

ЭКОНОМИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОЖАРООПАСНЫХ ЗОН В ЛЕСАХ СИБИРИ

*д-р физ.-мат. наук, проф. В.Ф. Крапивин¹, д-р физ.-мат. наук, проф. Ф.А. Мкртчян¹,
канд. техн. наук И.И. Потопов²*

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Москва (vkrapivin_36@mail.ru)

²Всероссийский институт научной и технической информации,
Москва (ipotapov37@mail.ru)

Целью данной работы является разработка нового метода для более раннего обнаружения пожароопасных зон в лесных районах с использованием инструментов информационного моделирования и микроволнового дистанционного зондирования. Поисковая система пожароопасных зон и ее функциональная структура разрабатываются для принятия решений при оперативной диагностике крупных лесных массивов в Сибири. В данной статье обсуждается текущее состояние лесных пожаров в Сибири и потенциальные направления будущих исследований по совершенствованию предлагаемой здесь системы принятия решений. Эти теоретические и экспериментальные исследования позволяют разработать новый подход к мониторингу сибирских лесов в течение сезонов, когда имеют место потенциальные факторы возникновения пожаров. Разработанный здесь алгоритм принятия решений используется для оценки весов эффективных факторов возникновения лесных пожаров в Сибири. Функции летающей лаборатории Ил-18 Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН используются для оценки параметров системы поиска пожароопасных зон в Сибири. Представлены результаты измерений микроволнового дистанционного зондирования над лесной зоной при пожаре.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, модель, лес, Сибирь, подстилка, пожар, вероятность, принятие решения

ECONOMICALLY EFFECTIVE TECHNOLOGY FOR THE DETECTION AND LOCALIZATION OF FOREST FIRE DANGEROUS ZONES IN SIBERIA

V.F. Kravivin, F.A. Mkrtchyan, I.I. Potapov

Goal of this paper is to develop a new method for the earlier detection of fire-prone zones in forested areas using information-modeling and microwave remote sensing tools. Searching system of fire-prone zones and its functional structure are developed to be as decision making under the operative diagnostics of large forested areas in Siberia. This paper discusses the current state of forest fires in Siberia and the potential direction for future studies on the improvement of proposed here decision making system. This theoretical and experimental research allows us to develop

new approach to the monitoring of the Siberian forests during seasons when fire occurrence potential factors take place. Decision making algorithm developed here is used for estimating the weights of the effective factors in forest fire occurrence in Siberia. Functions of flying laboratory IL-18 of Kotelnikov's Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences are used for the evaluation of the parameters of searching system of fire-prone zones in Siberia. Results of microwave remote sensing measurements above the forested area with fire running are represented.

Key words: remote sensing, model, forest, Siberia, litter, fire, probability, decision making

Введение

Лесной пожар представляет огромную опасность для растительного мира и изменения климата. Для решения возникающих здесь задач разрабатываются методы, алгоритмы и информационно-моделирующие технологии, которые нацелены на решение задач обнаружения, локализации, структуризации и пространственной сегментации спутниковых изображений. Проблемы лесных пожаров в их различных аспектах рассматриваются многими авторами [1-52]. Лесные пожары приводят к человеческим жертвам и значительным ущербам для жилья, после чего требуются значительные финансовые вложения для преодоления последствий. Принципиальное значение существующих исследований лесных пожарных рисков заключается в решении трех основных проблем:

- раннее обнаружение пожароопасных зон, расположенных на лесной территории;
- своевременное обнаружение зоны лесного пожара для эффективного тушения пожаров, и
- текущая диагностика бегущего лесного пожара с целью определения его границ и направления движения.

К сожалению, существующие системы мониторинга обычно наблюдают за лесным пожаром, когда он уже распространился по лесной территории, разрушая экосистему и внося изменения в окружающую среду, такие как добавление CO_2 в атмосферу. Как Jafarzadeh и др. [18] отмечают, что роль лесных экосистем в поддержании экологического баланса является наиболее значимым фактором глобального устойчивого развития. Сжигание леса, как следует из многолетних наблюдений, порождает множество как научных, так и технологических проблем, решение которых не имеет универсальных методов. Поэтому существуют многочисленные решения существующих здесь проблем, как правило, на региональном уровне [1, 6, 10, 14]. Экологические и социально-экономические факторы включают количество осадков, тип леса, топографию, плотность населения, расстояние между лесной и городской территориями, уровень социально-экономического развития и другие факторы. В конечном итоге создаются различные модели, алгоритмы и системы принятия решений в качестве инструментов мониторинга лесных пожаров. Основная цель этих исследований - превентивная оценка вероятности начала лесного пожара [21, 34, 51].

В разных странах и регионах существуют многочисленные индексы лесных пожаров, которые можно охарактеризовать как диапазон лесных пожаров.

Например, очень известный индекс опасности лесных пожаров McArthur используется в США, Канаде и Австралии, где его числовые шкалы отличаются и адаптированы к национальным экологическим и социально-экономическим параметрам региона [10, 13, 51]. White и др. [51] предложили модель для прогнозирования возникновения пожара в зависимости от максимальной температуры и относительной влажности воздуха в 9 часов утра и количества дней с осадками, превышающими или равными 2 мм/сутки. Было показано, что предложенный индекс пожарной опасности обеспечивает надежный прогноз возникновения пожара на плантациях эвкалипта. Эта модель превосходит многие аналогичные модели по ежедневной вероятности возникновения пожара. Практически все существующие индексы опасности лесных пожаров основаны на данных, предоставляемых национальными или глобальными системами мониторинга, возможности которых определяются с помощью средств обработки больших данных [49].

Очевидно, что знание взаимосвязей между вероятностью лесных пожаров и факторами окружающей среды может помочь в выявлении районов с наибольшим риском возникновения лесных пожаров. Все факторы возникновения лесных пожаров делятся на два класса:

- медленно меняющиеся переменные, такие как плотность населения, расстояние до зон промышленной и человеческой деятельности, типы деревьев и почв, стратегия землепользования, топография; а также
- быстро меняющиеся переменные, такие как температура воздуха, осадки, давление, характеристики ветра, относительная влажность.

Комплексный анализ подхода к поиску пожароопасных зон продиктован разнообразием всех факторов, влияющих на начало и распространение лесных пожаров. Настоящее исследование было проведено с целью разработки максимально интегрированной универсальной технологии обнаружения и диагностики зоны лесных пожаров на основе сопряженных с использованием технологии дистанционного зондирования и инструментов моделирования. В данной работе предлагается структура системы мониторинга с функцией оценки опасности лесных пожаров с учетом весовых коэффициентов всех факторов и оценок содержания влаги в почве в качестве основного показателя пожарной опасности с использованием микроволнового дистанционного зондирования. Предложена информационно-инструментальная технология для предупреждения, обнаружения и диагностики лесных пожаров в Сибири, где существует проблема более ранней локализации зон с высоким уровнем лесной пожарной опасности. Очень труднодоступные районы (около 30%) являются характерной особенностью Сибири, где контроль пожароопасных зон возможен только с помощью инструментов дистанционного зондирования [29].

Массовые лесные пожары в Сибири произошли в 2019 году в Иркутской области, Красноярском крае, Бурятии, Якутии, Алтайском крае и на Дальнем Востоке. С начала года сгорело 13,1 миллиона гектаров сибирских лесов. Только в Иркутской области было зарегистрировано более 350 пожаров, что в 14 раз больше, чем в 2018 году. В конце июля 2019 года скорость распространения пожаров возросла на 100 тыс. га в сутки. Масштабы лесных пожаров в Сибири в 2019 г. доступны из спутниковых данных.

Многие авторы разработали разные версии моделей для изучения динамики вероятности возникновения лесных пожаров (ВВАП) с учетом природных и техногенных характеристик окружающей среды [13]. Существуют положительные случаи, когда индексы ВВАП помогают сделать более эффективный прогноз событий возникновения пожара [2, 11].

Информационно-моделирующая система поиска пожароопасных зон

Поиск и обнаружение пожароопасных участков на территории леса имеет несколько этапов: от локализации горючих материалов и участков с аномальной температурой до диагностики возникшего пожара, когда решаются задачи оконтуривания пожара и определения направления его движения. Данные о лесных пожарах, полученные в течение многих лет эксплуатации летающей лаборатории Ил-18 Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, используются для оценки параметров экспертной системы поиска и локализации пожароопасных зон (ЭСПАПЗ) и оценки ее эффективности. Универсальная система мониторинга Ил-18 представлена на рисунке 1. Ее пространственное разрешение зависит от высоты полета H и длин волн микроволновых датчиков. Табл. 1 содержит характеристики пассивных микроволновых датчиков, показывающих диапазоны их пространственного разрешения. Традиционная высота эксплуатации Ил-18 находилась в диапазоне от 250 до 600 метров. Бортовая система Ил-18 регистрировала параметры окружающей среды практически в режиме реального времени (задержка равна 0,01 с), что позволяло оперативно принимать решение об уровне пожароопасности в заданном пространственном пикселе и предоставлять информацию для соответствующих служб лесоохраны. Структура ЭСПАПЗ, представленная на рис. 2, имеет функциональную часть - систему предсказания пожарной опасности (СПЮ) на лесных территориях, элементы которой описаны в табл. 2.

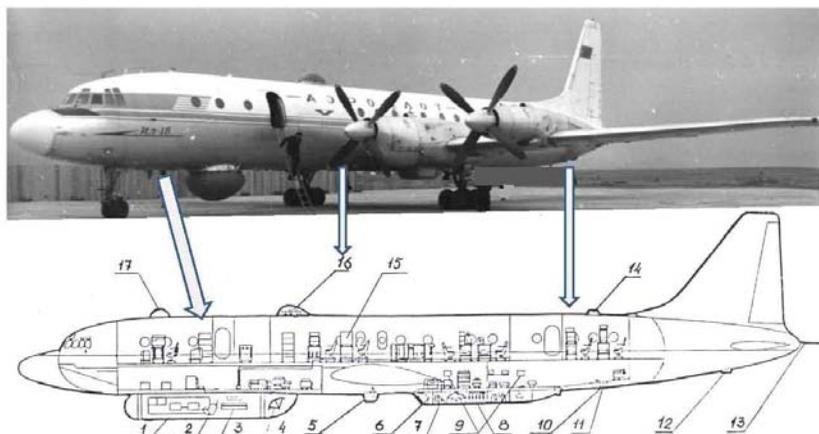


Рис. 1. Схема расположения антенных систем и фотолюков на самолете-лаборатории Ил-18. Антенны: 1,3 – радиолокаторов с синтезированной апертурой диапазона 2 м и 10 см; 2,6 – трассовых поляриметров диапазона 0.8 и 2.25 см; 4 – шестиканального сканирующего поляриметра диапазонов 0.8; 1.35 и 2.25 см; 8 – трассовых радиометров диапазонов 0.8; 1.35; 2.25; 10; 20 и 27 см; 7,9 – прецизионного высотомера и интерферометра бокового обзора на волне 2.2 см; 13 – станции подповерхностного зондирования декаметрового диапазона. Фотолюки: 5,10,12 – широкоформатного и кадрового телевидения, аэрофотоаппарата; 11, 14 – аппаратуры миллиметрового диапазона; 16 – трассовых радиометров диапазона 0.8; 1.35 и 2.25 см; 15 – гравиметрическая и инерциальная аппаратура; 17 – астролюк.

Таблица 1

**Измерительные характеристики платформ дистанционного зондирования
(H - высота над землей, м) [43].**

Частота, ГГц	Длина волны, см	Группа	Разрешение / сканирования	Разрешение, м	Режим
37.5	0.8	Ка	32	$0.04 \times H$	Сканирование
13.3	2.25	X	16	$0.08 \times H$	Сканирование
5.5	5.5	C	6	$0.13 \times H$	Сканирование
1.43	21	L	2	$0.65 \times H$	Твин-лучевой

Таблица 2

Функциональные характеристики системы предсказания пожарной опасности (СППО), являющейся фрагментом ЭСПЛПЗ, представленной на рис. 2.

Блок	Основные функции блока
ВВП	Вычисление вероятности возникновения пожара на территории леса.
РОЗМР	Решение обратной задачи микроволновой радиометрии для оценки влажности полога и подстилки леса на основе измерений на длинах волн 0.8, 2.25 и 21 см., а также с использованием спутниковых данных NDVI и LAI.
ОПУ	Оценка предпожарных условий. Определение весовых характеристик параметров окружающей среды по их возможному вкладу в вероятность возникновения лесного пожара.
АМИФ	Анализ медленно изменяющихся факторов окружающей среды, от которых зависит уровень пожарной опасности
РПОЭВ	Расчет показателей ослабления электромагнитных волн используемого диапазона в лесном пологе. Вычисление температуры лесной подстилки на основе измеренных яркостных температур.
ПППР	Последовательная процедура принятия решений
ОХЛ	Оценка характеристик леса по данным спутникового мониторинга.
МВБЛ	Модель водного баланса леса. Расчет элементов уравнения водного баланса с использованием данных дистанционного зондирования.
КВП	Картирование вероятности пожара с учетом принятой дискретизации территории леса на пиксели.

Микроволновая радиометрия L-диапазона (15,8 - 63 см) является потенциально высокоэффективным методом для оценки фитомассы леса, влажности подстилки и картирования запасов воды как в региональном, так и в глобальном масштабе. Лес является полупрозрачной средой для длин волн L-диапазона благодаря своей эколого-морфологической структуре, имеющей мозаичный горизонтальный рисунок и выраженную вертикальную стратификацию. Однако существует серьезная проблема низкого пространственного разрешения, когда используются радиометры L-диапазона. В этом случае пространственное разрешение наблюдений с помощью дистанционного зондирования может составлять около километра, когда используется авиационная платформа, и много километров для спутников. Платформа Ил-18 обеспечивала пространственное разрешение в диапазоне от 130 м до 650 м. Среди существующих спутниковых инструментов для обнаружения лесных пожаров используются усовершенствованный радиометр высокого разрешения (AVHRR) и спектрорадиометр изображений MODIS.

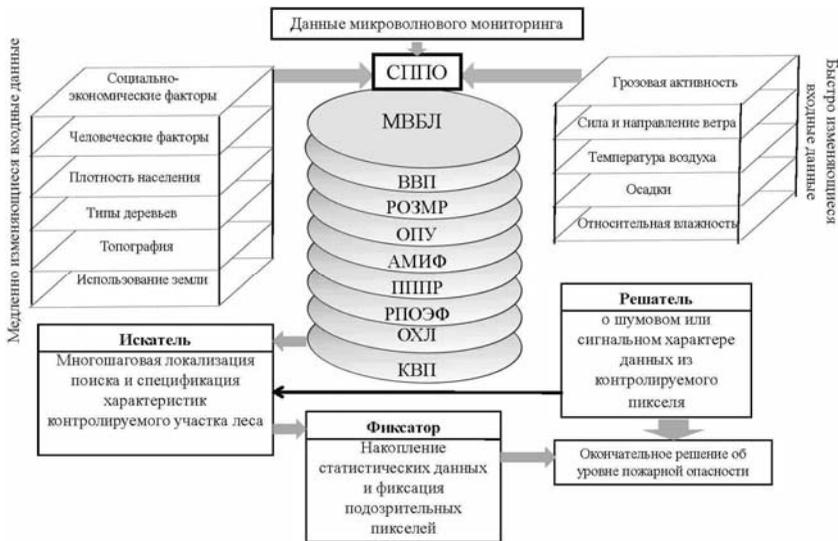


Рис. 2. Структурная схема экспертной системы поиска и локализации пожароопасных зон (ЭСПАЛЗ) как системы мониторинга для поиска и обнаружения подверженных лесным пожарам территорий. Элементы системы предсказания пожарной опасности (СППО) описаны в таблице 2.

К сожалению, существующие и используемые спутниковые инструменты зависят от погодных условий и не всегда могут обнаружить локальную зону с высокой пожарной опасностью. Поэтому совместное использование моделей, летающих платформ с микроволновыми радиометрами и спутниковых наблюдений позволяет преодолеть многие из этих трудностей.

Дополнительные данные для моделей лесной растительности были предоставлены авиационной платформой Miramar во время измерений в 2007/2008 годах в Болгарии и беспилотным летательным аппаратом MACS «Microwave Autonomous Copter System» в Алабаме (США) в 2005 году, что дало возможность развития информационно-моделирующих инструментов для обработки больших данных. Платформа Miramar была оснащена радиометрами X, C и L диапазонов. MACS был оснащен 6-сантиметровым радиометром, системой сбора данных, GPS-приемником и аккумуляторной батареей [17, 25, 43]. Многолетние наблюдения с помощью указанных средств дистанционного зондирования и фрагментарные измерения на земле помогли разработать систему принятия решений с функциями:

- оперативный контроль регионального круговорота воды, включая оценку суммарного испарения лесной растительности на основе современных метеорологических и геофизических данных;
- расчет пространственного распределения региональных параметров водного баланса леса, в том числе объемного содержания воды в пологе леса и подстилке;

- выявление пожароопасных зон на основе рассчитанного индекса влажности полого леса и его подстилки;
- диагностика лесного пожара с выделением очага возгорания, створенной зоны и направления движения пожара.

Процедура поиска зон возможного загорания леса предусматривает разделение территории леса на пространственные пиксели $\Xi = \{\Xi_{ij}: \varphi_{i-1} < \varphi < \varphi_{i+1}, \lambda_{j-1} < \lambda < \lambda_{j+1}\}$, где φ и λ - широта и долгота, соответственно. Предполагается, что $\varphi_{i+1} - \varphi_i = \Delta\varphi$, $\lambda_{j+1} - \lambda_j = \Delta\lambda$ и $\Delta\varphi \times \Delta\lambda = \sigma$, где σ соответствует пространственному разрешению используемых средств дистанционного зондирования [25].

На рис. 2 представлена функциональная структура ЭСПАПЗ. Летящая платформа, такая как Ил-18 или MACS, оснащенная измерительными приборами, доставляет оперативные данные в ЭСПАПЗ по трассе ее перемещения с пространственным разрешением, которое определяется в соответствии с используемыми радиометрами (см. Табл. 1). Как хорошо известно, в микроволновой радиометрии размер отпечатка (диаметр пикселя) определяется в зависимости от длины волны [25]. Для типичного диапазона длин волн микроволновой радиометрии от 0,8 см до 21 см диаметр пикселя варьируется от 50-70 м при длине волны $\chi = 2,25$ см до 500-700 м при $\chi = 21$ см для типичной высоты платформы дистанционного зондирования, $H = 0,6-3$ км.

Искатель локализует пространственные пиксели с высокой пожароопасностью, которые запоминаются *фиксатором*. *Решатель* выполняет статистический анализ, чтобы определить, являются ли фиксированные подозрительные пиксели шумовыми или сигнальными по своему характеру. В результате блок ПППР формирует множество «подозрительных» пикселей с критическими уровнями влажности полого леса и его подстилки. Эти результаты помогают оптимизировать режим мониторинга и повысить вероятность обнаружения момента возникновения пожара. Кроме того, использование летающей платформы дистанционного зондирования может быть реализовано после предварительного моделирования пространственного распределения вероятности возникновения лесного пожара (ВВАП), что является одной из функций блока ВВП. При этом входные параметры в ЭСПАПЗ доставляются из доступных источников, таких как метеорологические службы, спутниковые наблюдения, природные и антропогенные базы данных. Безусловно, региональная служба охраны леса обычно располагает информацией о зонах потенциального пожара, где возникновение пожара имеет высокую вероятность.

Таким образом, двухэтапная процедура мониторинга территории леса для обнаружения зон с высокой вероятностью возникновения пожара реализуется с использованием возможных теоретических показателей и моделей риска пожара, после чего средства дистанционного зондирования применяются для более точной локализации источников пожара. Модель риска возникновения лесных пожаров используется для оценки состояния лесных горючих материалов, включая мхи, лишайники, упавшие листья, хвойные иглки, пологи, сухую растительность, торф, гниющую древесину и другие компоненты, которые являются элементами лесной подстилки. Безусловно, влажность лесной подстилки является важным параметром возникновения лесных пожаров. Измерения этого параметра на земле возможны только при мониторинге локальных небольших лесных пикселей. Действительно, влажность лесной подстилки оценивается с помощью, как экологических моделей, так и инструментов дистанционного зондирования [25, 40].

Вероятность возникновения лесного пожара

Происхождение лесных пожаров в основном определяется круговоротом воды в контролируемой лесной зоне. Количество и наличие воды в лесной экосистеме является ключевым фактором возникновения пожара. Используя предложенная в [27] модель регионального круговорота воды (МРКВ), можно оценить все компоненты круговорота воды в лесу. Но эта модель нуждается в оценках многих параметров окружающей среды, которые оцениваются с высокой неопределенностью или не имеют числовых значений. Такая ситуация существует, когда обширные лесные массивы Сибири или Дальнего Востока России считаются малодоступными для измерения их характеристик наземными средствами. В таких случаях используются упрощенные модели водного баланса леса с минимальным набором параметров. Упрощенные модели снижают уровень неопределенности. Например, Chuviesco и др. [8] предложили эмпирический метод для определения содержания влаги в горючих материалах леса, основанный на спутниковых измерениях таких характеристик как значения нормированного разностного вегетационного индекса (NDVI) и индекса площади листьев (LAI). Факторы и индексы засухи вводятся также для оценки содержания воды в деревьях и подстилке в зависимости от метеорологических и экологических условий. Chen и др. [5] предложили индекс температурной сухости растительности (TVDI - Temperature Vegetation Dryness Index) с использованием данных LANDSAT-5 TM. Sharples и др. [42] изучили индекс опасности лесных пожаров FFDI (Forest Fire Danger Index) и показали его эффективность для классификации опасности лесных пожаров в Австралии.

Принципиальное отличие Сибирских и Российских дальневосточных лесов от других лесов - их обширная площадь (около 8,6 млн. км²), как правило, без учета населенных пунктов. Климат в Сибирской тайге субарктический с экстремальными температурами от 40 °С до -62 °С, долгой холодной зимой и коротким летом. Умеренные тропические леса российского Дальнего Востока (более 3 млн. км²) остаются не изученными в отношении их основных типов и структуры экосистемы (Krestov, 2003). Поэтому мониторинг этих лесов имеет ограниченные возможности для наземных наблюдений и использования платформ дистанционного зондирования для непрерывных измерений. Тем не менее, динамическая модель водного баланса леса, предложенная Speich и др. [45], может рассматриваться как эффективный метод преодоления этих ограничений. Эта модель основана на 19 параметрах, описывающих многие характеристики растительности и свойства почвы, использование которых требует ограниченное количество контактных измерений.

Совместное использование инструментов моделирования и техники дистанционного зондирования является оптимальным и экономически приемлемым подходом к обнаружению пожароопасных зон в обширных лесных районах. Роль человеческих факторов, таких как расстояние лесной экосистемы от дорог, населенных пунктов и зон сельскохозяйственной деятельности, может сыграть определенную роль в оценке вероятности возникновения лесных пожаров только в ограниченных районах Сибирских лесов. Антропогенные факторы играют значительную роль в зонах, где плотность населения превышает 3,5 человека/км². Причины пожаров в тайге в основном связаны с природными процессами, такими как грозовая активность и сухость лесной подстилки [5, 40, 45]. Другими словами, влажность подстилающей поверхности почвы является более важным фактором для возникновения лесных пожаров. На рис. 3 представлена схема модели водного баланса леса, которая рассчитывает потоки дождевой воды и оценивает уровень сухости полога и подстилки леса.



Рис. 3. Принципиальная схема модели водного баланса леса.

Вероятность возникновения лесного пожара (ВВП) отражает региональные условия, при которых риск и опасность пожара могут достигать некоторого уровня от незначительного и маловероятного до очень серьезного и весьма вероятного в зависимости от топографии, погоды, типа леса и человеческих факторов [52]. Эти факторы формируют условия, предшествующие пожару, основными из которых являются содержание воды в подстилке леса (W_{s-l}), содержание воды в пологе леса (W_c), температура атмосферы, полога и подстилки (T_A , T_c , T_{s-l}) и индекс грозовой активности (μ). ВВП может обеспечить условия для оценок влажности лесной подстилающей поверхности в каждом пространственном пикселе площади леса, которые контролируются с помощью комбинированных средств моделирования и платформ дистанционного зондирования. Погодные условия (температура, ветер и грозовая активность) предоставляются региональными метеорологическими центрами или непосредственно измеряются бортовыми устройствами летающей платформы или оцениваются с использованием спутниковых данных. Грозовая активность, специфичная для Сибири, зависит от географических факторов и синоптических условий [16, 24]. Muliyilov и др. [35] предложили следующую формулу для грозовой активности (поверхностных разрядов) как функции широты φ :

$$\mu = \frac{\delta N_d}{5.16 + 2.16 \cos \varphi}; 52^\circ \text{N} \leq \varphi \leq 68^\circ \text{N}; \quad (1)$$

где δ - коэффициент пропорциональности ($0.049 \leq \delta \leq 0.175$), N_d - количество дней с грозой по месяцам. На рис. 4 обобщены имеющиеся данные о грозовой активности в регионах Сибири. Удельная плотность гроз в разных регионах Сибири изменяется от $1/\text{км}^2/\text{год}$ до $8,5/\text{км}^2/\text{год}$ [16, 24, 47].

Понимание роли всех причинных факторов лесных пожаров имеет много неопределенностей. Известно, что около 60% лесных пожаров в Сибири вызваны поверхностными грозами. Определить роль антропогенных факторов в этом процессе трудно по причине вырубки леса вне закона, о чем пишет российская пресса. Поэтому ВВЛП оценивается только с учетом динамики влажности полога и лесной подстилки, температуры воздуха и грозовой активности. Разница температур воздуха в системе атмосфера-лес-почва обычно ниже 3°C [19]: $T_c \approx T_{s-l} \approx T_A - 33$. Вслед за White et al. [51] предлагается следующая формула для расчета ВВЛП:

$$\begin{aligned} \text{ВВЛП} = & [1 + a_1 \sqrt{W_{s-l} + W_c} \exp\{a_2 (M_{s-l} + M_c)\}] + \\ & + \sqrt{1 + T_{s-l}} \exp\{a_3 T_{s-l}\} + \sqrt{1 + T_c} \exp\{a_4 T_c\} + \\ & + a_5 \exp\{a_6 \mu\} + a_7 \exp\{a_8 V\}]^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

где a_i ($i=1, \dots, 8$) - коэффициенты, отражающие средний вклад в значение ВВЛП основных параметров: влажность почвы и полога леса (52,3%), температура подстилки (24,7%) и полога (16,5%), грозовая активность (3,9 %) и скорость ветра (2,6%). Анализ статистики лесных пожаров в Сибири за 1985-2019 гг. показывает, что эти веса факторов пожара изменяются во времени в зависимости от региона [3]. Эти вклады соответствуют следующим значениям весовых коэффициентов в формуле (2) : $a_1=0.0171$; $a_2=0.0141$; $a_3=-0.123$; $a_4=-0.132$; $a_5=0.0182$; $a_6=-1.713$; $a_7=0.0234$; $a_8=-0.0312$.

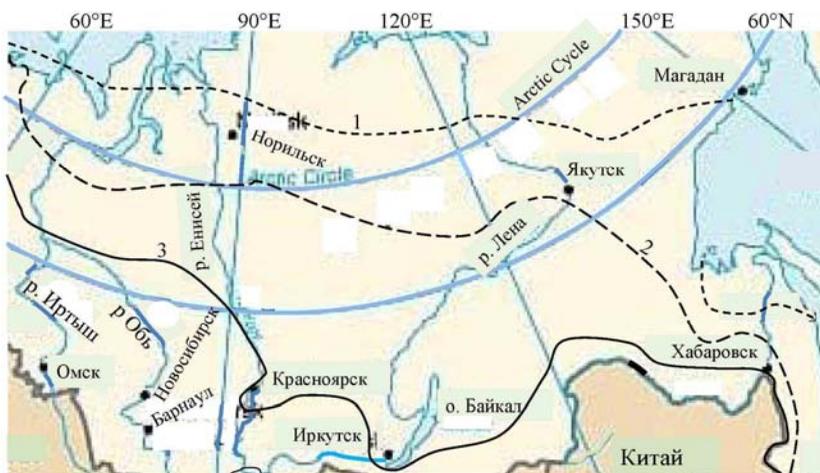


Рис. 4. Карта среднегодовой продолжительности гроз. К северу от кривых 1, 2 и 3 продолжительность гроз равна 10, 20 и 40 часам, соответственно. Продолжительность гроз южнее кривой 3 может достигать 60 часов.

Закономерность влияния человеческого фактора на пространственные и временные показатели возникновения лесных пожаров в Сибири не соответствует таким же закономерностям в Европе и Америке из-за высокого уровня криминального компонента [39, 41]. Поэтому этот фактор здесь не учитывается.

Влажность лесной подстилки оценивается блоками ОХЛ и МВБЛ на основе следующего балансового уравнения:

$$W_{s-l}(\phi, \lambda, t + \Delta t) = W_{s-l}(\phi, \lambda, t) + \{P_F(\phi, \lambda, t) - E_L(\phi, \lambda, t) - T_V(\phi, \lambda, t) - D_S(\phi, \lambda, t) - S_R(\phi, \lambda, t)\} \Delta t \quad (3)$$

где компоненты уравнения представлены на рис. 3. Информацию об осадках предоставляет как бортовая система наблюдений, так и местные метеорологические службы. Зависимости испарения и транспирации от индекса площади листа (LAI) приведены [46]. Гидрологические процессы, такие как испарение и поверхностный сток, описаны в соответствии с [36].

Наконец, ЭСПАПЗ обнаруживает пиксели, где может начаться лесной пожар, и мониторинг этих пикселей передается на платформы дистанционного зондирования для определения и локализации лесных пожаров. Платформа дистанционного зондирования обнаруживает пиксели с идущими пожарами, а блок ВВП оценивает опасность пожара. В табл. 3 дана классификация пожарного риска и пожарной опасности. Как было показано многолетним дистанционным зондированием с использованием платформ Ил-18, Ту-134, Ан-24, МАР и MACS [43], оптимальными частотами для радиометрического обнаружения лесных пожаров являются: 1,43, 13,3 и 37,5 ГГц. или 21, 2,25 и 0,8 см соответственно. Точность измерений дистанционного зондирования зависит от многих факторов, таких как высота деревьев, их возраст и плотность, а также высота платформы дистанционного зондирования. Информация, представленная в табл. 3, позволяет оценить категорию лесной зоны для принятия решения о порядке контроля этой зоны с выделением очень опасных пикселей. Блок РОЗМР рассчитывает влажность лесной подстилки и влажность полога леса с использованием модели (3). Блок ОПУ на основе данных дистанционного зондирования обеспечивает обнаружение пикселей, где процесс горения существует.

Лесной пожар может быть трех типов: кронный, поверхностный и наземный. Действительно, эти виды пожаров могут комбинироваться. Температурные контрасты, которые могут быть зарегистрированы средствами дистанционного зондирования, позволяют распознавать эти типы пожаров. Kravivin и др. [26] и Chukhlantsev [7] предложили следующее уравнение для соотношения термодинамических и радиоярких температур:

$$T_c(1 - r - q) + k_{s-l}T_{s-l}q + T_cq(1 - r - q)(1 - k_{s-l}) = T_b^p(\chi) \quad (4)$$

где T_c - температура растительного покрова (К), T_{s-l} - температура подстилки (К), r - коэффициент отражения; q - коэффициент пропускания растительного слоя; k_{s-l} - коэффициент излучения наземной среды; T_b^p - радиояркая температура, зарегистрированная платформой дистанционного зондирования на длине волны χ и поляризации p .

Первый член уравнения (4) характеризует микроволновое излучение растительным слоем, второй член соответствует излучению почвы, третий член описывает излучение растительностью, отраженное от почвы и подстилки и ослабленное растительным слоем [9, 25, 28, 33]. Использование двух длин волн (2,25 и 21 см) в уравнении (4) позволяет получить значения T_c и T_{sd} в каждом пикселе пожароопасной зоны, что позволяет уточнить метеорологическую информацию и повысить вероятность обнаружения зоны пожара.

Таблица 3

Масштабная шкала риска лесных пожаров и пожароопасности в зависимости от площади пожара и влажности почвы.

Шкала	Риск пожара	Влажность подстилки, %	Пожароопасность	Пожарная зона, км ²
0	Огонь отсутствует	30-35	Нет опасности	0-0.5
1	Маловероятно	25-30	Незначительный	0.5-2
2	Возможно	20-25	Незначительный	2-4
3	Вполне возможно	15-20	Слабый	4-6
4	Вероятно	10-15	Тяжелый	6-10
5	Скорее всего	7-10	Очень тяжелый	Больше 10

Таблица 4

Значения весовых коэффициентов в уравнении (4).

Тип почвенно-растительной формации	Длина волны, χ			
	$\chi=2.25$ см		$\chi=21$ см	
	b	d	b	d
Средне-таежные леса	-0.716	0.121	-1.434	0.077
Северо-таежные леса	-0.772	0.151	-0.793	0.216
Широколиственные хвойные леса	-0.676	0.212	-0.816	0.149
Южно-таежные леса	-0.734	0.309	-0.802	0.284
Лесотундра	-0.783	0.097	-0.742	0.084
Широколиственные леса	-0.756	0.128	-0.699	0.234

Влажность полога леса оценивается по следующему уравнению [50].

$$FCM = d(MPDI)^b - 1 \quad (5)$$

где d и b - эмпирические коэффициенты, значения которых зависят от типа растительности и длины волны (табл. 4), микроволновый поляризационный индекс MPDI (microwave polarization difference index) рассчитывается по следующему уравнению:

$$MPDI = (T_b^v - T_b^h) / (T_b^v + T_b^h)$$

Оценка вероятности возникновения лесного пожара в Сибири

Исследование проводилось в Сибири в течение 1985-2019 гг. С использованием ЭСПАПЗ вместе с платформой дистанционного зондирования ИЛ-18 и спутниковыми данными. Сибирские леса всегда подвергались пожарам в течение мая-сентября каждый год. В бывшем Советском Союзе существовала специальная служба мониторинга лесных пожаров, где платформа дистанционного зондирования ИЛ-18 использовалась в течение летнего сезона в качестве источника первичной информации для службы лесного контроля. В настоящее время в России практически отсутствует служба лесного контроля с использованием микроволновых средств дистанционного зондирования, что увеличивает площадь сожженных лесов в Сибири и на Дальнем Востоке. Отсутствие платформ дистанционного зондирования для оперативного мониторинга сибирских лесов уравнивается с спутниковыми данными, которые, к сожалению, характеризуются как нерегулярные по времени и фрагментарные в пространстве. Таким образом, 2019 год стал рекордным для лесных пожаров, площадь которых достигла 14,9 млн. га. Положительным примером является информационная система воздушной службы охраны лесов России, которая выполняет функцию сбора спутниковых данных.

ЭСПАПЗ рассчитывает компоненты регионального водного баланса практически в режиме реального времени на основе метеорологических данных, предоставленных сибирскими метеорологическими службами Гидрометеоцентра России. Классификация и пространственное распределение сибирских почвенно-растительных формаций (СПРФ) принята по [27]. Табл. 5 характеризует основные типы СПРФ и их характеристики. Предполагается, что СПРФ равномерно распределены в каждом пространственном пикселе $\Delta\varphi \times \Delta\lambda$. Другие параметры для работы ЭСПАПЗ: $\Delta\varphi = \Delta\lambda = 10'$, $\Delta t = 1$ сутки.

Таблица 5

Количественные характеристики СПРФ на территории Сибири, где возможны пожары

Тип почвенно-растительной формации	Площадь формации (10 ⁶ км ²)	Продукция (г/м ² /сутки)	Фитомасса (кг/м ²)	Мертвое органическое вещество (кг/м ²)
Средне-таежные леса	0.88	4.2	22.5	10.8
Северо-таежные леса	0.83	3.6	10.0	8.1
Широколиственные хвойные леса	0.24	5.8	25.0	25.1
Южно-таежные леса	1.08	4.3	23.5	14.5
Лесотундра	0.29	4.3	3.8	9.0
Лесостепи	0.31	4.9	1.9	38.0
Широколиственные леса	0.23	8.3	45.0	24.8
Итого	3.86	35.4	131.7	130.3

Результаты многолетней эксплуатации платформы дистанционного зондирования Ил-18, представленной на рис. 1, позволили получить новые знания, представленные на рисунках 5-9 и в таблицах 6 и 7. Хотя яркостные температуры, зарегистрированные над различными пикселями, изменяются во времени, отражая типы растительности и их характеристики, принципиальная особенность вариации контрастов яркостных температур различных земных покровов сохраняется и позволяет очень надежно распознавать земные покровы. Рис. 5 демонстрирует это различие для случая, когда Ил-18 пролетал над тайгой в зоне впадения реки Ангара в реку Енисей). Яркостные температуры, зарегистрированные над лесными пожарами, имеют типичное пространственное распределение, надежно различающее зоны пожара. Рисунки 6 и 7 характеризуют уровни радиояркостных температур в зависимости от состояния пожара. Знание структуры лесного пожара упрощает определение средств для его тушения. Микроволновые радиометры могут обнаруживать и разделять категории пожаров, такие как копченая зона, фронт пожара, Микроволновые радиометры могут обнаруживать и разделять категории пожаров, такие как копченая зона, фронт пожара, горящие и сожженные зоны. Типичные уровни яркостных температур в этих зонах показаны на рисунках 6 и 7, что позволяет проводить детальную диагностику конструкции пожара с высокой точностью оценки его опасности. На рис. 8 показана зависимость радиояркостных температур от динамики влажности лесной подстилки после дождя. Моделирование водного баланса лесной экосистемы обеспечивает разделение пикселей на по уровням пожарной опасности. Каждый тип деревьев имеет специфический характер поглощения и потери дождевой воды в результате суммарного испарения. Блок МВБЛ реализует модель водного цикла в лесной экосистеме с учетом имеющихся знаний о характеристиках почвенно-растительных формаций из табл. 5.

Показатель ВВАП отражает совокупную роль таких экологических характеристик, как грозовая активность, влажность подстилки и температура в возможном возникновении лесного пожара. Грозовая активность в Сибирском регионе тесно связана с наличием развитой облачности в регионе и прохождением циклонических фронтов, что представлено в гидрометеорологических прогнозах [22]. Влажность подстилки и почвы рассчитывается по модели (3) и оценивается с помощью измерений с помощью дистанционного зондирования [25]. В табл. 6 и на рис. 9 показаны закономерности изменения влажности лесной подстилки после дождя. Lee и др. [32] рассматривают содержание влаги в подстилке в ее динамике в зависимости от осадков, классифицируемых как мелкие (< 5 мм) или крупные (> 5 мм) явления. Как следует из табл. 6 и рис. 9, влажность подстилки в процессе высыхания стабилизируется с глубиной.

Традиционное восприятие лесных пожаров в сибирских регионах в 2019 году приобрело опасные аспекты, связанные с растущим риском для людей и мест их обитания. Сложность проблемы управления лесными пожарами осложняется тем, что большинство пожаров возникло в отдаленных и мало доступных местах для наблюдений. Отсутствие платформ дистанционного зондирования, ориентированных на мониторинг лесных территорий в современной России, ограничивает контроль за пожарной опасностью и снижает эффективность служб пожаротушения.

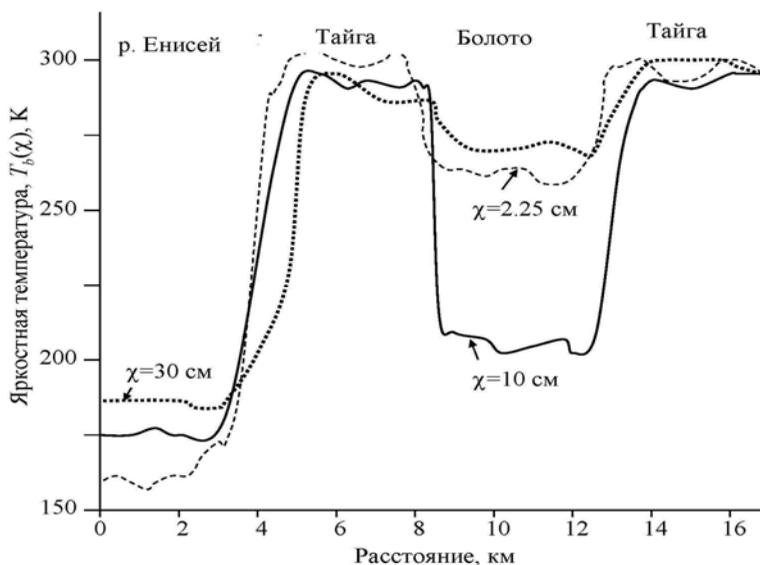


Рис. 5. Типичные распределения яркостной температуры вдоль трассы ИЛ-18 над пикселями, расположенными вблизи реки Енисей, зарегистрированные различными микроволновыми радиометрами. Яркость температуры была зарегистрирована в августе 1989 года спустя 5 дней после дождя

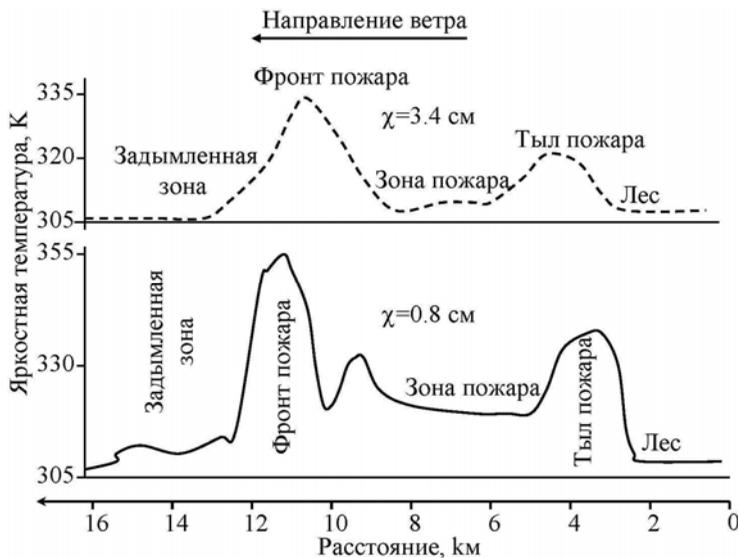


Рис. 6. Типичные распределения яркостной температуры, зарегистрированные вдоль трассы ИЛ-18 над пикселями при функционирующем пожаре

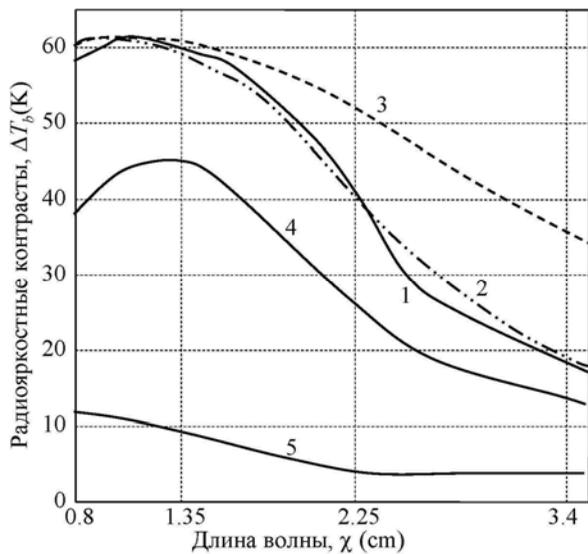


Рис. 7. Усредненные спектральные характеристики различных зон пожара: 1 - передняя, 2 - левая, 3 - правая, 4 - тыловая и 5 - сгоревшая зона.

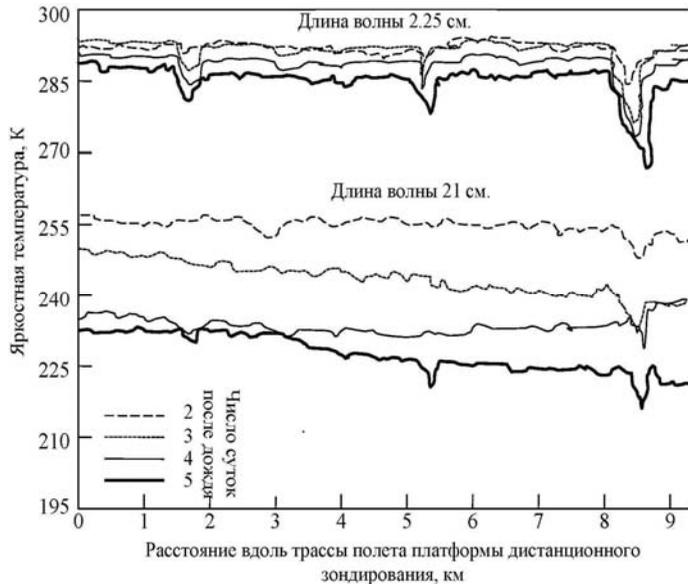


Рис. 8. Пространственно-временные колебания радиояркостной температуры при высыхании подстилки после нерегулярных осадков.

Таблица 6

Динамика влажности почвы (%) после выпадения осадков. Толщина грунта составляет 10,7 см. Коэффициент стока воды в почву равен 0,7. Коэффициент перехвата воды пологом составляет 0,2.

Дни после дождя	Осадки, см								
	0.1	0.3	0.5	1	2	3	4	5	
1	52	65	71	77	78	80	89	94	
2	29	32	39	42	49	55	68	89	
4	21	23	29	32	37	42	54	74	
6	18	19	25	28	32	35	48	65	
8	17	17	22	25	27	29	42	57	
10	16	16	19	22	25	28	37	51	
15	15	16	18	22	23	24	28	39	
20	13	14	15	21	22	22	23	29	
30	11	12	13	17	17	17	19	21	

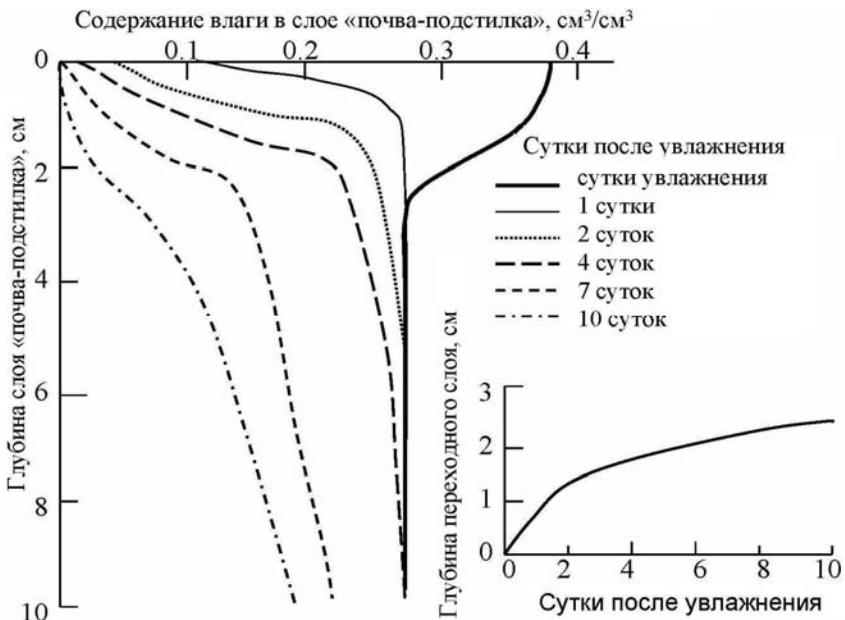


Рис. 9. Экспериментальные профили влажности подстилки в динамике ее высыхания. Глубина переходного слоя - 2,25-0,7 см, толщина подстилки - от 0 до 10 см.

Примеры расчета влажности подстилки с использованием модели водного баланса леса и спутниковых данных в июле 2019 г.

№	Пиксель	Влажность подстилки, %					Средняя ошибка, %
		Модель	Дистанционное зондирование	Расхождение	Контактные данные		
1	56°17'17"N, 95°54'21"E 56°17'10"N, 95°54'28"E	15.2	14.1	1.1	14.4	3.7	
2	49°51'42"N, 129°48'25"E 49°51'35"N, 129°48'32"E	13.6	10.2	3.4	12.7	15.5	
3	52°57'21"N, 104°19'06"E 52°57'14"N, 104°19'13"E	11.3	10.1	1.2	9.8	8.2	
4	51°59'51"N, 79°15'48"E 51°59'44"N, 79°15'55"E	18.1	16.8	1.3	16.9	3.6	
5	50°47'14"N, 114°29'17"E 50°47'07"N, 114°29'24"E	13.7	11.9	1.8	10.6	16.8	
6	51°57'39"N, 79°13'48"E 51°57'32"N, 79°13'55"E	35.4	33.7	1.7	34.3	3.1	

Табл. 7 характеризует точность предложенного способа диагностики лесных территорий с выявлением зон, где возможен лесной пожар. Мы видим, что модель (3) дает завышенные значения влажности лесной подстилки по сравнению с данными дистанционного зондирования. Сравнение с контактными измерениями показывает, что как модель (3), так и дистанционное зондирование обеспечивают приемлемую точность для надежного принятия решения о вероятности возникновения лесного пожара. Действительно, возгорание леса в каждом пикселе началось в течение нескольких дней после того, как влажность подстилки или полога составила менее 16%. Например, в случае 1 в табл. 7 пиксели с влажностью подстилки менее 16% были локализованы 4 августа 2019 года, а возпламенение было зарегистрировано 8 августа 2019 года. Эти пиксели расположены вблизи села Карап-сель Красноярского края. Случай 2 принадлежит зоне вблизи с. Буря Амурской области. В этом случае пиксели риска возникновения пожара были обнаружены 11 мая 2019 года, а возгорание леса было зарегистрировано 14 мая 2019 года. Случаи 4 и 5 демонстрируют уровень эффективности ЭСПАПЗ для обнаружения зон с высокой вероятностью возникновения пожара возле села Неводное (Алтайский край) в 2010 году и села Баян-Булак (Забайкалье, Бурятия) в 2012 году соответственно. В случае 6 вероятность возникновения пожара составляет не более 10-12 процентов.

На рис. 10 показаны результаты ЭСПАПЗ для пространственного распределения ВВАП в рамках цифрового масштаба, рассчитанного на июль 2019 года. Сравнение с данными НАСА EOSDIS GIBS о лесных пожарах в Сибири в июле 2019 года не обнаруживает существенных расхождений. Такие цифровые карты помогают оценить уровень опасности лесного пожара и решить задачу оптимального распределения средств дистанционного зондирования для управления наиболее опасными участками. Полученная рейтинговая матрица ВВАП может использоваться для процедуры поддержки принятия решений по обнаружению и прогнозированию возникновения лесных пожаров в районе исследований.

Проблемы диагностики лесных экосистем

Знание состояния лесных экосистем в современное время оказывается одним из приоритетных направлений при изучении глобальных изменений, включая изменение климата, регулирование парникового эффекта, производство продовольствия и древесины [1,5,14]. Многообразие взаимоотношений человеческого общества и территорий, покрытых лесом, затрудняет достоверную прогнозную оценку последствий для человечества происходящих антропогенных изменений этих территорий. Совершенно очевидно, что натуральный эксперимент с лесами пора заканчивать и переходить к компьютерным модельным экспериментам. Именно только с помощью моделей возможна безопасная стратегия выработки управленческих решений в области лесоведения.

Современная популяционная биология создала научную базу для развития математических моделей лесных экосистем. Её основой является рассмотрение леса как биосистемы определенного ранга, характеризующейся набором её признаков. Одним из таких признаков служит показатель генетической структуры лесного биогеоценоза. Обычно в моделях лесных экосистем, учитывающих их пространственную неоднородность, вводятся ограничения на видовое разнообразие в структуре дискретных пикселей пространства. Как правило, считается, что в каждом пикселе находятся осо-

би одного вида, а характеристики окружающей среды пикселя однородны. При этом учитывается возрастная дифференциация деревьев между пикселями, что согласуется с пространственными разрешениями спутниковых систем мониторинга. Разработка моделей лесных экосистем для решения проблем лесного хозяйства требует огромного количества различных данных. Применение ГИМС-технологии позволяет здесь решить главную задачу снижения требований к информационному обеспечению систем мониторинга и осуществить синтез эффективных моделей на базе простых моделей отдельных частных процессов функционирования лесов [26]. Достаточно подробный анализ уже созданных моделей лесных экосистем сделан в [25,27], где впервые разработана концепция построения биоэкологических моделей многовидовых разновозрастных лесных насаждений, включающая следующие основные положения:

- основные биоэкологические параметры видов изменяются в течение онтогенеза, соответственно в моделях они заданы (в виде справочных баз) для каждого возрастного (онтогенетического) состояния всех моделируемых видов;

- доступная фотосинтетически активная радиация (ФАР) является основным системообразующим фактором формирования и развития лесных экосистем в пределах территорий с умеренным климатом;

- темпы роста деревьев и насаждений зависят от взаимного положения особей и их групп в пространстве, особенностей светового режима, доступности влаги и элементов минерального питания;

- гибель особи (группы особей) наступает в результате естественного старения; дефицита ресурса, ниже предельно допустимых значений; длительного недополучения ресурса; экзогенных, в том числе и антропогенных воздействий;

- число особей каждого вида, появляющихся в результате естественного возобновления, зависит от доступного количества семян, условий развития проростков, а также способности к порослевому возобновлению;

- пространственная структура отдельных деревьев и их групп может быть представлена в виде набора прямоугольных параллелепипедов.

Лесная экологическая система является важной составляющей глобального континуума почвенно-растительных формаций Земного шара. Поэтому создание моделей, которые бы описывали динамику леса, является принципиальным этапом синтеза глобальной модели. Конечно, значение моделей лесных экосистем является более широким, так как лесные ресурсы и их использование влияют на экономические потенциалы регионов.

Многообразие типов лесных экосистем, функционирующих в столь же многообразных условиях внешней среды, заставляет исследователей искать пути согласования этих многообразий. Hasenauer (2012) обсудил технологию моделирования лесных экосистем, выделив три главных направления:

- модели роста и продуктивности,
- модели сукцессии, и
- биогеохимически-механистические модели.

При выборе типа модели из этого ряда или создания комбинированной модели необходимо ориентироваться на соотношение временных и пространственных масштабов, учитывая цель моделирования и информационные возможности. Схематически это отражено на рис. 11

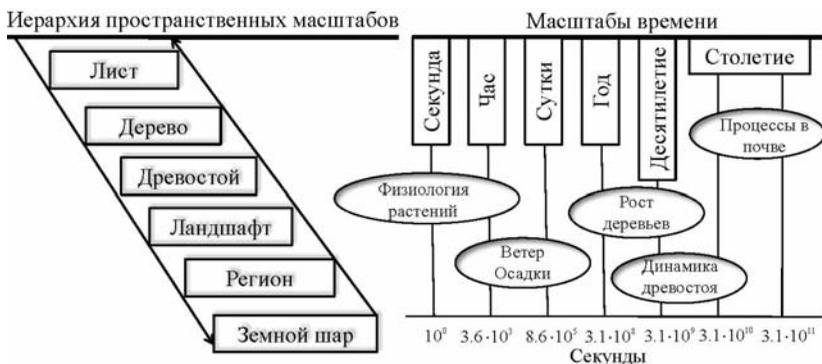


Рис. 11. Схема согласования пространственных и временных шкал при моделировании лесной экосистемы.

Заключение и обсуждение

В этой статье авторы предложили экономически эффективную систему мониторинга с функцией обнаружения подверженных лесным пожарам зон на основе инструментов моделирования и дистанционного зондирования. Анализ факторов, вызывающих возгорание в лесу в разных регионах Сибири, показывает, что причины лесных пожаров в Сибири и Европе существенно различаются. Лесные пожары по антропогенным факторам в Европе в основном возникают вблизи транспортной сети, городских и рекреационных зон. Человеческий фактор лесных пожаров в Сибири не подчиняется этому правилу и носит преимущественно криминальный характер. Следовательно, пространственное и временное распределение зон возникновения пожаров не коррелирует с зонами антропогенной активности, включая плотность населения. Лесные пожары возникают в различных доступных и малодоступных зонах сибирской тайги по антропогенным факторам, о чем регулярно пишет российская пресса.

Конечно, обширные сибирские районы вносят значительную неопределенность в отношении типов почвенно-растительных образований, расположенных во многих малодоступных пикселях, где тип растительности может быть идентифицирован только с помощью спутниковых данных, предоставляемых в частности радиометром NOAA-AVHRR [12, 44]. Индекс NDVI помогает оценить различные параметры растительности, включая плотность растительного покрова. Индекс LAI обеспечивает оценку биомассы и фотосинтетической активности. Соответствующие алгоритмы для численной оценки этих параметров описаны в работах [23, 27]. Табл. 4 показывает, что индекс MPDI чувствителен к общему влагосодержанию растительности на единицу площади и зависит от типа леса. Детальное изучение MPDI для различных классов земного покрова требует особого рассмотрения их микроволновых характеристик [28]. Кроме того, для сибирского региона характерна мозаика типов деревьев разных возрастов, и структура информации о некоторых из них может быть ненадежной. Поэтому необходимо более детальное изучение сибирских лесов [31].

Структура ЭСПАПЗ была синтезирована таким образом, чтобы иметь максимально универсальное расположение своих блоков, информационные потоки между которыми управляются только информационной магистралью. Эта структура допускает произвольную замену или добавление функциональных блоков без модификации других блоков. Информационные входы ЭСПАПЗ могут изменяться в рамках структуры, представленной на рис. 2. В этом исследовании использовался ограниченный список входных данных, предоставляемых региональными лесными службами и инструментами дистанционного зондирования. Очевидные неточности существовали при описании почвенно-растительных формаций в пределах ограниченного числа пикселей. Тем не менее, результаты этого исследования показывают, что ЭСПАПЗ предоставляет полезные данные о пространственном распределении содержания воды в подстилке и полого леса и вероятности возникновения лесных пожаров (см. рис. 10). Это исследование показывает, что инструменты моделирования и дистанционного зондирования при комбинированном использовании позволяют периодически и последовательно охватывать большие лесные районы, чтобы ранжировать пространственные пиксели по их риску возникновения пожара.

Главный вопрос, который возникает здесь - это оценка точности результатов диагностики и прогнозирования. Результаты табл. 7 и рис. 10 показывают, что точность оценок влажности подстилки и полога изменяется в значительном диапазоне, и пространственное распределение ВВАП согласуется с наблюдаемым распределением реальных пожаров в июле-августе 2019 года (данные NASA EOSDIS GIBS).

Основная идея данной статьи заключалась в том, чтобы предложить новую структуру мониторинга для оперативной диагностики обширных лесных пожароопасных территорий на примере сибирской территории как важнейшего компонента глобального изменения климата. Авторы надеются, что Федеральное агентство лесного хозяйства России обратит внимание на это предложение и поможет реализовать ЭСПАПЗ для регулярного мониторинга сибирских лесов.

Авторы надеются продолжить это исследование, чтобы дать более подробную классификацию сибирских лесов, учитывая возраст деревьев и густоту леса, и искать оптимальные частоты для более правильного радиометрического обнаружения зон, подверженных лесным пожарам. Серьезное ограничение для оперативного использования датчиков дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне связано с низким номинальным достижимым пространственным разрешением. Решение этой задачи планируется путем синергизма между микроволновыми и оптическими инструментами [20].

Предварительные результаты этого исследования показали наличие эффективных частот, которые позволяют более точно оценить температуры T_c и $T_{v,l} - 1.43 \text{ GHz}$ ($\chi=21 \text{ см}$), 13.3 GHz ($\chi=2.25 \text{ см}$) и 37.5 GHz ($\chi=0.8 \text{ см}$). Выбор частот в зависимости от высоты деревьев может улучшить результаты ЭСПАПЗ. Предварительные результаты показали, что с ростом высоты деревьев требуется уменьшать микроволновые частоты. Эти и другие модификации реализуемого ЭСПАПЗ могут значительно повысить его точность.

*Данная работа частично выполнена в рамках госзадания «КОСМОС»
и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований
(Грант РФФИ № 19-07-00443).*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (References)

1. Alkhatib A. A Review on forest fire detection Techniques. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014, 9: DOI: 10.1155/2014/597368
2. An S.-H., Lee S.Y., Won M.-S., Lee M.B. (2004) Developing the forest fire occurrence probability model using GIS and mapping forest fire risks. *Journal of Korean Association of Geographic Information Studies*, 2004, 7(4): 57-64
3. Baranovskiy N.V., Kuznetsov G.V. Forest fire occurrences and ecological impact prediction. Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 2017, 259 pp.
4. Bosisio AV, Dechambre M Predictions of microwave attenuation through vegetation: a comparison with measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(19): 3973-3997
5. Chen S., Wen Z., Jiang H., Zhao Q., Zhang X., Chen Y. Temperature Vegetation Dryness Index Estimation of Soil Moisture under Different Tree Species. *Sustainability* 2015, 7(11): 401-11,417
6. Chowdhury E.H., Hassan Q.K. Development of a New Daily-Scale Forest Fire Danger Forecasting System using remote sensing data. *Remote Sensing*, 2015, 7: 2431-2448
7. Chukhlantsev A.A. *Microwave Radiometry of Vegetation Canopies*. Springer, Berlin, 2006, 287 pp
8. Chuvieco E., Cocero D., Riaño D., Martín P., Martínez-Vegac J., de la Rivad J., Pérez F. Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92: 322–331.
9. Demontoux F., Le Crom B., Ruffie G., Wigneron J.P. Electromagnetic characterization of soil-litter media: Application to the simulation of the microwave emissivity of the ground surface in forests. *The European Physical Journal Applied Physics* 2008, 44(03): 303 - 315
10. Dowdy A.J., Mills G.A., Finkele K., de Groot W. Australian fire weather as represented by the McArthur Forest Fire Danger Index and the Canadian Forest Fire Weather Index. CAWCR Technical Report No. 10, The Centre for Australian Weather and Climate Research, Melbourne, 2009, 85 pp.
11. Eskandari S. A new approach for forest fire risk modeling using fuzzy AHP and GIS in Hyrcanian forests of Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 2017, 10:190-204
12. Felde G.W. The effect of soil moisture on the 37GHz microwave polarization difference index (MPDI). *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19:6, 1055-1078
13. Gai C., Weng W., Yuan H. GIS-based forest fire risk assessment and mapping. *Proceedings of the Fourth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*, 15-19 April 2011, Yunnan, China, IEEE, 2011, pp. 1240-1244
14. Ganteaume A., Camia A., Jappiot M., San Miguel-Ayanz J., Long-Fournel M., et al. A Review of the main driving factors of forest fire ignition over Europe. *Environmental Management*, Springer Verlag (Germany), 2013, 51 (3): 651 - p. 662.
15. González-Alonso F., Merino De Miguel S., Roldán Zamarrón A., García Gogorro S., Cuevas J.M. Forest biomass estimation through NDVI composites. The role of remotely sensed data to assess Spanish forests as carbon sinks. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(24): 5409-5415
16. Gorbatenko V., Dulzon A. (2001) Variations of thunderstorm. *Proceedings of the 5th Korea-Russia International Symposium on Science and Technol-*

ogy, 26 June-3 July 2001, Tomsk, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2001, 2: 62-66.

17. Haarbrink R., Krapivin V.F., Krisilov A., Krisilov V., Novichikhin E.P., Shutko A.M., Sidorov I. Intelligent data processing in global monitoring and security, ITHEA, Sofia-Kiev, 2011, 410 pp.

18. Jafarzadeh A.A., Mahdavi A., Jafarzadeh H. Evaluation of forest fire risk using the Apriori algorithm and fuzzy c-means clustering. *Journal of Forest Science*, 2017, 63(8): 370–380

19. Kamatsu H., Kumagai T., Hotta N. Effects of vertical air temperature distribution within forest canopies on photosynthesis and transpiration. *Bull.KyushuUniv.For.*, 2007, 88: 1-19

20. Kempka T., Kaiser T., Solbach K. Microwaves in fire detection. *Fire Safety Journal*, 2006, 41(4): 327-333

21. Kim SJ, Lim C-H, Kim GS, Lee J, Geiger T, Rahmati O, Son Y, Lee W-K Multi-temporal analysis of forest fire probability using socio-economic and environmental variables. *Remote Sensing* 2019, 86(11): 1-19

22. Kolesnik S.A., Kolmakov A.A., Tsyupa I.Yu. Estimation of local thunderstorms at the level of extremely low-frequency electromagnetic background in-Tomsk //Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2018. Vol. 10833. P. 1083321-1-1083321-5.

23. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Savinykh V.P., and Varotsos C.A. *Global Ecodynamics: A Multidimensional Analysis*. Springer/PRAXIS, Chichester U.K. , 2004, 658 pp.

24. Konstantinova D.A., Gorbatenko V.P., Polyakov D.V. Spatial distribution of the thunderstorm activity characteristics for the territory of western Siberia. In: G.G. Matvienko, O.A. Romanovskij (Eds) *Proceedings of the 23 rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. November 30, 2017, Irkutsk. Institute of Atmospheric Optics, Irkutsk, 2018, Vol. 10466, <https://doi.org/10.1117/12.2285994>.

25. Krapivin V.F., Shutko A.M. *Information technologies for remote monitoring of the environment*. Springer/Praxis, Chichester U.K., 2012, 498 pp.

26. Krapivin V.F., Shutko A.M., Chukhlantsev A., Golovachev S.P., and Phillips G.W. GIMS-based method for vegetation microwave monitoring. *Environmental Modelling and Software*, 2006, 21(3): 330-345.

27. Krapivin V.F., Varotsos C.A., Soldatov V.Yu. *New Ecoinformatics Tools in Environmental Science: Applications and Decision-making*. Springer, London, U.K., 2015, 903 pp.

28. Krapivin V.F., Varotsos C.A., Marechek S.V. The Dependence of the Soil Microwave Attenuation on Frequency and Water Content in Different Types of Vegetation: an Empirical Model. *Water Air Soil Pollut.*, 2018, paper 110, 229(4): 1-10.

29. Krapivin V.F., Nitu C., Varotsos C.A. *Remote sensing tools and ecoinformatics*. Matrix Rom, Bucharest, Romania, 2019, 332 pp.

30. Krestov P. Forest vegetation of Easternmost Russia (Russian Far East). In: J. Kolbek, M. Strutek, E. Box (Eds) *Forest Vegetation of Northeast Asia*, Springer, London, 2003, pp. 93-180.

31. Launiainen S., Guan M., Salmivaara A., Kieloaho A.-J. Modeling boreal forest evapotranspiration and water balance at stand and catchment scales: a spatial approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2019, 23: 3457–3480

32. Lee H., College D.B., McCulley R.L., Archer S.R. Soil moisture and soil-litter mixing effects on surface litter decomposition: A controlled environment assessment. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 72: 123-132

33. Meesters A.G.C.A., De Jeu R.A.M., Manfred O. Analytical derivation of the vegetation optical depth from the microwave polarization difference index. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 121-123
34. Mireku-Guimah YD, Duker AA Review of methods for modeling forest fire risk and hazard. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, 9(3): 155-165
35. Mullayarov V.A., Toropov A.A., Kozlov V.I. Patterns of spatial distribution of positive thunderstorm discharges in Eastern Siberia, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2009, 34(6): 364-370
36. Onuchin A., Burenina T., Pavlov I. Hydrological consequences of timber harvesting in landscape zones of Siberia. *Environments*, 2017, 4(51): 1-16
37. Pampalony P. Microwave radiometry of forests. *Waves Random Media*, 2004, 14: S275-S298
38. Ponomarev E.I., Ponomareva T.V., {rokushkin A.S. Intraseasonal dynamics of river discharge and burned forest areas in Siberia. *Water*, 2019, 11(1146): 2-11
39. Prestemon J.P., Butry D.T. Time to burn: modeling wildland arson as an autoregressive crime function. *American Journal of Agricultural Economics*, 2005, 87: 756–770.
40. Shamina O., Kiseleva M. It is conflagrated what is profitable to cut down. How work “commercial” the forest arsons? *Russian BBC News*, 2 August 2019.
41. Schunk C., Ruth B., Leuchner M., Wastl C., Menzel A. Comparison of different methods for the in situ measurement of forest litter moisture content. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2016, 16: 403–415
42. Sharples J.J., McRae R.H.D., Weber R.O., Gill A.M. A simple index for assessing fire danger rating. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24: 764–774
43. Shutko A.M., Krapivin V.F., Haarbrink R.B., Sidorov I.A., Novichikhin E.P., Archer F., Krisilov A.D. Professor Marin Drinov Academic Publishing House, Sofia, Bulgaria, 2010, 88 pp.
44. Singh R.P., Dadhwal V.K. Comparison of space-based microwave polarization difference index and normalized difference vegetation index for crop growth monitoring. *Indian Journal of Radio and Space Physics*, 2003, 32: 193-197
45. Speich M.J.R., Zappa M., Lischke H. Sensitivity of forest water balance and physiological drought predictions to soil and vegetation parameters A model-based study. *Environmental Modelling & Software*, 2018, 102: 213-232
46. Sun G., Domec J.-C., Amatya D.M. (2016) Forest evapotranspiration: Measurement and modelling at multiple scales. In: D.M. Amatya, T.M. Williams, L. Bren, C. de Long (Eds) *Forest Hydrology: Processes, Management and Assessment*. CABI Publishers, U.K., 2016, Chapter 3, pp. 32-50
47. Tarabukina L., Kononova N., Kozlov V. Innokentiev D. (2018) Analysis of atmospheric circulation condition during severe thunderstorms in Yakutia in 2009-2016. *E3S Web of Conferences* 62, 2018, 01001, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201862010>
48. Valendik E.N. Basic principles of boreal forest fire protection in Eurasia. *Proceedings of the 20th Tall Timbers Fire Ecology Conference: Fire in Ecosystem Management: Shifting the Paradigm from Suppression to Prescription*. 7-10 May 1996, Boise, Idaho. Tallahassee, FL. : Tall Timbers Research Station, 1998, pp. 398-402

49. Varotsos C.A., Krapivin V.F. A new big data approach based on geocological information-modeling system. *Big Earth Data*, 2017, 1: 1-2, 47-63
50. Wen J., Jackson T.J., Bindlish R., Hsu A.Y. Retrieval of soil moisture and vegetation water content using SSM/I data over a corn and soybean region. *Journal of Hydrometeorology—Special Section*, 2005, 6: 854-863
51. White B., White L., Ribeiro G., Fernandes P. Development of a fire danger index for eucalypt plantations in the northern coast of Bahia, Brazil. *Floresta*, 2013, 43(4): 601-610
52. Yang X., Yu Y., Hu H., Sun L. Moisture content estimation of forest litter based on remote sensing data. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(7): 421 (1-10).