

ISSN 2077-6810

ПЕРСПЕКТИВЫ НАУКИ

SCIENCE PROSPECTS

№4(67) 2015



МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОЖАРОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

П.С. ТИТАЕВ

ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет», г. Тверь

Ключевые слова и фразы: геоинформационные системы; дистанционное спутниковое зондирование; методика комплексного прогнозирования пожаров; оценка рисков пожаров.

Аннотация: В статье предложен подход к оценке рисков пожаров, который позволяет в рамках единой методологии учитывать влияние различных компонентов, таких как традиционные факторы, вызывающие чрезвычайные ситуации в регионе, долгосрочные изменения климата и окружающей среды, изменения метеорологических показателей, региональные изменения экосистем и природопользования (что отражается в частности на динамике природного горючего).

Развитие современных знаний о функционировании наземных систем, новые оценки относительно хода и направления изменений окружающей среды и климата, появление новых данных и способов их обработки позволяют разработать новые прикладные подходы оценки рисков и прогнозирования, связанные с отдельными опасными явлениями, которые в полной мере соответствовали бы целям обеспечения устойчивого развития и безопасности общества [10]. Учитывая высокую неопределенность экологических моделей и их чувствительность к входным данным [6], можно предположить, что использование новейших методов мониторинга сможет обеспечить необходимый прогресс в области определения соответствующих рисков. Поэтому предложенный подход должен быть ориентирован на использование данных, обеспечивающих наилучшие возможности для мониторинга.

Несмотря на большое количество работ, посвященных мониторингу пожаров спутниковыми средствами [8], проблема адекватной оценки интегральных рисков пожаров, включая социальные, экологические, экономические последствия в средне- и долгосрочной перспективе остается нерешенной. Успешно решенной пока можно считать лишь задачу детектирования пожаров и посткризисный мониторинг (оценка площадей пострадавших территорий, распределение загрязнений и т.п.) [5]. Мы попытаемся показать возможность получения количественных характеристик рисков на основе моделей природных систем и сценариев угрожающих явлений с учетом прогнозируемых изменений климата, используя спутниковые наблюдения Земли и полигонные исследования.

Методические основы оценки рисков пожаров. Оценка комплексного риска является сложной задачей, так как не требует учета долгосрочных тенденций изменений и учета недостаточно изученных взаимосвязей компонентов экосистемы [20].

В общем случае для определения риска пожара можно предложить уравнения в виде [18].

$$R(t) = f_A(R^L(t), R_0(t)) \iint_{xy} p(v) f(x, y, v) dt dx dy,$$

где $f_A(R^L(t), R_0(t))$ – аппроксимационная функция влияния, описывающая относительное взаимодействие краткосрочных и долговременных факторов влияния на формирование пожарной опасности, она может быть представлена в зависимости от модели в любом виде; v – эффективная

скорость распространения пожара; $p(v)$ – вероятность негативного воздействия в условиях наступления определенных условий; $R_0(t)$ – общая (средняя) вероятность события; $R^L(t)$ – риск наступления события, связанный с эскалацией долгосрочных изменений среды; $f(x, y, v)$ – функция распространения опасного процесса.

Определение составляющих приведенного уравнения является основной задачей исследования.

Согласно данным [20], общая вероятность события определяется уравнением по формуле [12]:

$$R_0(t) = H \cdot \iint_{S_{x,y}} \int_0^{I_{\max}} f_v(I) \cdot \psi(x, y) f_\alpha(I, \psi) dIdtdxdy,$$

где $S_{x,y}$ – территория исследования; $\psi(x, y)$ – участок, по которому проводится моделирование; I – интенсивность пожара, $f^u(\psi, I)$ – вероятностное распределение воздействий в пределах участка $\psi(x, y)$; $f_v(I)$ – функция ущерба, параметрическое описание негативного воздействия; H – функция риска, которая определяется по статистике чрезвычайных ситуаций в регионе.

В общем случае для описания долгосрочного риска можно использовать формулу, которая учитывает распределение важных факторов воздействия [18] и в целом соответствует общему подходу оценки социально-экологических рисков [2]:

$$R^L(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J P_n(t, Q_n) P\left(\frac{Q_n}{Q_j}\right) F(Q_j)$$

Здесь Q_j ($j = 1, 2, \dots, J$) – известные (рассчитанные в соответствии с прогнозным моделям) факторы влияния, связанные с долгосрочными экологическими и климатическими изменениями; $F(Q_j)$ – прогнозированное (рассчитанное по сценарным моделям) распределение частоты и интенсивности долгосрочных воздействий.

Это уравнение описывает риск наступления последствий, которые можно интерпретировать как негативные (например, снижение биологической продуктивности экосистем, засухи и т.д.) при известных распределениях долгосрочных экологических и климатических изменений [16].

Использование этого уравнения требует наличия корректных данных об изменениях климатических показателей в исследуемом регионе и прогнозов по их изменениям с определенной достоверностью.

Главным результатом математического моделирования лесных пожаров является определение предельных условий распространения лесных пожаров, при которых процесс горения прекращается.

Разработанные к настоящему времени математические модели и использование методов дистанционного спутникового зондирования позволяют создать эффективный многоступенчатый алгоритм выявления очагов возгораний.

Применение многоспектрального космического сканирования имеет ряд преимуществ перед другими методами дистанционного зондирования. Одним из них является возможность периодического получения космического изображения. Это дает основания для изучения пространственно-временной динамики распространения лесных пожаров.

Одним из основных результатов в области применения данных дистанционного спутникового зондирования для оперативного мониторинга лесных пожаров является создание многоступенчатого алгоритма выявления очагов возгораний, позволяющего надежно регистрировать пожар на площади 0,2–0,3 га, то есть в начальной стадии развития.

Возможность определения площадей, выгоревших во время действия крупных лесных пожаров, позволяет проводить инвентаризацию послепожарного состояния лесов.

На основе данных геоинформационных систем возможен прогноз поведения пожаров и их последствий, в свою очередь это позволяет осуществить планирование мероприятий в рамках опре-

деленных территорий и периодов лесопожарного сезона по предупреждению возгорания лесных участков и устраниению последствий пожаров.

Современные комплексы принимают информацию из спутниковых систем, одной из которых является американская спутниковая система *NOAA*, имеющая среднее пространственное разрешение 1 км и обладает высокой оперативностью – съемка проводится 4–6 раз в сутки. Используются данные пятиканальных радиометров типа *AVHRR* в сочетании с пороговыми алгоритмами обнаружения очагов, которые основаны на применении совокупности фиксированных пороговых значений в измеряемых характеристиках интенсивности восходящего излучения.

Основными информативными признаками здесь являются радиационная температура (T_3) в третьем канале и разница температур ($T_3 - T_4$) третьего и четвертого каналов. Другие комбинации измеряемых характеристик обычно используют для контроля облачности и простейшего учета вариаций воздействия атмосферы. Очевидно, что точность работы таких пороговых алгоритмов зависит от вариаций оптико-геометрических условий наблюдений:

- а) молекулярных, аэрозольных и облачных оптических характеристик;
- б) изменений оптических параметров трассы наблюдения за счет угла визирования оси прибора;
- в) геометрических параметров положения Солнца.

Система спутникового мониторинга лесных пожаров работает в автоматическом режиме, что позволяет круглосуточно в течение пожароопасного периода вести прием и обработку информации с целью обнаружения лесных пожаров.

К основным проблемам применения данного класса систем относятся:

- повышение точности обнаружения очага пожара;
- сокращения ложных уведомлений;
- выявление различных типов возгорания;
- разработка общей математической модели лесных пожаров, которая позволит усовершенствовать методику прогноза лесной пожарной опасности, так как с помощью этой модели можно учесть такие существенные факторы, как влияние излучения Солнца, тип почвы и

тип растительности на сушку слоя лесных горючих материалов.

Кроме того, в рамках этой модели можно определить поля плотности излучения над очагом лесного пожара в разные моменты времени, что в принципе позволяет создать новую методику обнаружения и диагностики лесных пожаров по данным аэрокосмического мониторинга.

Сегодня развиваются более современные технологии и методы, например, многоспектральное космическое сканирование высокого разрешения и его интерпретация в географической информационной системе.

Использование многоспектральных изображений позволяет повысить эффективность распознавания и классификации объектов. Однако при достаточно высоком спектральном разрешении возникает проблема, связанная с необходимостью обработки признаков (спектральных сигнатур) в пространствах высокой размерности.

Решение этой проблемы заключается в том, что целесообразно сначала снизить размерность пространства и уже в новом пространстве выполнить распознавание. Суть другого подхода к решению задачи классификации изображений многоспектральных космических снимков заключается в том, что для каждого очередного объекта, который классифицируется, используется столько спектральных каналов, сколько необходимо, чтобы удовлетворить условия достоверности его классификации. Для этого на этапе обучения оценивается информативность каждого спектрального канала по заданному множеству объектов различных классов и осуществляется ранжирование спектральных каналов по величине информативности. При выполнении процедуры классификации объекта сначала задействуется наиболее информативный канал, далее, при необходимости, подключается информация следующего – по величине информативности спектрального канала и др.

Использование многоспектральных изображений для изучения космических снимков базируется на анализе вариаций параметров отраженного солнечного излучения в различных диапазонах спектра электромагнитных волн в результате его взаимодействия с растениями [1]. Спектры отражения в различных спектральных диапазонах представляют принципиально раз-

личную информацию о растительности, поэтому целесообразно их совместное использование для исследования состояния растительных покровов Земли и их классификации. С этой точки зрения желательно увеличение количества рабочих спектральных диапазонов. И действительно, количество рабочих спектральных диапазонов в современных иконических системах космического дистанционного зондирования Земли исчисляется десятками и даже сотнями. Однако при этом возникает ряд проблем, среди которых наиболее актуальными являются такие, как отобрать наиболее полезные (наиболее информативные) спектральные каналы и каким образом переработать с минимумом ошибок огромные массивы иконической информации.

Существует множество различных подходов к оценке информативности спектральных каналов иконических средств дистанционного зондирования Земли [2], но преобладает прагматичный подход, согласно которому канал считается тем информативнее, чем больше информации, которую он предоставляет, способствует решению поставленной конкретной тематической задачи. Для обработки огромных массивов иконической информации (изображений) в последнее время привлекают специальные прикладные программы, среди которых наиболее известные программные системы *ERDAS Imagine*, *PCI Geomatic*, *ErMapper*. Многие задачи обработки изображений, визуализации данных и создания тематических карт решают с помощью использования геоинформационных систем *ArcView*, *MapInfo*, *SPANS MAP* [3; 4].

Опыт показывает, что вышеназванные и другие подобные прикладные программные системы предоставляют уникальные возможности для работы с данными дистанционного зондирования Земли как при проведении научных исследований, так и при решении широкой гаммы практических задач. Но вместе с тем существуют некоторые ограничения. Во-первых, каждая такая прикладная программная система является высокотехнологичным продуктом, полноценное использование которого невозможно без наличия мощной аппаратной (технической) базы и высокой квалификации пользователя [5]. Во-вторых, широкому распространению таких высокотехнологических продуктов мешает их соответственно высокая цена. Поэтому ак-

туальной остается проблема создания специализированных алгоритмов и программ, ориентированных на решение тематических задач, что может быть реальным на компьютерах типовой конфигурации, и работа с которыми требует минимальной компьютерной подготовленности оператора. Подход к решению одной из таких задач, а именно к классификации состояния лесных ресурсов по многоспектральным космическим изображениям в своей теоретической части базируется на синергетической концепции слияния данных, а его программная реализация предусматривает использование элементов ГИС-технологий [6].

Основные ограничения на повышение качества распознания изображений накладывает бортовая аппаратура реестрации изображений. Сюда относится, прежде всего, оптическая разделятельность, определяемая соотношением рабочей длины волны к размеру регистрирующей аппаратуры объектива, а также степень усреднения изображений и шаг дискредитации перед их передачей на Землю искусственными спутниками. Другие ограничения связаны с геометрическими искажениями [7].

Повышение разделятельной способности решает две взаимосвязанные задачи: улучшение визуального качества и реконструкция изображений. Решению первой задачи служит метод фрагментации и зонирование изображений, решению второй – метод деконволюции [8; 9].

Сочетание зональной обработки изображений и их реконструкции позволяет подойти к решению задач прогноза развития пожаров и выбора методов тушения. При этом целесообразно использовать современные геоинформационные технологии и оболочки документирования результатов мониторинга лесных пожаров и принятия своевременных решений по борьбе с лесными пожарами.

Таким образом, совокупность приведенных индикаторов, основ космического дистанционного зондирования и методов определения модельных переменных должны быть использованы для построения комплексной методики оценки разновременных (включая долгосрочные) региональных рисков пожаров. При этом ведущая роль исследований в первую очередь принадлежит спектральным характеристикам типовых наземных объектов, необходимых для корректной верификации моделей и калибровки данных спутниковых наблюдений.

Для дальнейших исследований по прогнозированию пожаров на основе данных спутникового зондирования важнейшим вопросом остается проблема определения в явном виде вероятности негативного воздействия в условиях наступления определенных факторов и функций распространения процесса пожара.

Вероятность реализации негативного воздействия для обычной ситуации в условиях наступления определенных факторов в случае пожара может быть определена через вероятность реализации соответственных погодных условий, способствующих возникновению и распространению пожара.

Литература

1. Алымов, В.Т. Техногенные риски: анализ и оценка / В.Т. Алымов, Н.П. Тарасова. – М. : Академкнига, 2013. – 118 с.
2. Елохина, А.Н. Методология комплексной оценки природных и техногенных рисков для населения регионов России / А.Н. Елохина, А.В. Бодриков, С.В. Ульянов // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. – 2012. – № 3. – С. 3–10.
3. Лисиченко, Г.В. Природные, техногенные и экологические риски: анализ, оценка, управление / Г.В. Лисиченко, Ю.Л. Забулонов, Г.А. Хмель. – Киев : Наук. мнение, 2013. – 542 с.
4. Перри, С.Г. Модель диффузии EPA для сложного рельефа: структура и характеристики / С.Г. Перри // Междунар. конф. ВМО по моделированию загрязнения атмосферы и его применение. – Л. : Гидрометеоиздат, 2011. – С. 14–15.
5. Портер, У. Современные основания общей теории систем / У. Портер. – М. : Наука, 2012. – 556 с.
6. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М. : Гостехиздат, 1953. – 314 с.
7. Космическая наука и технология. – 2011. – Т. 17. – № 6.
8. Титаев, П.С. Пути совершенствования информационной системы мониторинга пожароопасной ситуации в Тверской области / П.С. Титаев // Наука и бизнес: пути развития. – М. : ТМБпринт. – 2014. – № 3(33).
9. Albini, F.A. Estimating wildfire behavior and effects / F.A. Albini // Gen. Tech. Rep. INT-30. – Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. – 2012.
10. Anthes, R.A. Description of the Penn State / R.A. Anthes, E.Y. Hsie, Y.H. Kuo // NCAR Mesoscale Model Version 4 (MM4); NCAR Techn. Note. Boulder, CO: Natl Cent. For Atmos. Res. NCAR / TN-282 + STR, 1987. – 70 p.
11. Balbi, J.H. Dynamic modeling of fire spread across a fuel bed / J.H. Balbi, P.A. Santoni, J.L. Dupuy // Int. J. Wildland Fire. – 2008. – Vol. 9. – № 4. – P. 275–284.
12. Bartell, S.M. Ecological risk estimation / S.M. Bartell, R.H. Gardner, R.V. O'Neill. – Boca Raton, FL: Lewis Publs, 1992.
13. Ceccato, P. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain / P. Ceccato, S. Flasse, S. Tarantola, et al. // Remote Sens. Environ. – 2001. – Vol. 77. – P. 22–33.
14. Climate Change 2001. The scientific basis // Report of the intergovernmental panel on climate change. – Cambridge : Univ. Press, 2001. – 83 p.
15. Daughtry, C.S.T. Assessing crop residue cover using shortwave infrared reflectance / C.S.T. Daughtry, E.R. Hunt Jr., J.E. McMurtrey III // Remote Sens. Environ. – 2004. – Vol. 90. – P. 126–134.
16. Devore, J.L. Probability and statistics for engineering and the sciences / J.L. Devore. – Monterrey : Brooks & Cole Publ., 1987. – 672 p.
17. Dozier, J. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution / J. Dozier // Remote Sens. Environ. – 1981. – Vol. 11. – P. 221–229.
18. Wang, L. NMDI: a normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing / L. Wang, J.J. Qu // Geophys. Res. Lett. – 2009. – L20405. – 34 p.
19. Wang, P.K.G. Control of distributed parameter systems / P.K.G. Wang // Advances in Control Systems. – New York : Academ. Press, 1964. – Vol. I. – 216 p.

20. Weaver, J. Fire detection using GOES rapid scan imagery / J. Weaver, D. Lindsey, D. Bikos // Weather and Forecasting. – 2013. – Vol. 19. – P. 496–510.
21. Wu, Y. Fire simulations in the everglades landscape using parallel programming / Y. Wu, F.H. Sklar, K. Gopu, K. Rutcher // Ecol. Model. – 2013. – Vol. 93. – P. 113–124.

References

1. Alymov, V.T. Tehnogennye riski: analiz i ocenka / V.T. Alymov, N.P. Tarasova. – M. : Akademkniga, 2013. – 118 s.
2. Elochina, A.N. Metodologija kompleksnoj ocenki prirodnyh i tehnogennyh riskov dlja naselenija regionov Rossii / A.N. Elochina, A.V. Bodrikov, S.V. Ul'janov // Problemy bezopasnosti pri chrezvychajnyh situacijah. – 2012. – № 3. – S. 3–10.
3. Lisichenko, G.V. Prirodnye, tehnogennye i jekologicheskie riski: analiz, ocenka, upravlenija / G.V. Lisichenko, Ju.L. Zabulonov, G.A. Hmel'. – Kiev : Nauk. mnenie, 2013. – 542 s.
4. Perri, S.G. Model' diffuzii EPA dlja slozhnogo rel'efa: struktura i harakteristiki / S.G. Perri // Mezhdunar. konf. VMO po modelirovaniyu zagraznenija atmosfery i ego primenenie. – L. : Gidrometeoizdat, 2011. – S. 14–15.
5. Porter, U. Sovremennye osnovaniya obshhej teorii sistem / U. Porter. – M. : Nauka, 2012. – 556 s.
6. Tihonov, A.N. Uravnenija matematicheskoy fiziki / A.N. Tihonov, A.A. Samarskij. – M. : Gostehizdat, 1953. – 314 s.
7. Kosmicheskaja nauka i tehnologija. – 2011. – T. 17. – № 6.
8. Titaev, P.S. Puti sovershenstvovanija informacionnoj sistemy monitoringa pozharoopasnoj situacii v Tverskoj oblasti / P.S. Titaev // Nauka i biznes: puti razvitiya. – M. : TMBprint. – 2014. – № 3(33).

Methodology for Integrated Forecasting of Fires Using Satellite Remote Sensing Data

P.S. Titaev

Tver State Technical University, Tver

Key words and phrases: assessment of fire risks; technique of integrated forecasting of fires; geographic information systems; satellite remote sensing.

Abstract: This paper proposes an approach to the assessment of the risks of fires, which allows a single methodology to take into account the effect of different components, such as the traditional factors that cause emergencies in the region, long-term changes in the climate and environment, changes in meteorological parameters, regional changes in ecosystems and wildlife management (manifested in the dynamics of natural fuel).

© П.С. Титаев, 2015