

К.т.н. И.А. Чуб, д.т.н. И.Б. Туркин

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРА В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Рассмотрены методологические подходы применяемые при построении методик оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций. Даны рекомендации по совершенствованию методики оценки опасности лесных экосистем

Постановка проблемы. В настоящее время аэро и спутниковые данные – это единственно доступная информация о чрезвычайных катастрофах природного и техногенного характера в неохраемых лесах, существенно дополняющая данные, получаемые с помощью обычных методов на охраняемых территориях. Аэрокосмический мониторинг в этом случае действительно способен решать следующие задачи:

- оценивать пожарную опасность лесных регионов и прогнозировать ее динамику;
- обнаруживать ЛП и определять их интенсивность, а также прогнозировать поведение крупных пожаров;
- проводить инвентаризацию послепожарного состояния лесов.

Пожарная опасность лесных регионов и возможность возникновения ЛП определяются влажностью проводников горения. К их числу относятся: напочвенный покров (при низовых пожарах), подстилаящая поверхность и торф (при подземных пожарах), древесно-кустарниковый ярус (при верховых пожарах). Подавляющее большинство ЛП возникает в результате загорания напочвенного покрова, что позволяет ограничиться при оценке условий их возникновения расчетом влажностного содержания только этой группы лесных горючих материалов (ЛГМ).

В то же время обнаружение, прогнозирование и оценка риска возникновения лесных пожаров – наиболее сложная часть лесопожарного мониторинга. Так, например, при обнаружении ЛП возникают трудности, связанные как с природными причинами: затененностью лесного пожара кронами, облачностью, дымом, так и с техническими: недостаточной разрешающей способностью и чувствительностью регистрирующей аппаратуры космических средств, несовершенством элементов схемы передачи и обработки информации.

Анализ последних достижений и публикаций. Анализ публикаций посвященных вопросам определения величины риска возникновения чрезвычайных ситуаций природного характера в лесных экоси-

стемах [1-4] позволяет очертить основные направления и проблематику научных изысканий, что и проделано авторами в статье.

Постановка задачи и ее решение. Анализ возникновения пожаров в природных экосистемах показал, что возникающий пожар имеет характерную форму кольца, вытянутого в направлении ветра. При этом подветренная часть кромки (фронт) имеет увеличенную ширину по сравнению с наветренной (тыл), а их отношение пропорционально скорости ветра под пологом древостоя. Так, в сосняке при скорости ветра 3 м/с (4-й класс пожарной опасности) и температуре воздуха 300 К через 25-30 мин сформируется кольцо пожара, занимающее площадь около 0,4 га. Скорость фронта составляет около 2 м/мин, тыла – 0,3 м/мин. Ширина фронтальной кромки будет примерно равной 2,0 м, в том числе пламенной зоны 1,2 м и зоны горения углеродистых остатков 0,8 м. Для тыльной кромки эти значения составляют 0,3 и 0,1 м соответственно. Излучательные характеристики представляются в виде:

- на фронте средняя термодинамическая температура пламенной зоны $T_n = 1100$ К, углеродистой зоны $T_y = 800$ К, пульсации температуры в газовой фазе $A_T = 200$ К, средняя частота пульсаций $f = 10$ Гц;

- в тыльной области температуры $T_n = 1000$ К и $T_y = 800$ К.

В соответствии с формулой Планка при $T = 1100$ К максимум излучения приходится на $\lambda = 2,6$ мкм, при $T = 1000$ К — на $\lambda = 2,9$ мкм, при $T = 800$ К – на $\lambda = 3,6$ мкм. Коэффициент теплового излучения пламени $\varepsilon = 0,8$. Спектральные особенности наблюдаются на полосах поглощения воды и углекислого газа. Для углеродистой зоны коэффициент излучения близок к 1. Эти данные позволяют оценить средний по кромке ЛП лучистый поток в диапазоне 2 – 14 мкм. Он составляет около 80 кВт/м². Мощность излучения кромки горения площадью 100 м² равна 24 000 кВт, т.е. лишь около 20% энергии пожара, остальные 20% расходуются на прогрев слоя атмосферы над пожаром (конвекционной колонки), почвы и несгоревших материалов.

Восходящее от пожара излучение ослабляется пологом древостоя и атмосферой. Коэффициент пропускания ИК-излучения пологом варьируется от 0,3 до 0,9. Принимая его среднее значение 0,6, получаем мощность результирующего лучистого потока, выходящего в атмосферу, $\Phi = 14000$ кВт.

При обычных метеоусловиях пожары не причиняют существенного вреда и даже в ряде случаев приносят пользу лесному хозяйству. Они очищают лес от уже погибших деревьев и кустарников, тем самым снижая пожарную опасность, уничтожают очаги насекомых-вредителей и т.д. Такие пожары способствуют возобновлению леса. Вместе с тем на фоне длительной засухи пожары действуют как разрушительный фактор.

Каждый вид ЛГМ в напочвенном покрове характеризуется предельным влагосодержанием, при котором возможно распространение горения. Для зеленых мхов оно составляет 35 – 40%, для кустистых лишайников – 25 – 35%, отмершей травы и листьев – 20 – 25%, лесной подстилки – 50 – 60%, торфа – 40 – 50%. Такое состояние ЛГМ обычно наступает в лесу через 85 – 150 часов сушки в случае отсутствия жидких осадков, при наличии солнечной радиации и слабой облачности.

Интенсивность высыхания лесных горючих материалов в большей мере определяется температурой материала T_m , чем температурой воздуха t , поскольку последняя не отражает напрямую процесс радиационного теплообмена ЛГМ с окружающей средой. Оказалось, что если в течение периода сушки суммировать ежедневные температуры ЛГМ, то накопленная сумма температур $\sum T$ будет связана линейной зависимостью с влагосодержанием ЛГМ: чем выше $\sum T$, тем меньше влагосодержание. Коэффициенты корреляции между суммой температур ЛГМ и влагосодержанием равны $r = 0,68$ для травяной ветоши, $r = 0,88$ для спада хвой сосны, $r = 0,74$ для спада листвы березы. Тесная связь между $\sum T$ и влагосодержанием ЛГМ позволяет по сумме температур за некоторый период оценивать влагосодержание и определять пожарную опасность как степень готовности лесных горючих материалов к самопроизвольному поддержанию горения. Это позволит использовать спутниковую информацию о радиационных температурах ЛГМ для оценки пожарной опасности. Коэффициент теплового излучения ЛГМ $\varepsilon = 0,94 - 0,96$, и потому радиационная температура T_p меньше температуры материала T_m всего на 4 – 6%. Максимум излучения подстилающей поверхности лежит в диапазоне 8 – 14 мкм, попадающем в окно прозрачности атмосферы. Таким образом, радиационная температура T_p – достаточно надежная оценка температуры ЛГМ T_m , определяемая, например, с помощью спутника NOAA (4-й и 5-й каналы сканера AVHRR). При этом учитывается, что хотя кроны деревьев и могут частично экранировать излучение, восходящее от подстилающей поверхности, но сами имеют такую же или даже несколько большую температуру, чем подстилающая поверхность.

Существующая система оценки пожарной опасности базируется на комплексном метеорологическом показателе Нестерова, учитывающем осадки, температуру и влажность воздуха на основании метеорологических наблюдений. Пожарная опасность ЛГМ оценивается косвенным путем по авторегрессионному соотношению

$$T_j = \xi T_{j-1} + t_j (t_j - \tau_j),$$

где τ – температура точки росы в момент наблюдений, ближайший к 12 часам местного времени, °C, t – температура воздуха в тот же мо-

мент, °С, ξ – коэффициент учета осадков, Γ_{j-1} и Γ_j – комплексные метеорологические показатели предшествующего и текущего дня.

К сожалению, очень неравномерная сеть метеостанций сокращается, это не позволяет надежно прогнозировать пожарную опасность по всей лесной территории. Выход из положения состоит в применении дистанционного спутникового зондирования, основанного на оценке пожарной опасности по сумме радиационных температур. В отличие от показателя Нестерова этот метод использует информацию, получаемую непосредственно с подлежащих контролю лесных территорий.

Иначе говоря, метод состоит в суммировании поля радиационных температур подстилающей поверхности. Суммирование производится ежедневно от одного момента выпадения жидких осадков до другого по результатам съемки в 13-15 часов местного времени, когда наблюдается суточный минимум влагосодержания ЛГМ. Моменты выпадения жидких осадков определяются по данным метеостанций и информации о влажности воздуха, получаемой с радиометра HIRS спутника NOAA. Далее, используя пороговый метод классификации, участки лесной территории относят к определенному классу пожарной опасности путем сравнения с заданными порогами суммы температур для каждого пикселя. Анализ серии полей радиационных температур дает прогноз динамики пожароопасной ситуации.

Если на момент съемки часть поверхности закрыта кучево-дождевыми облаками, поля радиационных температур дополнительно анализируются на других витках, полученных в тот же день, путем взаимного наложения полей и исключения облачности.

Показатель суммы радиационных температур хорошо коррелирует с метеорологическим комплексным показателем пожарной опасности Нестерова. По результатам расчета ежедневно составляются картосхемы текущей пожарной опасности (рис. 1).

Данные мониторинга лесных пожаров передаются в органы МЧС и авиалесоохраны. Эти сведения помогают подразделениям авиалесоохраны планировать полеты патрульных самолетов и, в конечном итоге, приносят экономический эффект.

В настоящее время известно несколько подходов к обнаружению ЛП и использованием данных радиометра AVHRR, установленного на спутниках серии NOAA. Вегетационные индексы могут быть использованы не только для контроля состояния растительности, но и для обнаружения пожаров. Нормализованный вегетационный индекс рассчитывается по формуле:

$$NDVI = (f_2 - f_1) / (f_2 + f_1),$$

где f_1 – яркость объекта в видимом диапазоне (1-й канал радиометра

AVHRR – 0,58—0,68 мкм); f_2 – яркость объекта в ближнем инфракрасном диапазоне (2-й канал радиометра AVHRR – 0,725 – 1,0 мкм). Для растений в нормальном состоянии f_1 и f_2 заметно различаются. Интенсивность рассеянного солнечного излучения частицами дыма в этих каналах $f_1 \approx f_2$, поэтому при использовании *NDVI* можно построить изображение, на котором шлейфы дыма от ЛП выделяются на фоне растительности (рис. 2). Кроме дымовых шлейфов *NDVI* позволяет обнаруживать оставленный сильным повреждением растительности шрам в ландшафте, который может использоваться как исходные данные для оценки площади распространения пожара.

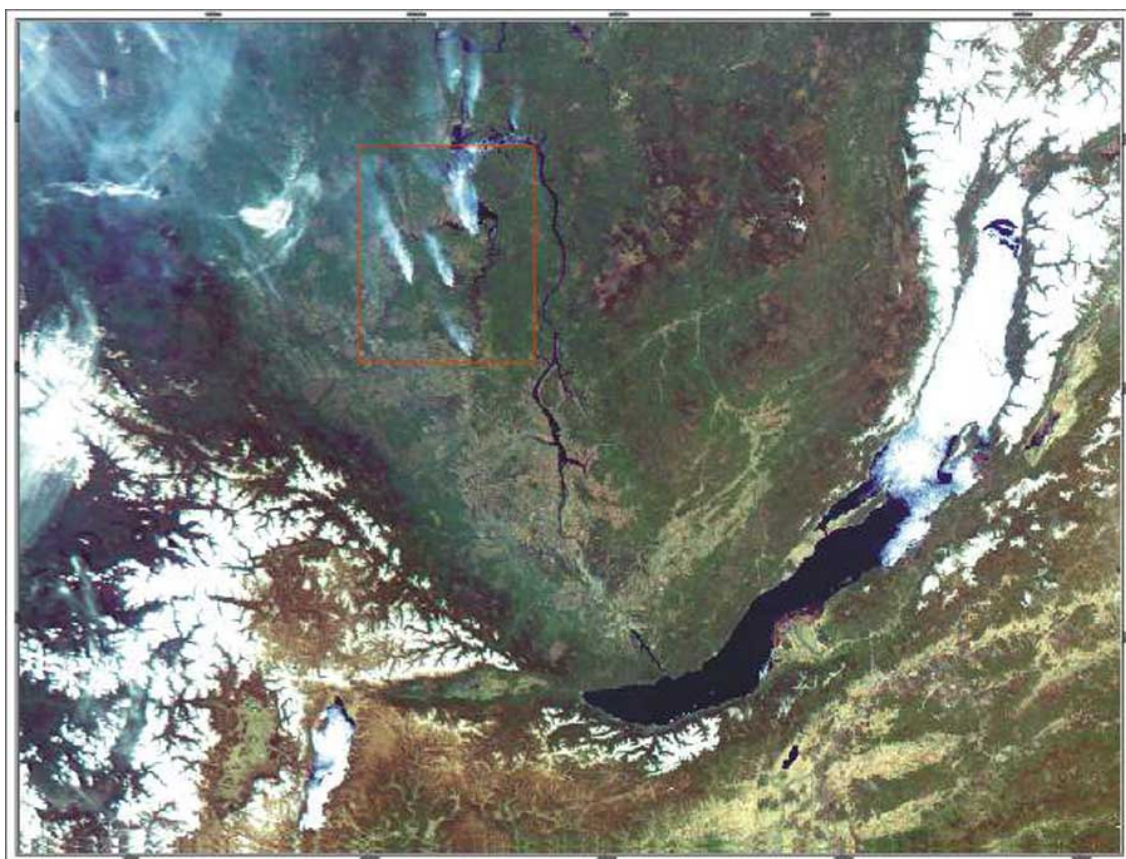


Рис. 1 – Карта пожарной опасности, составленная по спутниковым данным

Как уже указано, максимум теплового излучения от объекта с температурой $T = 800$ К приходится на $\lambda = 3,6$ мкм. Длина волны 3,5 – 4 мкм попадает в окно прозрачности атмосферы.

Сканер AVHRR спутника NOAA, 3-й канал которого работает на волнах длиной 3,55 – 3,93 мкм, можно эффективно использовать для обнаружения ЛП. К достоинствам спутника NOAA относятся также свободный доступ к данным, возможность наблюдать один и тот же участок поверхности 4-6 раз в сутки (при наличии двух-трех спутников), широкая (около 3000 км) полоса обзора. Однако зависи-

мость сигнала на выходе датчика 3-го канала от освещенности нелинейная, с выраженным насыщением.

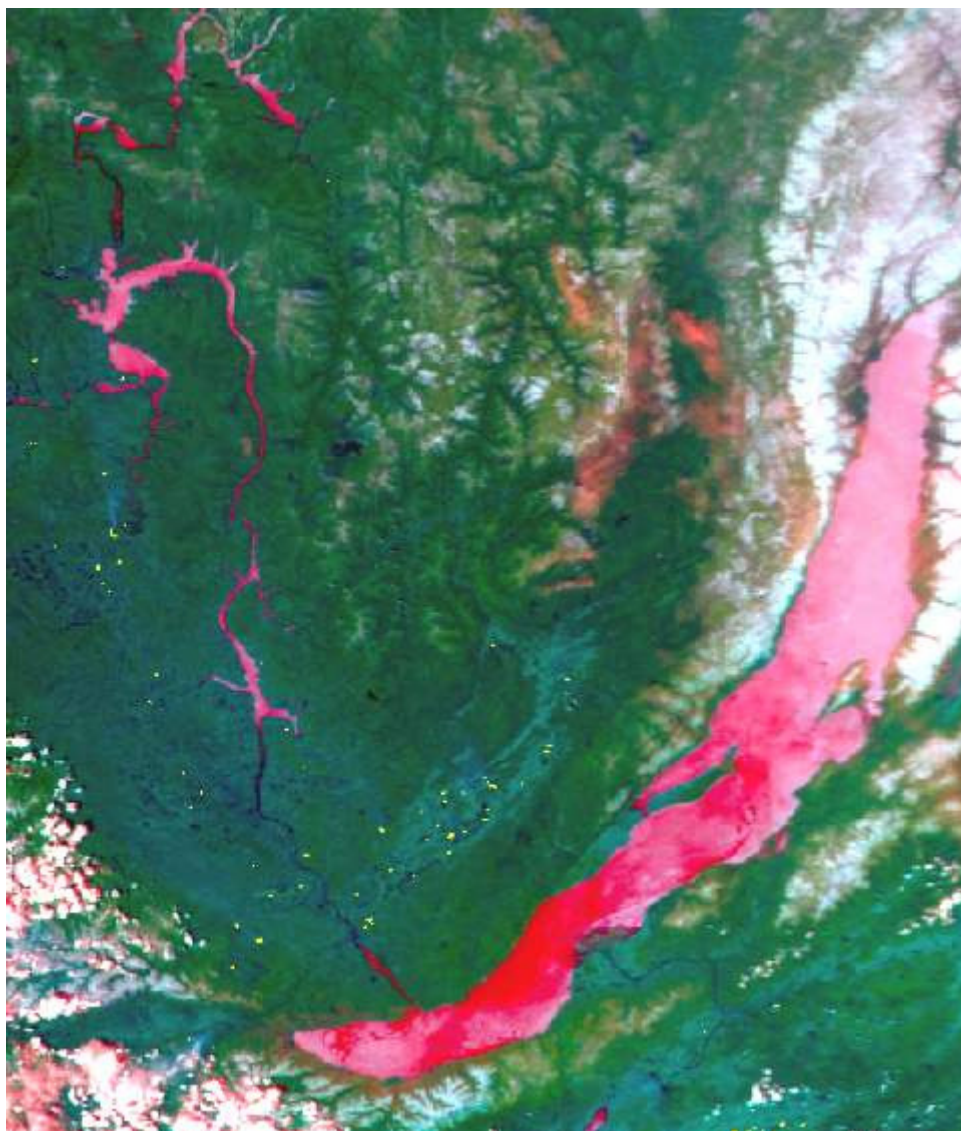


Рис. 2 – Применение вегетационного индекса при анализе лесопожарного состояния территории

Самым существенным недостатком сканера AVHRR является сравнительно большое мгновенное поле зрения и соответственно невысокое разрешение – 1,1x1,1 км, один пиксель вмещает изображение в 121 га при наблюдении в надир. Для наиболее успешного тушения ЛП необходимо оперативно обнаруживать пожары площадью не более 1 га. Опыт авиационной охраны лесов показывает, что средняя площадь обнаруживаемых с самолета пожаров составляет 3 – 5 га. Такие пожары ликвидируются десантом из 4-6 человек. Площадь свыше 25 га для одного и даже двух десантов считается критической, и пожары зачастую выходят из-под контроля.

Существующая методика мониторинга лесных пожаров позволяет обнаруживать с помощью сканера AVHRR пожары площадью

меньше 10 га. При малоразмерном пожаре в мгновенное поле зрения радиометра попадает как высокотемпературная зона лесного пожара, которая занимает некоторую долю p пикселя ($0 < p < 1$) и имеет температуру $T = 800$ К, так и «холодный» фон, который занимает остальную часть пикселя ($1 - p$) и имеет температуру T_ϕ .

Пусть f_3 – яркость некоторого пикселя в 3-м канале. При наличии малоразмерного пожара без учета влияния атмосферы

$$f_3 = pf_{3n} + (1 - p)f_{3\phi},$$

где f_{3n} – яркость от пожара, если бы он занимал весь пиксель, $f_{3\phi}$ – яркость от фона, если бы он занимал весь пиксель. По измеренному значению f_3 с использованием формулы Планка можно оценить эффективную температуру T_3 исследуемого пикселя. Наличие пожара вызывает увеличение T_3 .

На первом этапе обнаружения пожара значение T_3 сравнивается и порогом T_0 . Если $T_3 > T_0$, то возникает подозрение на наличие пожара в пределах этого пикселя. Обычно пороговое значение температуры $T_0 = 110 - 320$ К. Более точный подбор T_0 обусловлен временем наблюдения и погодой. Днем в ясную солнечную погоду порог устанавливается более высоким, чем вечером или ночью.

Однако обнаружение пожаров только по значению температуры в 3-м канале затруднено наличием засветок из-за отражения солнечного излучения от облачного покрова и водной поверхности. К тому же, высокое значение T_3 может быть вызвано, например, приемом излучения от нагретой солнцем поляны, полностью занимающей весь пиксель.

На втором этапе анализируются координаты пикселя. Если пиксель попадает на водохранилище, озеро, реку, то это действительно ложная засветка от водной поверхности. Для распознавания облаков используют 1-й и 2-й каналы сканера AVHRR.

На третьем этапе информация 4-го или 5-го канала позволяет отличить малоразмерный пожар от нагретой поляны или аналогичного объекта. Для пожаров с температурой $T_n = 800$ К разность температур 3-го и, например, 5-го каналов $I_n = T_3 - T_5$ будет больше такой же разности для нагретой поляны. Здесь учтено, что радиационная температура пикселя, вычисленная по яркости f_4 в 4-м или f_5 в 5-м канале, определяется, в основном, температурой фона T_ϕ , а излучение от пожара или отражение от облачного покрова не оказывают существенного влияния на f_4 и f_5 .

При наличии пожара I_n лежит в пределах 8 – 14 К. Величину I_n можно использовать как пожарный индекс, характеризующий интен-

сивность лесного пожара и зависящий от времени суток, погодных условий и времени года.

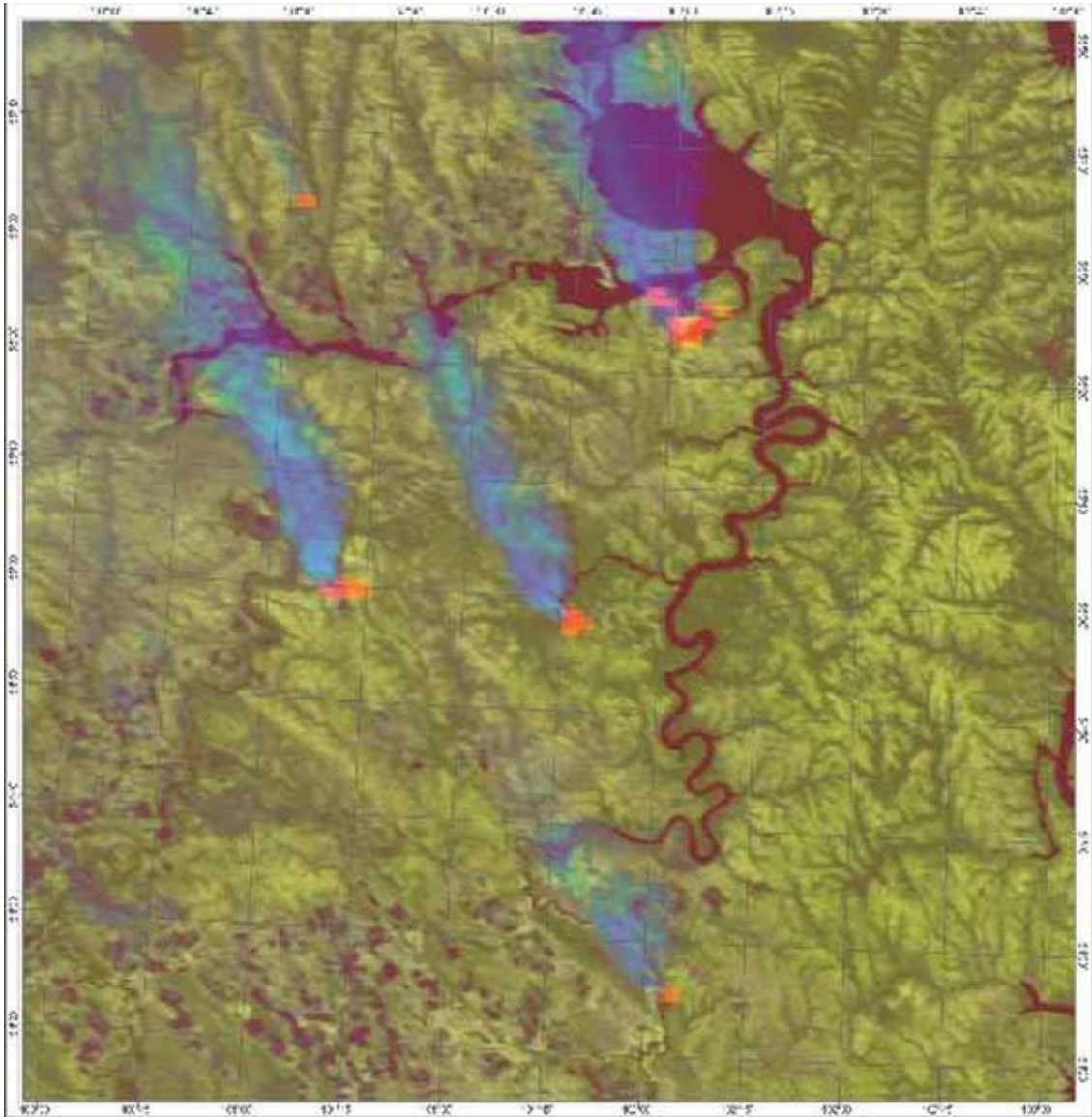


Рис. 3 – Цифровая карта лесных пожаров, составленная по результатам лесопожарного мониторинга КЛА

На последнем этапе уточняется площадь высокотемпературной зоны пожара. Соотношение для f_3 следует решать относительно p , так как f_{3n} можно заранее вычислить с помощью формулы излучения Планка при стандартной T_n . Яркость фона $f_{3\phi}$ можно оценить по интенсивности излучения от пикселей с низким значением T_3 . Из соотношения находим, что относительная площадь высокотемпературной зоны равна

$$p = (f_{3n} - f_{3\phi}) / (f_3 - f_{3\phi}),$$

а абсолютная площадь $S_n = pS$, где $S = 121$ га для спутника NOAA

при наблюдении в надир. Площади высокотемпературной зоны соседних пикселей суммируются.

Результаты обнаружения отображаются на карте в электронном виде (рис. 3), а в таблицу вносятся номер пожара, его географические координаты, субъект и район, в котором он обнаружен, ближайший населенный пункт, расстояние от него до очага пожара, направление от населенного пункта на очаг пожара, площадь пожара в пикселях и гектарах. Эти сведения по каналам связи немедленно передаются в органы МЧС и авиалесоохраны.

Выводы: метод позволяет обнаруживать пожары полностью в автоматическом режиме. Тестирование с использованием экспериментальных пожаров показало, что с помощью сканера AVHRR можно уверенно обнаруживать пожары площадью 6 га и более.

Послепожарная инвентаризация леса, т.е. оценка последствий лесных пожаров – один из главных компонентов мониторинга лесных пожаров, – представляет значительный интерес с точки зрения лесной экологии и углеродного баланса. Эта задача с использованием космической информации решается методами распознавания образов. Опыт показал, что при послепожарной инвентаризации лучшие результаты дает метод наращивания областей.

ЛИТЕРАТУРА

1 Акимов В.А., Новиков В.Д., Радаев Н.Н. Природные и техногенные чрезвычайные ситуации: опасности, угрозы, риски. – М.: «Деловой экспресс», 2001. – 304 с.

2 Морозов В.Н., Шахраманьян М.А. Прогнозирование и ликвидация последствий аварийных взрывов и землетрясений. – М.: УРСС, 1998. – 272 с.

3 Москвичев В.В., Лепихин А.М., Ноженкова Л.Ф. и др. Разработка ГИС „Безопасность региона”: вероятностные модели и экспертные системы для районирования территорий по риску воздействия чрезвычайных ситуаций // ВИНТИ. Пробл. безоп. при чрезв. ситуациях. – 2001. – вып. 6. – С. 53 – 61.

4 Шахраманьян М.А. Создание и внедрение высоких технологий предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций // ВИНТИ. Пробл. безоп. при чрезв. ситуациях. – 2003. – № 4. – С. 83 – 94.