

УДК 614.841.42:553.97:004.92

МОДЕЛИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ ЛАНДШАФТНЫХ ТОРФЯНЫХ ПОЖАРОВ

С. Н. Грицков¹, Г. Н. Исаков²

¹ Учебный центр ФПС по ХМАО – Югре, gd3s@mail.ru

² Сургутский государственный университет, isak_nik@mail.ru

В работе рассмотрены некоторые подходы к моделированию возникновения и распространения ландшафтных торфяных пожаров и их связь с новыми методами мониторинга. Дан краткий обзор дистанционных методов мониторинга. Рассматривается возможность их применения не только для обнаружения уже возникших торфяных пожаров, но и для выявления участков, на которых в силу текущих метеорологических и иных условий вероятность возникновения торфяных пожаров высока. Такие участки должны стать объектами дополнительных усилий по предупреждению или раннему выявлению торфяных пожаров.

Ключевые слова: информационное проектно-ориентированное управление, система локального мониторинга на торфяных полях УрФО, безопасность, чрезвычайные ситуации, геометрическое моделирование.

MODELING AND MONITORING OF LANDSCAPE PEAT FIRES

S. N. Gritskov¹, G. N. Isakov²

¹ Training Center of the Federal Fire Service,
Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra, gd3s@mail.ru

² Surgut State University, isak_nik@mail.ru

The paper considers some approaches to modeling the occurrence and spread of landscape peat fires and their connection with new monitoring methods. A brief overview of remote monitoring methods is given. The potential for their use not only for discovery of started fire, but also for the purposes of areas detection where current meteorological and other conditions could possibly contribute to peat fires is described. Such places should become objects of additional efforts to prevent or detect early of peat fires.

Keywords: information project-oriented management, local monitoring system on peat fields of Ural Federal District, safety, emergency situations, geometric modeling.

Торфяные пожары по степени своей опасности занимают среди ландшафтных пожаров, будь то пожары естественного или искусственного происхождения, особое место. Это вызвано как сложностью борьбы с ними, так и широким перечнем вызываемых ими негативных последствий, многие из которых имеют долгосрочный характер. Связанные с торфяными пожарами факторы риска в современных условиях заставляют по-новому взглянуть на организацию способов борьбы с этим видом бедствия, зачастую приводящего к возникновению чрезвычайных ситуаций.

К краткосрочным и среднесрочным негативным последствиям торфяных пожаров относятся:

- переход торфяного пожара в лесной пожар через границу «торфяник-лес»;
- возникновение пожароопасной экстренной ситуации в населенных пунктах, примыкающих к торфяникам;
- влияние смога и дымовых газов на самочувствие людей, а также видимость в населенных пунктах, на автотрассах и объектах промышленности, расположенных в зоне достижимости потоков дымовых газов торфяных пожаров;

- негативные экологические последствия, связанные с гибелью уникальных экосистем, расположенных на торфяных болотах.

Долгосрочные негативные тенденции, вызываемые торфяными пожарами, связаны преимущественно с рассеянием в атмосфере газообразных и твердых (в виде мелкодисперсной фазы – золы, смога и т. д.) продуктов горения торфа. Такого рода загрязнения оказывают негативное влияние на дыхательную, кровеносную и сердечно-сосудистую систему человека, особенно для людей, уже страдающих хроническими заболеваниями указанных видов, лиц пожилого возраста и детей. Помимо этого, перечисленные загрязнения оказывают негативное влияние на экосистемы, в первую очередь, лесные массивы, нарушая обменные процессы в растениях, преимущественно молодой поросли. Дымовые газы и смог также являются фактором усиления процессов глобального потепления и развития парникового эффекта на поверхности Земли.

По данным государственного земельного учета по состоянию на начало 2002 г. земельный фонд Российской Федерации составляет 1 709,8 млн га, из них болотами занято 140 млн га, что составляет более 8 % территории РФ. Площадь заболоченных земель составляет около 230 млн га. Таким образом общая площадь болот и заболоченных земель с торфяным слоем в Российской Федерации равна почти 370 млн га, что составляет 21 % от общей площади территории РФ. Более 2/3 от площади болот и заболоченных земель приходится на территорию Сибири.

Значительная часть лесных массивов на территории Российской Федерации расположена в составе ландшафтных комплексов, включающих также болота. Перемежаемость лесов и болот различных типов в рамках единой территориальной ландшафтной системы является характерным явлением для более чем 50 % лесных массивов на территории РФ. Это характерно для европейского Севера РФ, но в особенности – для Сибири. Возникновение торфяных пожаров в труднодоступных районах зачастую приводит к их неконтролируемому распространению и переходу в лесные пожары.

Перечисленные выше факты и данные определяют важность мероприятий по борьбе с ландшафтными торфяными пожарами, причем наряду с деятельностью по оперативной локализации и устранению уже возникших пожаров необходима реализация комплексных долгосрочных мер по предотвращению возникновения торфяных пожаров.

Эта деятельность невозможна без продолжения всесторонних исследований процессов возгорания и горения торфяных залежей, что, в свою очередь, невозможно без развития методов компьютерного моделирования таких процессов.

Первые модели горения торфа [15, 18] носили полуэмпирический характер и были основаны на балансовых соотношениях для массы и тепловой энергии сгорающего торфа. Развитие как методов математической физики, так и вычислительной техники привели к разработке более точных моделей, основанных на методах механики сплошных реагирующих сред [11–12, 14, 19]. Однако системы дифференциальных уравнений, с помощью которых указанные модели записываются, допускают лишь численное решение ввиду своей сложности, нелинейности и большой размерности. Решение таких систем осуществляется с использованием таких подходов как метод контрольного объема, метод крупных частиц, метод разделения по процессам и т. п.

Торф относится к числу относительно молодых геологических образований, возникающих в результате отмирания болотной растительности в избыточно-влажной среде при недостатке кислорода [22]. С химической точки зрения торф являет собой многокомпонентную смесь, в отличие от бурого угля, наиболее близкого к торфу геологического образования и следующего за ним по степени «молодости» в геологическом масштабе времени, который в большей степени уже может быть отнесен к твердым растворам. Вместе с тем, элементный состав торфов и бурых углей можно считать близкими. В известном ряду «антрацит – каменный уголь – бурый уголь – торф» свойства торфов различных степеней разложения подтверждают общую тенденцию. Торф с высокой

степенью разложения имеет меньшую влажность и пористость, больший объемный вес и большую теплоемкость. Он более подвержен возгоранию. Из торфов могут быть выделены такие химические вещества, как битуминозные компоненты, углеводы (как остатки биомассы растительного происхождения), лигнин, а также гуминовые кислоты, которые образуются при разрушении углеводов. Степень разложения торфа зависит от свойств и характеристик продуцирующего биоценоза, прежде всего, структуры торфообразующих растений, влажности среды, динамики окружающей температуры. Как уже отмечалось, торфы с высокой степенью разложения, как правило, менее гигроскопичны и более пожароопасны.

Торфяная залежь обычно имеет высокую влажность на уровне 92–95 % массовых. Казалось бы, столь высокая влажность делает ее сравнительно пожаробезопасной. Однако пористость торфа часто приводит к так называемому фильтрационному режиму горения. Представим себе, что некоторый участок торфяной залежи оказался в текущих условиях достаточно сухим для возгорания. Недостаток кислорода зачастую также снижает порог воспламенения, так как режим газификации (полуокисления) требует меньше тепловыделения для перехода в самоподдерживающийся режим. Более того, влажность твердого топлива (торфа) до определенного предела может сыграть для развития процесса газификации положительную роль, поскольку нагретые частицы углерода при взаимодействии с водяным паром выделяют водород и угарный газ, которые, распространяясь по пористой матрице торфяного топлива, могут послужить инициаторами и катализаторами процессов газификации и горения новых участков торфяной залежи. Помимо перечисленного в пористой матрице торфяного топлива происходит рекуперация тепла, которое при иных режимах горения уносилось бы с газообразными продуктами в атмосферу. Таким образом, происходит сушка все новых участков торфяной залежи, что приводит к возникновению режима тления. Распространение тепловой волны происходит в толще торфяной залежи сложным образом, в процесс включаются слои торфа на различной глубине залегания от поверхности до уровня грунтовых вод или минерального слоя. При прохождении тепловой волны через более пористые и более сухие участки, насыщенные атмосферным кислородом в достаточной степени, процессы тления и газификации торфа переходят в режим интенсивного горения, тем более, если указанные участки расположены на поверхности. Сухие участки торфяной залежи возникают естественным образом и в природной среде. Так, при относительно мелком локальном залегании минерального слоя или при выходе на поверхность скальных пород отдельные участки торфяных залежей при недостатке атмосферной влаги и высокой температуре воздуха могут осушаться и прогреваться до той степени, при которой уже возможно самовоспламенение. Известно, что при превышении температуры атмосферного воздуха в течение 10 дней порога в 25 °С при условии отсутствия осадков за тот же период времени с высокой вероятностью начинается самопроизвольное очаговое возгорание торфа.

Однако при разработке торфяных месторождений с осушением залежи, неконтролируемом в плане пожарной безопасности складировании добытого торфа вероятность осушки торфа до пожароопасного уровня возрастает. Более того, на оставленных без присмотра торфяных разработках и осушенных под сельхозугодья болотах, на которых прекращен процесс искусственной мелиорации, благодаря в том числе эрозионным процессам, количество осушенного до предела воспламенения торфа возрастает. Дополнительную опасность в этой ситуации представляет то обстоятельство, что, как правило, такие разработки и немелиорируемые сельхозугодья находятся вблизи населенных пунктов, так что в случае торфяного пожара возникает непосредственная угроза для людей и имущества. Отметим, что сухой торф, например, фрезерный торф, добываемый на торфяных разработках, является топливом с достаточно высокой теплотой сгорания, достигающей 2 600 ккал/кг.

Кинетика произвольного возгорания торфа хорошо известна. Подсушенный торф разогревается, а затем загорается. Возможно саморазогревание торфа, происходящее под влиянием взаимосвязанных физических, биохимических и химических процессов. Оно аналогично нагреванию биомассы при гниении и процессах образования компоста. Саморазогревание ведет к выделению дополнительного тепла, так что процесс может принять автокаталитический характер. При достижении температуры в 60 °С и более торф в течение нескольких дней превращается в обугливающуюся пористую сухую массу, которая по своему качеству похожа на полукокс. После начала самовозгорания торфа процесс резко ускоряется при проникновении в него кислорода воздуха.

Современные экспериментальные исследования кинетики биохимического окисления, самовозгорания, тления, сушки, газификации и полукоксования торфа проводятся как на экспериментальных установках [23], так и в полевых условиях с применением таких дистанционных методов экспериментального исследования, как инфракрасная спектроскопия и термометрия [20]. В работе [23] приведены результаты исследования кинетики самовозгорания наиболее распространенных в Западной и Восточной Сибири видов торфа. В ходе проведения экспериментов было исследовано более 80 образцов различных видов торфа с территорий Иркутской, Новосибирской и Тюменской областей. При этом процесс самовозгорания сухого торфа рассматривался как одностадийная агрегированная химическая реакция, кинетические характеристики которой подчиняются теории Н. Н. Семенова [21]. Далее авторы исследования, получив оценки для энергии активации процесса самовозгорания и предэкспоненциального множителя адиабатической скорости самонагрева, определили с использованием теории теплопроводности критические линейные размеры подсушенного фрагмента торфа для торфов различных типов, так что при превышении данных критических размеров процесс самовозгорания становится весьма вероятным.

Обзор более актуальных математических моделей торфяных пожаров был проведен А. М. Гришиным в работе [14]. По мнению А. М. Гришина, основным недостатком многих современных моделей является неучет закона сохранения количества движения, многокомпонентности среды и многокомпонентной диффузии, отсутствие конкретных формул для скоростей химических реакций и уравнения состояния смеси газов, образующихся в слое торфяной залежи при ее воспламенении и горении.

Модели воспламенения и горения торфа, разработанные самим А. М. Гришиным и описанные, например, в [13], в этой же работе [14] были подвергнуты им критическому анализу. Разработанная с использованием методов механики сплошных реагирующих сред общая математическая модель торфяных пожаров учитывает законы сохранения массы, количества движения и энергии, а также уравнение состояния для смеси реагирующих газов, но не учитывает процессы переноса влаги внутри торфа вследствие фильтрации. В результате анализа существующих моделей торфяных пожаров, в работе [14] была представлена модель второго поколения в новой постановке исходной задачи. А именно, процесс возгорания слоя торфа был рассмотрен с учетом слоя воды под ним, а также процессов сушки, пиролиза, окисления и полуокисления газообразных и конденсированных продуктов. Установлено, что с уменьшением толщины слоя торфа над слоем воды при одинаковой глубине воды под ним и равных значениях плотности теплового потока от внешнего очага горения, время зажигания увеличивается. На основе этих результатов был предложен способ борьбы с торфяными пожарами, основанный на изоляции очагов тления закачкой воды под слой реагента малой толщины.

Проведенный обзор моделей показывает, что для их упрощения при практическом использовании возможно применение агрегированной химико-кинетической схемы, в которой процесс сушки торфа рассматривается как отдельная химическая реакция со своими показателями энергии активации и предэкспоненциального множителя. Для этой реакции, равно как и для других реакций в составе процесса, необходимо знание численных значений

указанных кинетических параметров. Установлено, что термокинетические постоянные процесса сушки всех видов торфа имеют близкие значения не только для торфов Западной и Восточной Сибири, но и для образцов торфа из Шотландии (район г. Эдинбург). В то же время подобные параметры для процессов пиролиза, полуокисления и полукоксования существенно зависят от конкретного типа торфа, в то время как для процесса пиролиза они значительно отличаются. Также необходимо знание термохимических данных, особенно для процессов сушки и пиролиза торфа.

Следующая группа моделей, применяемых для моделирования процессов возникновения и развития ландшафтных торфяных пожаров, относится к моделям, основанным на анализе данных. Эта группа моделей тесно связана с процессом мониторинга и сбора данных.

Математическим аппаратом такого моделирования являются методы и алгоритмы кластерного анализа, нейросетевые технологии, методы машинного обучения и искусственного интеллекта. Задача такого подхода состоит в том, чтобы на основе данных измерений различных величин и параметров самой торфяной залежи, покрывающей ее растительности и окружающего атмосферного воздуха предсказать возникновение и развитие торфяных пожаров [3–4, 6, 16].

Задачи мониторинга для борьбы с торфяными ландшафтными пожарами могут быть сформулированы в двух постановках. Первая группа задач – это собственно задачи обнаружения возгорания торфа на возможно более ранних стадиях. Вторая группа задач состоит в выявлении потенциально наиболее пожароопасных участков торфяных залежей, на которых в текущей метеорологической ситуации и при метеорологической истории текущего пожароопасного сезона вероятность возгорания торфа очень высока. После выявления таких участков они должны быть подвергнуты мониторингу в усиленном режиме. Такой подход тем более оправдан, что ввиду больших расстояний и площадей, занятых торфяными залежами в РФ, практически всегда стоит задача оптимального распределения и использования сил и средств с высоким приоритетом для наиболее пожароопасных районов и направлений [3, 16].

Для практической реализации второго подхода необходимо сформировать набор признаков для районов торфяных залежей с высокой вероятностью возгорания. Далее каждому признаку из полученного набора должны быть поставлены в соответствие методы его определения или измерения с указанием точности определения или измерения, характерной для данного метода. Следует отметить, что и самим признакам может быть приписан такой показатель, как «степень достоверности». Этот показатель определяет, насколько однозначно измерение данного признака позволяет судить об угрозе воспламенения торфа на данном участке земной поверхности (торфяной залежи). Показатель достоверности может определяться на основе обработки статистических данных по ранее удачно или неудачно предсказанным возгораниям торфа. Либо этот показатель для данного признака может оцениваться на основе экспертного рассмотрения. Отметим, что при наличии одновременной совокупности признаков оценка вероятности возгорания может быть повышена. Так, например, при сочетании уже обсуждавшегося выше метеорологического фактора (высокая температура воздуха в течение 10 или более дней при отсутствии атмосферных осадков) показатель (степень) достоверности таких признаков, как наличие на территории данной торфяной залежи значительных сухих участков, эрозионных явлений, выходов на поверхность скальных образований может считаться высокой, поскольку для перечисленных признаков ландшафтной организации торфяной залежи метеорологический фактор почти достоверно обеспечивает возникновение самовозгораний.

Также среди признаков следует отдавать предпочтение тем из них, которые допускают уверенное определение или измерение дистанционными методами. Помимо этого, ввиду наличия режимов тления и подземного горения торфа в толще пластов, задачи мониторинга в первой и второй постановке оказываются между собой тесно связанными.

Действительно, такие признаки подземного горения, как эмиссия угарного газа или повышение концентрации летучих фракций в атмосфере над торфяной залежью свидетельствуют не только о распространении подземного торфяного пожара (возможно, в режиме тления), но и указывают на высокую вероятность выхода этого пожара на поверхность, тем более при наличии сопутствующего метеорологического фактора. Эти обстоятельства указывают также на необходимость развития методов мониторинга во все сезоны года, включая осень и зиму.

Рассмотрим кратко некоторые группы признаков и методы их определения или измерения. Уже упоминавшаяся эмиссия газообразных продуктов тления или подземного горения торфа относится к числу признаков, которые допускают определение с помощью газоанализаторов авиационного базирования. При этом следует учитывать, что концентрации далеко не всех газов, потенциально являющихся продуктами окисления торфа, могут быть отнесены к предикторам (признакам) его возгорания с высоким показателем (степенью) достоверности. Дело в том, что такие газы, как метан, диоксид углерода, легкие летучие органические соединения являются продуктами не только окисления или пиролиза торфа, но и продуктами биохимических процессов в экосистемах болота, а также продуктами процессов геологического старения торфа, увеличения степени его разложения. В этом смысле торф подобен молодым (бурым) углям, геологическое старение которых также сопровождается выходом в атмосферу метана и легких фракций. С другой стороны, монооксид углерода и смог, при их повышенной концентрации в атмосфере над залежью, являются достоверными признаками подземного возгорания торфа, равно как и открытого торфяного пожара на данной торфяной залежи.

Теоретически указанные признаки могут быть дистанционно измерены спектральными методами, например, с помощью активной лидарной технологии. Однако более достоверным является дистанционное определение локальных изменений растительного покрова, вызванных эмиссией продуктов подземного окисления торфа и сопровождающими такое окисление тепловыми потоками. Дистанционное определение (измерение) изменений растительного покрова может быть осуществлено по фотоснимкам в инфракрасном диапазоне спектра [10], либо по коротковолновому излучению растительного покрова [8–9]. Чрезвычайно перспективным представляется использование гиперспектральных методов [2, 5], однако при обработке и интерпретации гиперспектральных данных имеются проблемы, разрешенные на сегодняшний день не полностью [24].

В заключение отметим, что в условиях ограниченности ресурсов весьма перспективным и целесообразным представляется использование для борьбы с ландшафтными торфяными пожарами в качестве авиационных носителей средств и устройств дистанционного мониторинга наряду с обычными самолетами беспилотных дистанционно управляемых летальных аппаратов [1] или специализированных дирижаблей [17].

Литература

1. Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Анаев М. А., Соловьев В. В., Шагин С. И. Многоцелевой авиационный комплекс мониторинга, предупреждения и защиты от стихийных бедствий на базе беспилотного летательного аппарата «НАРТ» // Изв. ЮФУ. Технические науки. Разд. IV. Беспилотные летальные аппараты. 2015. С. 229–238.
2. Родионов И. Д., Родионов А. И., Ведешин Л. А., Виноградов А. Н., Егоров В. В., Калинин А. П. Авиационные гиперспектральные комплексы для решения задач дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2013. № 6. С. 81.
3. Арутюнян С. А., Доррер Г. А., Якимов С. П. Оценка пожарной зрелости леса на основе методов распознавания образов // Современные методы профилактики, обнаружения

и тушения лесных пожаров : тез. докл. всесоюз. науч.-технич. совещания. Апрель, 1985. Петрозаводск ; М., 1985. С. 22–23.

4. Берестенькова М. В., Акинфеев Р. С., Коморовский В. С. Применение нейронных сетей с учителем для прогнозирования прироста площади лесного пожара на основе данных ИСДМ-Рослесхоз // Проблемы информатизации региона : материалы 11-й Всерос. науч.-практ. конф. ПИР-2009. Красноярск, 2009. С. 165–167.

5. Борзов С. М., Потатуркин О. И. Классификация типов растительного покрова по гиперспектральным данным дистанционного зондирования земли // Электрон. архив НГУ. 2014. URL: <http://www.nsu.ru/xmlui/handle/nsu/7712> (дата обращения: 26.03.2018).

Борисов А. Н., Кашкин В. Б., Хлебопрос Р. Г. Фурье-методы обработки изображений лесных территорий : препринт ИЛИД СО АН СССР. Красноярск : ИЛИД СО АН СССР, 1984, 50 с.

6. Борисов А. А., Киселёв Я. С., Удилов В. П. Кинетические характеристики низкотемпературного горения торфа // Теплофизика лесных пожаров. Новосибирск : Изд-во Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1984. С. 23–30.

7. Бородин Л. Ф., Валендик Э. Н., Миронов А. С. СВЧ радиометрические методы и проблемы лесных и торфяных пожаров // Радиотехника и электроника. 1978. № 10. С. 2120–2131.

8. Валендик Э. Н., Богомолов А. А. Дистанционная оценка влагосодержания растительного напочвенного покрова по его СВЧ-излучению // Прогнозирование лесных пожаров : тр. ИЛИД СО АН СССР. Красноярск : ИЛИД СО АН СССР, 1978. С. 26–40.

9. Валендик Э. Н., Доррер Г. А., Калинина Н. А. и др. Идентификация скоростей распространения лесных пожаров по их инфракрасным снимкам // Исследование Земли из космоса. 1982. № 5. С. 46–53.

10. Винокуров В. Н., Удилов Т. В., Александрой В. И. О математическом моделировании процессов возгорания торфа и динамики торфяного пожара // Соврем. проблемы науки и образования. 2015. № 1 (ч. 1). URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=17734> (дата обращения: 27.03.2018).

Голованов А. Н., Якимов А. А., Абрамовских А. А., Суков Я. Р. О математическом моделировании процессов зажигания и тления торфа // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15. № 4.

11. Гришин А. М. Математические модели лесных пожаров. Томск : Изд-во Томск. ун-та, 1981. 277 с.

12. Гришин А. М. Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и их приложения // Успехи механики. 2002. Т. 1. № 4. С. 41–89.

13. Гундар С. В. Об энергетическом балансе беспламенного горения органической части почвы при лесных пожарах // Вопр. лесной пирологии. Красноярск, 1974. С. 74–82.

14. Доррер Г. А., Якимов С. П. Оценка пожарного состояния леса на основе методов распознавания образов // Соврем. методы профилактики, обнаружения и тушения лесных пожаров : тез. докл. всесоюз. науч.-техн. совещания. Апрель, 1985. Петрозаводск ; М., 1985. С. 27–28.

15. Кондратюк В. А., Воскобойников И. В., Крылов В. М., Кирилин А. Н., Кондратюк Д. В. Универсальный комплекс УМК-д на базе многоцелевого дирижабля а-300МУ для мониторинга наземной, воздушной и водной среды, предупреждения, оперативного обнаружения и тушения лесных пожаров // Лесн. вестн. 2012. Вып. 8. С. 16–18.

16. Конев Э. В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск : Наука, 1977. 239 с.

17. Лобода Е. Л., Якимов А. С. Моделирование процесса зажигания торфа // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2012. № 1 (17). URL: <http://journals.tsu.ru/mathematics/> (дата обращения: 27.03.2018).

18. Лобода Е. Л. Экспериментальное исследование глубины фронта горения торфа ИК-метода // Фундамент. и приклад. вопр. механики и процессов управления : сб. докл.

Всерос. науч. конф., посвящ. 75-летию со дня рождения акад. В. П. Мясникова. 11–17 сентября 2011 г., Владивосток. Владивосток : ИАПУ ДВО РАН, 2011. С. 358–361.

19. Семенов Н. Н. Тепловая теория горения и взрывов. // Успехи физич. наук. 1940. Т. 24. Вып. 4. С. 433–486.

20. Справочник по торфу / под ред. А. В. Лазарева, С. С. Корчунова. М. : Недра, 1982. 440 с.

21. Удилов В. П. Кинетические характеристики процессов самовозгорания торфов Сибири и их использование при прогнозе и профилактике пожаров : дис. ... канд. техн. наук. М., 1986. 211 с.

22. Чабан Л. Н., Вечерук Г. В., Гаврилова Т. С. Исследование возможностей классификации растительного покрова по гиперспектральным изображениям в пакетах тематической обработки данных дистанционного зондирования // Тр. МФТИ, 2009, Т. 1. № 3. С. 171.