

УДК630\*43(571.621)

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗА ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРАВЯНЫХ ПОЖАРОВ

В.А. Глаголев, Р.М. Коган

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН,  
ул. Шолом-Алейхема 4, г. Биробиджан, 679016,  
e-mail: glagolev-jar@yandex.ru, koganrm@mail.ru

*Для прогноза возникновения и распространения нелесных пожаров, особенно сельхозпалов, в южных регионах Дальнего Востока России разработан метод, основанный на авторской вероятностной модели прогноза возникновения и австралийской модели прогноза распространения нелесных пожаров МакАртура и спроектирована архитектура геоинформационной системы для его реализации.*

**Ключевые слова:** лесная пожарная опасность, геоинформационная система, пожары растительности.

Проблемы прогноза и контролирования пожаров растительности актуальны для лесных, например для бореальной зоны, и нелесных территорий, в первую очередь для степей и лесостепей. В странах со значительной лесистостью создаются национальные и региональные системы оценки фактической и прогнозируемой пожарной опасности. Анализ закономерностей возникновения и распространения травяных пожаров показывает предмет многолетних исследований в таких странах, как Австралия, где они являются одним из основных природно-антропогенных эколого-экономических рисков [16]. В России горение нелесной растительности может происходить не только в степной и лесостепной зонах, но и в лесной и лимитрофной (расположенных между ними) вследствие не только природных условий, но и антропогенных факторов, связанных в основном с контролируемыми и неконтролируемыми выжиганиями сухой травы, так называемыми сельхозпалами в осенний и весенний периоды. Трудоемкость мониторинга нелесного фонда и ликвидации действующих палов связана с тем, что эти территории не закреплены за федеральными противопожарными организациями и тушение пожаров перекладывается на муниципальные и частные структуры, несмотря на то, что палы наносят значительный ущерб растительным экосистемам, нередко становятся причинами возникновения лесных и торфяных пожаров и наносят материальный ущерб предприятиям и населению.

Отечественные и зарубежные системы прогноза возникновения и распространения пожаров основаны на использовании математических моделей аналитического типа или эксперименталь-

но-статистических математических моделей. В России представлены в основном модели для прогнозирования скорости распространения лесных пожаров, их периметра и площади, например [5, 6, 11, 13]. Наиболее известная модель распространения нелесных пожаров на лугах и пастбищах предложена МакАртуром на основе специальных таблиц природных условий юго-восточной Австралии [15]. Министерство природных ресурсов Канады использует систему моделирования и картографии пожаров Fire M3, которая предназначена для поиска активных пожаров растительности, оценки их площади и передачи данных в систему CWFIS [7]. Разработка и апробация системы прогноза распространения нелесных пожаров, которые являются причиной перехода огня на лесной фонд, на территории РФ не проводилась и в силу этого приобретает особую актуальность. Поэтому целью данного исследования является разработка метода оценки и прогноза вероятности возникновения травяных пожаров на примере муссонного климата средних широт (южная часть Дальневосточного федерального округа) и геоинформационной системы для мониторинга, предупреждения и минимизации последствий травяных пожаров, инициируемых сельхозпалами.

**Постановка проблемы**

Пожарная опасность горючих материалов на основе травяной растительности отличается от лесных главным образом тем, что их готовность к горению зависит в первую очередь от фенологической фазы развития растений, а только затем от запасов, плотности, энергоемкости и погодных условий.

Пожарная опасность определяется как свойствами самой травы (однолетняя, многолетняя, период вегетации, плотность проводников горения, степень высыхания, соотношение мертвой (ветошь) и вегетирующей травы), так и условиями погоды, в определенные периоды играющими решающую роль в инициировании и пространственно-временном развитии пожаров.

Травяные растения проходят следующие фенологические фазы: всходы, весеннее отрастание, кущение, образование укороченных побегов и розеток, ветвление, выход в трубку, колошение, бутонизация, цветение, плодоношение и отмирание побегов.

Наиболее пожароопасными являются фазы отмирания и переход растительности в состояние ветоши, которое заканчивается к началу зимнего периода, и период от отмирания побегов до появления всходов и весеннего отрастания. Остановимся на особенностях горения травяных материалов именно в эти периоды: по способности к воспламенению в этот временной интервал их можно отнести к проводникам горения, легко воспламеняющимся и быстрогорящим. При этом возрастает роль погодных условий, поскольку они влияют на степень высушивания вегетирующих растений, а также ветоши; горение травяных горючих материалов отличается от других природных пожаров скоростью распространения, большими размерами горельников, способностью изменять направление и преодолевать такие препятствия, как дороги, водотоки и противопожарные минерализованные полосы; трава как проводник горения быстрее, чем другая растительность, реагирует на изменение климатических, сезонных и ежедневных погодных условий; как особый вид топлива она более доступна для возгорания, чем горючие материалы, характерные для лесной, кустарниковой или смешанных типов растительности; травяная растительность быстро реагирует на изменение влажности воздуха в течение суток, так, очень сухая трава может поглощать влагу из воздуха в течение ночи и быстро терять ее рано утром в сухую и ветреную погоду, то есть находится в состоянии пожарной зрелости в течение всего дневного периода суток с максимумом в период самой высокой дневной температуры; наряду с традиционно учитываемыми для всех видов растительных горючих материалов погодными факторами – температура, влажность воздуха, количество осадков, их интенсивность, скорость ветра – влияние последнего многократно увеличивается. Ветер и особенно его порывы

могут изменять степень высыхания вследствие увеличения продуваемости травы, скорость и направление пожара, а также переход его из низового в верховой; идеальные условия для пожаров травы, наряду с сухой погодой, возникают на сухой почве, что определяет пролонгированность ее пожароопасного сезона по сравнению с другими видами растительности; особенности рельефа могут привести к проблемам предсказания поведения пожаров.

Перечисленные особенности травяных горючих материалов учтены при разработке методики оценки вероятности возникновения и распространения сельхозпалов на лесные территории в условиях муссонного климата средних широт.

#### **Метод расчета вероятности возникновения и распространения травяных пожаров**

Метод расчета включает следующие этапы:

- определение временных периодов проведения сельхозпалов;
- ежедневное определение степени высыхания травяных горючих материалов в периоды проведения сельхозпалов;
- расчет ежедневной пожарной опасности по условиям погоды и выделение дней, в которых возможно возникновение пожаров травы по метеорологическим условиям;
- расчет вероятности возникновения травяных пожаров по природным и антропогенным факторам;
- ежедневный расчет скорости распространения кромки травяных пожаров;
- расчет времени вероятного распространения травяного пожара до ближайшего участка леса.

Сезон травяных палов может быть определен по фактическим среднесезонным данным либо по периодам вегетации. Нами предложено использовать предвегетационный, вегетационный и поствегетационный периоды, которые совпадают с датами устойчивого перехода через пороговые температуры: 0, +5, +10, +15° С.

Для определения степени высыхания растительности в начале пред- и в конце поствегетационного периодов применяется допущение о том, что вся трава находится в состоянии ветоши, и в сухие дни (суточное количество осадков в предыдущий, текущий и последующий день лежит в интервале 0 – менее 3 мм) количество сухого углерода приближается к 100%. В остальное время для ежедневного определения состояния вегетации травы и степени ее высыхания предложено использовать величину вегетационного индекса

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный относительный индекс растительности, который вычисляется по формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1)$$

где  $NIR$  – отражение в ближней инфракрасной области спектра;  $RED$  – отражение в красной области спектра. Соответственно, плотность растительности (NDVI) в определенной точке изображения равна разнице интенсивностей отраженного света в красном и инфракрасном диапазоне, деленной на сумму их интенсивностей [17].

Расчет фактических ежедневных показателей климатической пожарной опасности проводится по методике В.Г. Нестерова [8], в которой учитываются основные факторы погоды, влияющие на степень высыхания растительности: температура воздуха и точки росы, количество осадков. Производится расчет метеорологического показателя ( $P_i$ ) по формуле:

$$P_i = \begin{cases} L_i(t_i, \tau_i), & \text{при } x_i > 3 \text{ мм/сут.} \\ L_i(t_i, \tau_i) + P_{i-1}, & \text{при } x_i \leq 3 \text{ мм/сут.} \end{cases}, \quad (2)$$

где  $t_i$ ,  $\tau_i$  – температура в 13–15 часов местного времени, °C;  $x_i$  – суточное количество осадков, мм/сут.;  $i$ ,  $i-1$  – индекс текущего и предыдущего дня.

Низший метеорологический порог возникновения пожаров растительности на каждой территории определяется эмпирическим путем. Например, для муссонных областей Дальнего Востока России он равен (или превышает) 300 единицам метеорологического показателя, поскольку при этих условиях возможно воспламенение растительности, относящейся к I классу пирологической опасности [10, 12].

Прогноз вероятности возникновения пожаров проводится по модифицированным детерминированно-вероятностным моделям А.И. Филькова и Н.В. Барановского [1, 14]:

$$F_{i,j}(B) = \begin{cases} F_{i,j}(C) [ (F_{i,j}(N)F_{i,j}(B/N) + \\ F_{i,j}(C) [ (F_{i,j}(D)F_{i,j}(B/D) + \\ + F_{i,j}(M)F_{i,j}(B/M) ] \text{ при } R_N \leq R_{кр} \\ + F_{i,j}(M)F_{i,j}(B/M) ] \text{ при } R_N > R_{кр} \end{cases}, \quad (3)$$

где  $i$  – день прогноза;  $j$  – номер операционно-территориальной единицы (ОТЕ);  $F_{i,j}(B)$  – вероят-

ность возникновения пожаров растительности;  $F_{i,j}(C)$  – вероятность возгорания растительности при определенном значении комплексного метеорологического показателя, которая определяется степенью пирологической опасности участков растительности по лесорастительным условиям;  $F_{i,j}(N)$ ,  $F_{i,j}(D)$  – вероятность появления антропогенного источника огня от ближайших населенных пунктов или железных и автомобильных дорог;  $F_{i,j}(B/N)$ ,  $F_{i,j}(B/D)$  – вероятность возгорания вследствие появления антропогенного источника огня;  $F_{i,j}(M)$  – вероятность появления природного источника (молний);  $F_{i,j}(B/M)$  – вероятность возгорания вследствие появления природного источника огня, молний;  $R_N$  – расстояние от ОТЕ до ближайшего населенного пункта. События  $N$ ,  $D$  и  $M$  образуют полную группу несовместных событий, которые рассчитываются по частотным характеристикам [3].

Вероятность  $F_{i,j}(C)$  горимости растительности в  $j$ -ом участке по погодным и лесорастительным условиям в  $i$ -ый день (событие  $C$ ) равна единице, если показатель  $P_i$  равен или превышает  $P_{кр}$ , либо вычисляется по формуле:

$$F_{i,j}(C) = \begin{cases} \frac{P_i}{P_{кр}}, & \text{при } P_i < P_{кр} \\ 1, & \text{при } P_i \geq P_{кр} \end{cases}, \quad (4)$$

где  $P_i$  – значение комплексного показателя в  $i$ -ый день,  $P_{кр}$  – минимальное значение комплексного показателя, при котором возможно появление пожаров на данном участке.

Для расчета скорости распространения травяного пожара ( $w$ , м/с) использован метод МакАртура (mk4) для луговых территорий [16]:

$$w = 0.26e^{5.011g(c+0.001)-23.6+0.028t-0.226\sqrt{rh}+0.633\sqrt{v}}, \quad (5)$$

где  $rh$  (relative humidity), % – относительная влажность воздуха;  $c$ , % – содержание сухой травы,  $v$  – скорость ветра, м/с.

Влажность воздуха  $rh$  рассчитывается по температуре воздуха и точки росы:

$$rh_i = 0.01e^{\frac{\tau_i a - \tau_i t_i a - b a t_i}{b + t_i} - \frac{1}{b + t_i} + \frac{1}{b + \tau_i}}, \quad (6)$$

где  $a$ ,  $b$  – константы, равные 17,27 и 237,7 соответственно.

Расчет времени «добегания» травяного пожара до ближайшей лесной территории определя-

ется исходя из скорости распространения горения и расстояния до леса.

### Геоинформационная система прогноза возникновения и распространения травяных пожаров

Проектируемая система состоит из пяти блоков: сбор и обработка первичных данных наземного и дистанционного мониторинга (I); хранение фактических, прогнозных и расчетных данных (II); определение пожароопасности нелесных участков растительности (III); расчет скорости и площади распространения травяных пожаров (IV); регламентация лесоохранных мероприятий для федеральных, муниципальных и частных организаций (V) (рис. 1).

#### Блок I. «Сбор и обработка первичных данных наземного и дистанционного мониторинга»

При выполнении пространственных прогнозов возникновения травяных пожаров и скорости их распространения необходимы ежедневные фактические и прогнозные данные гидрометеостанций, данные о пожарах нелесной растительности, а также сведения о состоянии растительности в различные временные периоды и местоположении антропогенных источников огня.

Метеорологические данные представляют Интернет-службы: ГУ Гидрометцентр РФ (<http://meteoinfo.ru>); ИКИ РАН (<http://meteo.infospace.ru>); Научно-производственный центр «Мэп-Мейкер» (<http://gismeteo.ru>). Метеорологические элементы включают ежесуточные измерения дневной температуры воздуха и температуры точки росы, направления и скорости ветра в 13–15 часов дня, суточного объема осадков с 9 часов предыдущего дня до 9 часов дня текущего дня, а также прогнозы погоды общего пользования с заблаговременность до 3 суток.

Информация о местоположении пожаров растительности и ее состоянии («зелености») может быть получена по спутниковым снимкам с космического аппарата TERRA, передающего MODIS информацию в 36-ти спектральных каналах с разрешением 250, 500, 1000 м на пиксель. Снимки находятся в общем доступе на сайте NASA <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov>. Для распознавания снимков используется алгоритм, разработанный NASA, под названием MODIS – MOD14 (Thermal Anomalies – Fires and Biomass Burning). Российский аналог сайта представлен на сайте ИСДМ-Рослесхоз (<http://aviales.ru>), на котором

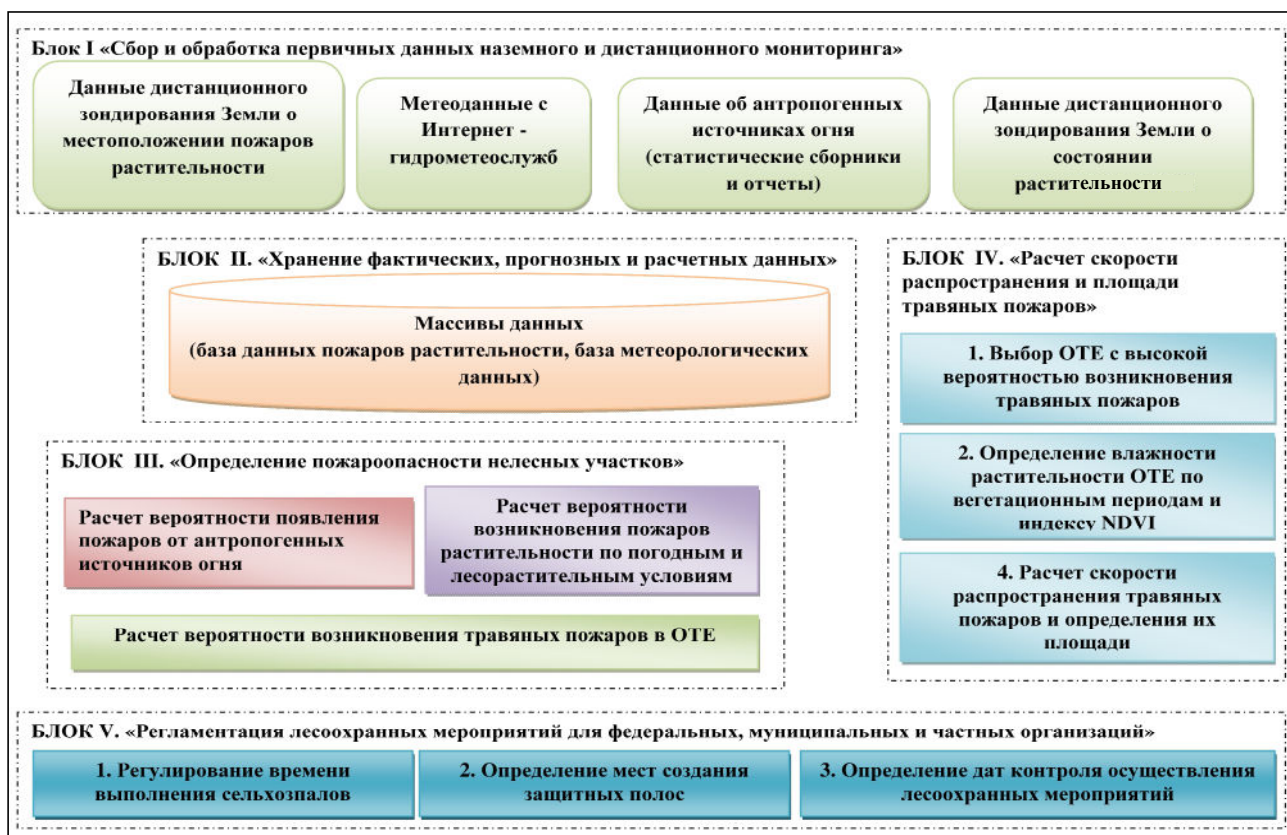


Рис. 1. Архитектура ГИС прогноза возникновения и распространения травяных пожаров

Fig. 1. Architecture of the GIS for the forecast of vegetation fires occurrence and distribution

размещены данные спутникового мониторинга пожаров растительности на всей территории РФ.

Данные снимков, полученные в красном (620–670 нм) и ближнем инфракрасном (841–876 нм) каналах (продукт MOD09GQK), позволяют рассчитать вегетационный индекс NDVI, представляющий собой количественный показатель фотосинтетически активной биомассы. Расчет NDVI базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках спектральной кривой отражения сосудистых растений. В красной области спектра лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной области находится область максимального отражения клеточных структур листовой пластины. Для корректировки значений данного индекса в случае фиксации территорий, покрытых облаками и тенями от облаков, предлагается использовать спутниковую информацию 1-6 каналов данного аппарата [6]. Обработка многоканальных снимков производится с помощью ГИС GRASS 6.0 и ENVI 4.8, в которых осуществляется расчет индекса и конвертация из формата HDF в формат GeoTIFF.

Сведения об антропогенных объектах включают данные о местоположении населенных пунктов (количество проживающих жителей), размещении автомобильных, железнодорожных, охотничьих и туристических маршрутов, которые возможно получить, используя статистические сборники (федеральные отчеты транспортной доступности субъектов РФ).

### **Блок II. «Хранение фактических, прогнозных и расчетных данных»**

Для хранения массива данных ГИС (блок № II) в системе используются авторские базы метеорологических данных (БМД) и сведений о лесных и нелесных пожарах растительности (БДПР), созданные в реляционной СУБД MySQL 5 и ГИС MapInfo Professional 8.5. Более подробно структура и реализация БМД представлена в работе [2].

Особенностью реализации БДПР является учет местоположения пожаров растительности по указанию номеров ОТЕ или координат центра горельника. Для идентификации ОТЕ используется нерегулярная сеть, содержащая кварталы участковых лесничеств лесного фонда, и регулярная сеть с заданным размером, наложенная на территорию нелесного фонда (0,25x0,25 км либо 2,5x2,5 км). Состояние растительных горючих материалов в ОТЕ фиксируется таблицей «NDVI», содержащей значения индекса NDVI в каждом пикселе спутникового снимка на каждый день пожароопасного

сезона.

В силу того, что нелесные пожары фиксируются только по данным дистанционного зондирования Земли, для их отнесения к нелесной территории можно воспользоваться соотношением площади нелесной и лесной части горельника, при этом нелесная площадь должна преобладать над лесной в пределах 70–100%. Для указания местоположения пожара растительности производится декомпозиция горельника в совокупность номеров ОТЕ.

На рис. 2 представлена логическая структура базы данных растительности (БДПР), в которой каждая таблица присоединена к одноименному векторному слою ГИС. В центре логической структуры находится таблица «ОТЕ». Местоположение пожара указывается с помощью атрибутов *долгота* и *широта*, либо атрибута *idOTE*, который может принимать одно или более значений, разделенных запятой.

Пространственные данные векторных слоев связаны «один-к-одному» с атрибутивной информацией посредством географического ключа *map-info\_id* инструментальной ГИС.

### **БЛОК III. «Определение пожароопасности нелесных участков»**

Алгоритм определения пожароопасности нелесных пожаров основан на авторской модели прогноза возникновения пожаров растительности по природно-антропогенным условиям (формула № 3). В данной модели появление пожаров зависит от наличия двух совместных событий: погодных условий, способствующих высушиванию РГМ, и присутствия источника огня природного (сухих гроз) и антропогенного происхождения на участках растительности (ОТЕ) от жителей населенных пунктов или прибывших по дорожной сети. Степень природной пирологической пожарной опасности растительности в ОТЕ в определенный период пожароопасного сезона определяется по восстановленным значениям комплексного метеорологического показателя. Для этого используется массив ежедневных метеоданных и синоптических прогнозов ГМС: сведения о дневной температуре воздуха  $t$ , °С и точки росы  $\tau$ , °С, направлении и скорости ветра  $v$ , м/с, суточном объеме осадков  $x$ , мм/сут, и их интенсивности *int*.

### **БЛОК IV. «Расчет скорости и площади распространения травяных пожаров»**

Проводится по формуле № 5. Содержание сухой травы ( $c$ ) на участках нелесного фонда принимаем за 100% (в период устойчивого перехода температуры) – от 0 до +5° С [4]. В другие пери-

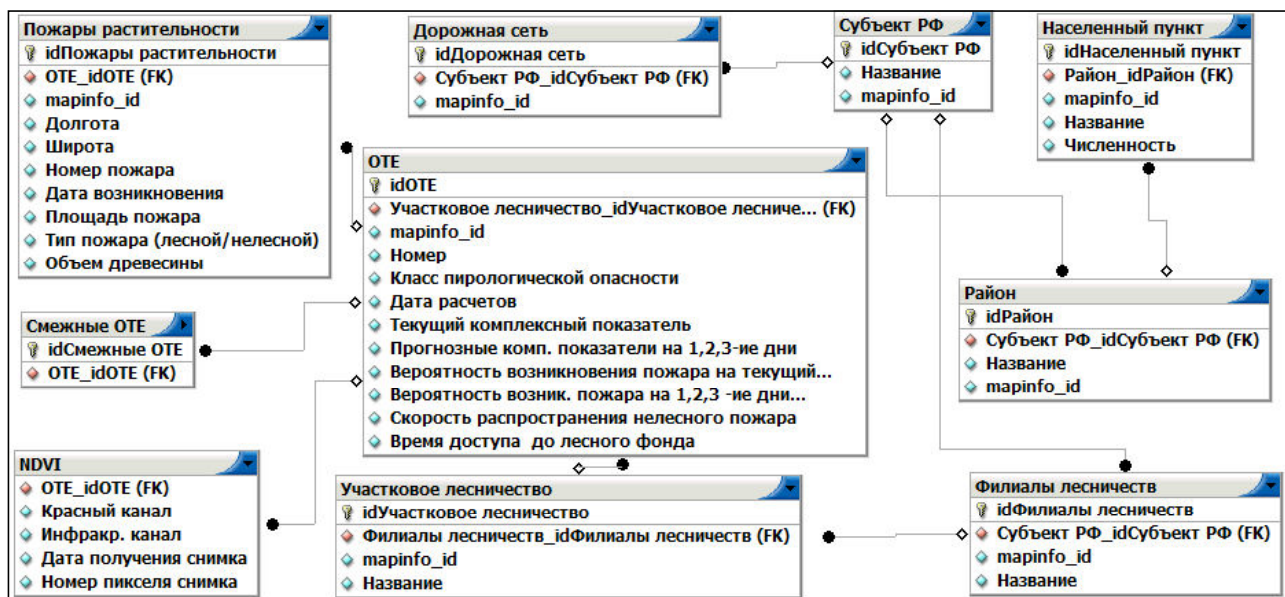


Рис. 2. Логическая структура базы данных пожаров растительности  
*Примечание:* ОТЕ – операционно-территориальная единица (участок растительности)

Fig. 2. Logical structure of the vegetation fires database

оды содержание сухой травы в ОТЕ определяется по значениям индекса NDVI, который рассчитывается в пикселе спутникового снимка по формуле № 1. Благодаря особенностям отражения в данных областях спектра, природные объекты, не связанные с растительностью, имеют фиксированные значения: -0,5 – искусственные материалы (бетон, асфальт); -0,25 – вода; -0,05 – снег и лед; 0 – облака; 0,025 – открытая почва; от 0,5 до 0,7 – разреженная растительность; от 0,7 до 1 – густая растительность. В случае, если ОТЕ содержит пиксели со значениями от 0,5 до 0,7, то  $c$  равно 50%; от 0,7 до 1 – 0%.

#### БЛОК V. «Регламентация лесоохранных мероприятий»

В данном блоке реализуются противопожарные рекомендации и мероприятия в виде электронных отчетов (документ, таблицы, карты), управляемых муниципальным и частным организациями:

- определение нелесных участков с высокой пожароопасностью (с высокой вероятностью возникновения пожаров – от 0,5 до 1);
- выявление дат с высокой пожарной опасностью, во время которых в определенных ОТЕ наблюдается наибольшая вероятность возникновения нелесных пожаров;
- определение времени вероятного распространения травяного пожара до границ лесного

фонда и мест создания защитных полос вдоль лесного фонда.

Таким образом, предложенная геоинформационная система прогноза возникновения и распространения травяных пожаров имеет практическую значимость и может быть дополнительно использована для разработки противопожарных рекомендаций и мероприятий на территории субъектов РФ.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Барановский Н.В. Математическое моделирование наиболее вероятностных сценариев и условий возникновения лесных пожаров: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2007. 19 с.
2. Глаголев В.А. Создание баз данных для оценки и прогноза пожарной опасности растительности по природно-антропогенным условиям // Региональные проблемы. 2014. Т. 17, № 2. С. 78–83.
3. Глаголев В.2., Коган Р.М. Система пожарного мониторинга лесных участков Еврейской автономной области // Технологии техносферной безопасности: научный интернет-журнал. 2015. Вып. 5 (63). С. 1–9. URL: <http://ipb.mos.ru/ttb/2015-5/2015-5.html> (дата обращения: 15.04.2016).
4. Григорьева Е.А. Феноклиматические исследования в заповеднике «Бастак» // Проблемы ре-

- гиональной экологии. 2009. № 6. С. 184–189.
5. Гришин А.М. Физика лесных пожаров. Томск: Томский университет, 1994. 218 с.
  6. Доррер Г.А. Динамика лесных пожаров. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 404 с.
  7. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. Новосибирск: СО РАН, 2009. 301 с.
  8. Нестеров В.Г., Гриценко М.В., Шабунина Т.А. Использование температуры точки росы при расчете показателя горимости леса // Гидрология и метеорология. 1968. № 9. С. 102–104.
  9. Пугачева И.Ю., Шевырногов А.П. Изучение динамики NDVI посевов сельскохозяйственных культур на территории Красноярского края и Республики Хакасия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5, № 2. С. 347–351.
  10. Современное состояние лесов российского Дальнего Востока и перспективы их использования. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 2009. 470 с.
  11. Софронов М.А., Волокитина А.В., Софронова Т.М. Пожароуправление: учеб. пособие для студентов специальности 260400 всех форм обучения. Красноярск: СибГТУ, 2005. 144 с.
  12. Стародумов А.М. Шкала пожарной опасности погоды для условий Хабаровского края, Приморья и Амурской области // Сборник трудов ДальНИИЛХ. 1964. № 6. С. 176–185.
  13. Телицын Г.П., Карпов А.И., Попович С.В. Программный комплекс для моделирования процессов распространения и тушения лесных пожаров // Охрана лесов от пожаров в современных условиях: материалы междунауч.-практич. конф. Хабаровск, 27–29 марта 2002 г. Хабаровск: Изд-во ДальНИИЛХ, 2002. С. 151–153.
  14. Фильков А.И. Детерминированно-вероятностная система прогноза лесной пожарной опасности: автореферат дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2005. 24 с.
  15. Ходаков В.Е., Жарикова М.В. Лесные пожары: методы исследования. Херсон: Гринь Д.С., 2011. 410 с.
  16. McArthur A.G. Weather and grassland fire behavior // Leaflet 100. Forestry and Timber Bureau. Commonwealth of Australia, 1966.
  17. Verhulst N., Govaerts B. The normalized difference vegetation index (NDVI) GreenSeeker™ handheld sensor: Toward the integrated evaluation of crop management. Part A: Concepts and case studies. 2010. Mexico, D.F.; CIMMYT. 14 p.

*To predict the emergence and spread of non-forest fires, especially of agricultural fires, in the southern regions of the Russian Far East, it is developed the method, based on the author's probability model of fires occurrence, and on the Australian model of forest fires spread and prediction by MacArthur. To implement the method, the authors have designed the architecture of geographic information system.*

**Keywords:** forest fire danger, geographic information system, vegetation fires.