.

4. В результате численного решения двумерных задач аэродинамики лесных пожаров установлено, что при взаимодействии ветра с вдуваемыми из фронта лесного пожара нагретыми продуктами горения имеют место два предельных типа течения: однонаправленное (струйный пограничный слой) и конвективная колонка (наклонная струя нагретых газодисперсных продуктов сгорания). Для последнего типа течения перед фронтом лесного пожара реализуется крупный тороидальный вихрь, в результате чего скорости потока вблизи подстилающей поверхности и в приземном слое атмосферы имеют разное направление, причем скорость ветра вблизи фронта лесного пожара в приземном слое атмосферы увеличивается.

5. Численно показано, что напряжение трения перед фронтом пожара резко падает, а тепловой поток меняет знак, что свидетельствует о том, что однонаправленное течение и теплоперенос в приземном слое атмосферы в окрестности фронта пожара при значительной скорости ветра имеют характер тепловой завесы. Установлено, что в этом случае свободная конвекция нагретых продуктов горения относительно слабо влияет на величину конвективного теплового потока перед фронтом пожара.

6. Исследованы закономерности распространения горящих частиц перед фронтом пожара. Показано, что с ростом скорости ветра, угла вылета и температуры частиц дальность их полета возрастает, а с ростом их размера и плотности – убывает.

7. В результате численного решения задачи аэродинамики осесимметричного лесного пожара показано, что в его окрестности имеет место крупный тороидальный вихрь, обеспечивающий тепло- и массообмен зоны горения с внешней средой. Численно, с использованием точной $k - \epsilon$ -модели турбулентности, показано, что для описания установившихся турбулентных течений может быть использована равно-

весная k – ε -модель турбулентности (модифицированная модель Прандтля), а для неустановившихся течений использование упрощенной модели приводит к значительным погрешностям в определении полей скорости и температуры.

8. Экспериментально и теоретически установлено [7 – 9, 16], что фронт любого природного (лесного, торфяного, степного) пожара состоит из зоны прогрева, сушки и пиролиза природных (растительных) горючих материалов, а также зоны пламенного горения газообразных продуктов пиролиза (см. рис. 25 [8]). Используя эти сведения о структуре фронта, удалось получить аналитические формулы для скорости распространения лесных [8, 9] и степных [16] пожаров.

9. Предложены самосогласованные математические модели природных (верховых и низовых лесных, торфяных, а также степных) пожаров, точно в рамках законов сохранения массы, импульса и энергии учитывающие тепло- и массообмен между приземным слоем атмосферы и пологом леса во время природного пожара. В результате численного решения задачи о возникновении и распространении верхового пожара получена та же структура фронта (см. рис. 25 [8]), что и в опытах, и установлено, что горение во фронте пожара носит диффузионный характер, т.е. лимитируется притоком окислителя и газообразных горючих продуктов пиролиза в зону горения. Показано, что основное количество энергии в этой зоне выделяется при горении газообразных продуктов пиролиза.

10. Теоретически методом малых возмущений и численно исследована устойчивость контура лесного пожара с учетом сложной структуры его фронта. Доказано, что контур лесного пожара абсолютно неустойчив по отношению к малым возмущениям. Для больших лесных пожаров, когда поперечный размер очага пожара превышает некоторую величину, контур теряет первоначальную форму и становится выпукло-вогнутым. Этот результат согласуется с данными наблюдений за реальными лесными пожарами [8].

11. Методом малых возмущений и численно установлено, что существуют предельные условия распространения лесных пожаров по запасу и влагосодержанию ЛГМ, скорости ветра и скорости тепло- и массообмена [8].

12. В результате математического и физического моделирования процессов тепло- и массопереноса в лесном фитоценозе во время лесного пожара показано, что для вершинных верховых лесных пожаров, распространяющихся в продуваемых лесных фитоценозах, основное количество энергии из фронта пожара в фитоценоз перед ним передается за счет вынужденной конвекции (ветра), в результате которой факел пламени сильно отклоняется от вертикали, а для низовых и повалых верховых лесных пожаров большое значение имеет перенос энергии излучением [8].

13. В результате упрощающих допущений получены приближенные аналитические формулы для скорости распространения низовых и верховых лесных, а также степных пожаров, плотности суммарного теплового потока и ширины фронта лесного пожара, которые удовлетворительно согласуются с результатами численных расчетов.

14. В результате математического моделирования перехода низового лесного пожара в верховой было установлено, что для соснового древостоя это явление имеет место при высоте нижней границы крон деревьев над высотой напочвенного покрова около 0,7 м при условии, что удельный тепловой импульс в полог леса не меньше 2600 кДж/м^2 . Это согласуется с экспериментальными данными. Установлено, что коэффициент излучения ε является функцией времени, которая зависит от лесопирологических свойств низового пожара и лесных фитоценозов. По-

казано, что зажигание полога леса носит газофазный характер, а игнорирование двухтемпературности среды в пологе леса приводит к уменьшению критической высоты полога леса на 40 – 50%.

15. С помощью математического моделирования установлено, что в зависимости от расстояния между лесными массивами и источником светового излучения реализуются три режима зажигания: вырожденный, нормальный и невоспламенение. В результате расчетов были получены времена зажигания, которые меньше соответствующих значений времен прихода взрывной волны на подстилающую поверхность, что согласуется с результатами обследования территории Хиросимы и Нагасаки после ядерной бомбардировки в 1945 году и района падения Тунгусского метеорита в 1908 году [9].

16. Показано, что для техногенных катастроф (воздушный ядерный взрыв) контур зажигания для однородного лесного массива имеет форму окружности с центром в эпицентре взрыва, а для природных (столкновительных) катастроф форма контура зажигания отличается от окружности. В частности, в согласии с данными наблюдений форма контура зажигания при взрыве Тунгусского метеорита представляет собой совокупность дуги окружности с дугой эллипса, большая полуось которого вытянута в сторону движения метеорита. Параметрический анализ решения этих задач показал, что площадь S_* области зажигания растет с ростом полной энергии, выделившейся при катастрофе, и доли энергии S_H , превратившейся в излучение. Установлено, что с использованием общей математической модели удастся получить S_* , которая удовлетворительно согласуется с результатами исследования зоны падения Тунгусского метеорита. В результате математического моделирования было найдено, что зажигание ЛГМ носит газофазный характер, т.е. воспламеняются газообразные продукты пиролиза лесных горючих материалов, которые при этом полностью не выгорают. Часть из них под действием массовой силы всплывает навстречу падающей ударной волне и взрывается при взаимодействии с ней. Оценки, выполненные по известным данным для Тунгусского небесного тела, показали, что до 20% регистрируемой энергии взрыва может обеспечиваться в результате взрыва газообразных горючих продуктов пиролиза ЛГМ, аналогичный вывод был сделан при исследовании зажигания лесных массивов при ядерных взрывах [9].

17. Теоретически и экспериментально обнаружен эффект усиления ударных волн при взаимодействии с зоной пиролиза фронта лесного пожара. Этот эффект объясняется взрывом смеси газообразных продуктов пиролиза с воздухом и открывает новые возможности для борьбы с лесными пожарами.

18. Исследовано действие лесных пожаров на некоторые конструкционные материалы (стеклопластики) и показано, что наиболее опасны для этих конструкций плавальные верховые лесные пожары [8].

19. В результате комплексных теоретико-экспериментальных исследований найдены предельные условия возникновения и распространения низовых лесных пожаров для некоторых типов лесных горючих материалов [8, 9].

20. В результате лабораторных исследований найдено, что колебания элементов лесных горючих материалов по-разному влияют на процессы их воспламенения и горения в зависимости от частоты и амплитуды колебаний [17].

21. Экспериментально исследован процесс низкотемпературной сушки ($291 \text{ K} \leq T \leq 302 \text{ K}$) слоя лесных горючих материалов (ЛГМ) в дозвуковой аэродинамической трубе МТ-324 и установлено, что если угол наклона плоскости слоя ЛГМ к горизонту меняется в пределах $0 < \alpha < 20^\circ$, то при ламинарном режиме его

обтекания потоком воздуха со скоростью, не превышающей $v_e = 0,69$ м/с, и значений плотности укладки элементов ЛГМ в пределах $44,5 \text{ кг/м}^3 \leq \rho_s \leq 111 \text{ кг/м}^3$, угол наклона α , скорость потока v_e слабо влияют на скорость сушки. Экспериментально установлено, что внутри слоя ЛГМ почти отсутствует течение воздуха [18], и обоснована общая физико-математическая постановка задачи о сушке слоя ЛГМ [19]. Разработаны математическая модель для сушки слоя ЛГМ [19 – 20] и детерминированно-вероятностная модель прогноза лесной пожарной опасности [20, 21].

22. С использованием математической модели торфяных пожаров, итерационно-интерполяционного метода и метода осреднения уравнений по толщине торфяной залежи были решены задачи о зажигании торфяника [22, 23] и стационарном распространении фронта торфяного пожара [24]. Было установлено, что структура фронта торфяного пожара в качественном отношении совпадает со структурой фронта лесного пожара и горение носит диффузионный характер, т.е. лимитируется притоком окислителя. Расчеты показали, что скорость распространения ω сильно зависит от начальной пористости торфа и коэффициента массообмена с окружающей средой и с ростом этих величин ω растет вследствие наличия запаса кислорода в порах и притока O_2 во фронт торфяного пожара из приземного слоя атмосферы [24].

23. Приведены экспериментальные и теоретические исследования огненных смерчей [25 – 27]. Установлено, что скорость вращения этих смерчей растет с ростом их высоты и температуры горения и убывает с ростом радиуса [26].

24. Разработана детерминированно-вероятностная модель прогноза катастроф, в том числе и лесной пожарной опасности [28, 29].

25. Создана математическая модель продуктивности лесных фитоценозов [30].

3. Сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными

Известно, что критерием истинности теоретических результатов является их согласование с данными наблюдений за характеристиками реальных лесных пожаров. Поэтому целесообразно сравнить теоретические результаты с экспериментальными данными. Как уже отмечалось выше, результаты математического прогноза радиуса зажигания лесных массивов при взрыве Тунгусского небесного тела удовлетворительно согласуются с данными наблюдений. Отмечается, по крайней мере, качественное согласование типов течений, возникающих при лесных пожарах [7 – 9], с результатами математического моделирования полей скоростей и температур в зоне лесного пожара, которые представлены выше. В работе [31] дана общая кривая зависимости скорости распространения верхового пожара от скорости ветра, которая получена на основе обработки литературных данных по пожарам разных типов, в том числе и верховых. Надо сказать, что экспериментальных данных по верховым лесным пожарам мало. В частности, при невозмущенной скорости ветра $u_\infty = 18$ м/с на высоте 10 м; плотности сухого органического вещества $\rho_c = 0,2 \text{ кг/м}^3$ и влагосодержании $W = 66,6\%$ расчетное значение нормальной скорости распространения $\omega_n = 5,8$ м/с согласуется с экспериментальным значением $\omega_n = 6$ м/с. При $u_\infty = 27$ м/с расчетное значение $\omega_n = 7,2$ м/с, а экспериментальное 6,8 м/с [31]. Неплохое согласование наблюдается и с результатами некоторых зарубежных исследований, которые приведены в обзоре [11].

Сравнение опытных профилей температуры для верховых лесных пожаров с теоретическими кривыми показало, что с учетом точности задания исходных данных эти результаты удовлетворительно согласуются друг с другом. В то же время

следует подчеркнуть, что математическое моделирование дает только осредненные по Рейнольдсу (но не действительные) значения параметров состояния среды и скорость распространения пожара [8, 9].

В [9] показано, что максимальная величина площади, ограниченной контуром загорания, и форма контура согласуются с результатами обследования места падения Тунгусского метеорита.

На основе общей математической модели лесных пожаров удалось дать новую общую постановку задачи о сушке слоя ЛГМ с учетом сопряженного тепло- и массообмена этого слоя с атмосферой [19, 20]. Сравнение результатов расчетов, полученных на основе этой математической постановки задачи с экспериментальными данными [18], показало, что эти результаты удовлетворительно согласуются друг с другом.

Таким образом, общая математическая модель верховых лесных пожаров позволяет достаточно точно прогнозировать скорость возникновения и распространение природных пожаров.

4. О внедрении полученных результатов в практику

Научные исследования в первую очередь проводятся для получения фундаментальных закономерностей в развитии окружающего нас мира, а также для использования их для решения задач, имеющих большое значение для практики.

В результате многолетних научных теоретических и экспериментальных исследований предельных условий¹ распространения природных пожаров, сотрудниками кафедры физической и вычислительной механики было получено 24 авторских свидетельств на различные способы и устройства для борьбы с природными пожарами. К сожалению, ни одно из них не было внедрено на практике. В первую очередь это объясняется отсутствием в России эффективной системы внедрения, снижением финансирования баз авиационной охраны лесов России и недостатком времени и возможностей у сотрудников кафедры, необходимых для того, чтобы решить множество проблем (прежде всего финансовых, бюрократических), возникающих при внедрении.

За все время существования кафедры удалось внедрить в практику только две методики определения и расчета выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров и от источников горения при разливе нефти и нефтепродуктов. На согласование этих методик мною было затрачено около двух лет. Значительная помощь в официальном оформлении этих методик была оказана сотрудницей Госкомитета РФ по охране окружающей среды М.Ю. Булышко. В конечном счете, эти методики стали официальными и были рекомендованы для использования всем руководителям природоохранных органов Минприроды России.

Другим направлением внедрения новых знаний, полученных в результате научно-исследовательской работы, стало открытие на кафедре физической и вычислительной механики специализации «Моделирование и прогноз катастроф». Известно, что существует специальность «Безопасность жизнедеятельности», однако в официальной программе подготовки студентов по этой специальности нет раздела, посвященного моделированию и прогнозу катастроф.

Поскольку в последнее время в России почти каждый день происходят катастрофы, о которых говорится по радио и телевидению, то очевидно, что надо уметь

¹ Предельным называется такое состояние реагирующей среды во фронте пожара, при котором горение прекращается.

прогнозировать возникновение той или иной катастрофы и своевременными конкретными действиями предотвращать ее.

Для обеспечения подготовки студентов, специализирующихся в области теории катастроф, было издано учебное пособие в 3-х частях [34–36].

Кроме того, было опубликовано учебное пособие по итерационно-интерполяционному методу решения задач математической физики [37] и обратным задачам механики реагирующих сред [38].

Для подготовки аспирантов и докторантов по специальностям 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы» и 03.00.16 – «Экология» (физико-математические науки) были опубликованы монографии [39] и [40]. Кроме того, введена новая научно-исследовательская лаборатория для физического моделирования лесных, степных и торфяных пожаров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мур П.Д. Огонь: разрушительная или созидательная сила? // Impact of Science of Society. 1982. № 1. С. 3 – 13.
2. Софронов М.А., Вакуров А.Д. Огонь в лесу. Новосибирск: Наука, 1981. 128 с.
3. Гришин А.М. Физика лесных пожаров. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1994. 207 с.
4. Weber R.O. Modeling fire spread through fuel beds // Prog. Everg. Combust. Sci. 1990. V. 17. P. 65 – 82.
5. Linn R.R. A Transport Model for Prediction of Wildfire Behavior. Los-Alamos National Laboratory (USA), 1997. 195 p.
6. Porterie B., Morvan D., Larini M., Lorand J.C. Wild fire Propagation // A Two-Dimensional Multiphase Approach Physica gorenia e vzriva. 1998. No. 2. P. 261 – 278.
7. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1981. 277 с.
8. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 407 с.
9. Grishin A.M. Mathematical modeling of forest fire and new methods of fighting them. Publishing House of the Tomsk State University (Edited by Frank Albini), 1997. 390 p.
10. Трофимов В.П., Адзерихо К.С. Совместное заседание секций Научного совета ГКНТ СССР и АН СССР // Инж.-физ. журнал. 1979. Т. 36. № 2. С. 372 – 373.
11. Конев Э.В., Агибалов С.Г. В Научном совете по проблеме «Массо- и теплоперенос в технологических процессах // Инж.-физ. журнал. 1979. Т. 39. № 1. С. 166 – 168.
12. Гришин А.М., Кузин А.Я., Миков В.Л. и др. Решение некоторых обратных задач механики реагирующих сред. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1987. 246 с.
13. Гришин А.М., Фомин В.М. Нестационарные и сопряженные задачи механики реагирующих сред. Новосибирск: Наука, 1984. 318 с.
14. Гришин А.М., Берцун В.Н., Зинченко В.И. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1981. 160 с.
15. Гришин А.М. Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и их приложения // Успехи механики. 2002. Т. 1. № 4.
16. Гришин А.М., Бурасов Д.М. Об определении скорости распространения степных пожаров // Вычислительные технологии и математическое моделирование в науке, технике и образовании (Материалы Международной конференции). Алматы: Изд-во Казахского национального университета им. Аль-Фараби, 2002. С. 208 – 215.
17. Гришин А.М., Голованов А.Н. О возникновении колебаний элементов лесных горючих материалов и их влияние на режимы воспламенения и горения // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42. № 4. С. 127 – 135.
18. Гришин А.М., Голованов А.Н., Катаева Л.Ю., Лобода Е.Л. О сушке слоя лесных горючих материалов // Инженерно-физический журнал. Национальная академия наук Беларуси АНК ИТМО им. А.В. Лыкова. 2001. Т. 74. № 4. С. 58 – 64.

19. *Гришин А.М., Голованов А.Н., Катаева Л.Ю., Лобода Е.Л.* Постановка и решение задачи о сушке слоя лесных горючих материалов // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37. № 1. С. 65 – 76.
20. *Гришин А.М., Фильков А.И.* Об одной модели прогноза лесной пожарной опасности // Инж.-физ. журж. 2003. Т. 76. № 5. С. 154 – 158.
21. *Гришин А.М.* Моделирование и прогноз катастроф. Ч. 1. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. 524 с.
22. *Гришин А.М., Гришин П.В., Кузин А.Я.* Аналитические решения задач о прогреве и заживании слоя торфа // Сб. избр. докл. Междунар. конф. «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии». Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. С. 95 – 107.
23. *Гришин А.М., Якимов А.С.* Математическое моделирование процесса заживания торфа // Инж.-физ. журж. 2008. Т. 81. № 1. С. 191 – 199.
24. *Субботин А.Н.* О некоторых особенностях распространения подземного пожара // Инж.-физ. журж. 2003. Т. 76. № 5. С. 159 – 165.
25. *Гришин А.М., Голованов А.Н., Суков Я.В.* Физическое моделирование огненных смерчей // Докл. РАН. 2004. Т. 395. № 2. С. 196 – 198.
26. *Гришин А.М.* Аналитическое решение задачи о возникновении огненного смерча // Экологические системы и приборы. 2006. № 6. С. 50 – 51.
27. *Гришин А.М.* Влияние взаимодействия огненных смерчей друг с другом на их распространение // Докл. РАН. Физика. 2007. Т. 416. № 4. С. 1 – 2.
28. *Гришин А.М., Фильков А.И.* Ретроспективный анализ системы прогноза лесной пожарной опасности // Экологические системы и приборы. 2005. № 8. С. 29 – 35.
29. *Гришин А.М.* Детерминированно-вероятностные модели некоторых природных и техногенных катастроф // Сб. избр. докл. Междунар. конф. «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии». Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. С. 84 – 95.
30. *Гришин А.М.* Математическая модель взаимодействия лесной растительности с атмосферой // Сб. статей: «Проблема мониторинга и моделирование динамики лесных экосистем» / Под ред. А.С. Исаева. М.: Международный институт леса; Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, 1995. С. 104 – 128.
31. *Конеv Э.В.* Анализ процесса распространения лесных пожаров и палов // Теплофизика лесных пожаров. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1984. С. 99 – 122.
32. *Гришин А.М., Долгов А.А., Цимбалюк А.Ф.* Методика определения и расчета выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров // Издание официальное, Москва: Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды, 1997. 26 с.
33. *Гришин А.М., Долгов А.А., Цимбалюк А.Ф.* Методика расчета выбросов от источников горения при разливе нефти и нефтепродуктов // Издание официальное, Москва: Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды, 1997. 24 с.
34. *Гришин А.М.* Моделирование и прогноз катастроф. Ч. 1. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. 524 с.
35. *Гришин А.М.* Моделирование и прогноз катастроф. Ч. 2. Кемерово: Практика, 2005. 560 с.
36. *Гришин А.М., Петрин С.В., Петрина Л.С.* Моделирование и прогноз катастроф. Ч. 3. Томск: Изд-во Том. ун-та. 576 с.
37. *Гришин А.М., Зинченко В.И., Ефимов К.Н. и др.* Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. 320 с.
38. *Гришин А.М., Зинченко В.И., Кузин А.Я. и др.* Решение некоторых обратных задач механики реагирующих сред. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. 418 с.
39. *Гришин А.М., Фильков А.И.* Прогноз возникновения и распространения лесных пожаров. Кемерово: Практика, 2005. 201 с.
40. *Бурасов Д.М., Гришин А.М.* Математическое моделирование низовых лесных и степных пожаров. Кемерово: Практика, 2006. 134 с.