

# Построение адаптивного алгоритма детектирования пожаров

А.А. Галеев, С.А. Барталев, Д.В. Ершов, Ю.С. Крашенинникова,  
Е.А. Лупян, А.А. Мазуров

*Институт космических исследований РАН  
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32  
E-mail: [info@smis.iki.rssi.ru](mailto:info@smis.iki.rssi.ru)*

В настоящей работе предлагается методика построения порогов, адаптированных для различных условий наблюдения, в алгоритме детектирования пожаров MOD14, ориентированном на работу с данными приборов MODIS, установленных на спутниках Terra и Aqua. В работе приводятся также первые результаты оценок порогов, полученные на основе данных наблюдений за лесными пожарами на территории России в 2006-2007 годах.

Хорошо известно, что в настоящее время одним из наиболее устойчивых и надежных алгоритмов детектирования пожаров по спутниковым данным является алгоритм MOD14 [1-3], рассчитанный на работу с данными прибора MODIS [4], установленного на спутниках TERRA и AQUA. Алгоритм разработан специалистами Мерилендского университета. Этот алгоритм обеспечивает достаточно устойчивое детектирование пожаров и дает очень низкий процент ложных тревог. В настоящее время он используется в различных системах. В частности, данный алгоритм является базовым алгоритмом автоматического детектирования пожаров в информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ Рослесхоз) [5-7].

В то же время опыт эксплуатации MOD14 в частности в рамках ИСДМ Рослесхоз показал, что при его работе могут возникать пропуски пожаров. При этом число пропусков сильно зависит от конкретных регионов, времени и условий наблюдения. Следует отметить, что, изменяя настройки алгоритма, можно в отдельных случаях добиться существенного уменьшения ошибок, связанных с пропусками пожаров, однако изменение стандартных настроек приводит также и к появлению ложных тревог. Поэтому возникает задача оценки качества работы алгоритма в различных условиях и оценки возможности его адаптации к различным условиям.

Для того чтобы оценить возможность адаптации алгоритма MOD14 к различным условиям наблюдения, следует рассмотреть алгоритм его работы и оценить, какие из его настроечных параметров могут быть наиболее чувствительны к изменению условий наблюдений.

Алгоритм MOD14 разрабатывался в расчете на устойчивый анализ данных, собираемых по всей поверхности Земли. Поэтому одной из основных его задач являлось уменьшение ложных тревог, т.е. детектирование пикселей изображения, которые на самом деле не являются пожарами. Для уменьшения ложных тревог, особенно в экваториальной зоне, на входе алгоритма установлено пороговое ограничение по температуре. К рассмотрению принимаются только точки, у которых радиояркостная температура в канале 3.5-4 мкм превышает 305 К в ночное время и 310 К в дневное время. Точки с температурой выше верхнего порога 360 К считаются заведомо пожарами. В диапазоне значений между этими порогами работает контекстуальный алгоритм, проводящий статистический анализ температурных полей в различных каналах прибора MODIS в окрестности исследуемой точки.

В контекстуальном алгоритме производится анализ температурного поля в окрестности перегретой точки. Окружающие точки используются для вычисления фоновой температуры. Этот подход подразумевает, что фоновая температура падает с удалением от перегретой точки. Расширение окрестности вокруг перегретой точки происходит до момента, когда достаточное количество не нагретых точек будет найдено (включая облака и водную поверхность). Считается достаточным для вычисления фоновой температуры наличие 25% не нагретых точек. Окрестность точ-

ки расширяется максимум до размера 21x21. При определении «фоновых» пикселей не учитываются облачные и попавшие на водную поверхность. Перегретые пиксели определяются по разности температуры в канале 4 мкм и 11 мкм - она должна превышать 20 К (10 К ночью) и температура в канале 4 мкм должна быть больше 320 К (315 К). По оставшимся точкам рассчитывается средняя температура и ее стандартное отклонение в каналах 4 мкм ( $T_{4b}$  и  $\delta T_{4b}$ ) и 11 мкм. Вычисляется медианная разница температуры фоновых пикселей в 4 мкм канале и 11 мкм канале ( $\Delta T_{41b}$ ) и стандартное отклонение этой разницы ( $\delta \Delta T_{41b}$ ).

Для того чтобы точка была признана «пожаром» (горячей точкой/hotspot), должно выполняться следующее условие:

$$\begin{array}{l} \text{(A)} \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \text{(B)} \\ \{ [(T_4 > T_{4b} + 4\delta T_{4b}) \text{ or } T_4 > 320 \text{ K (315 K at night)}] \text{ and} \\ [(\Delta T_{41} > \Delta T_{41b} + 4\delta \Delta T_{41b}) \text{ or } T_{41} > 20 \text{ K (10 K)}] \} \text{ or } \{ T_4 > 360 \text{ K (330 K)} \} \text{ (1)} \\ \text{(a)} \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \text{(b)} \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \text{(X)} \end{array}$$

Детальный анализ работы алгоритма показывает, что выделенные алгоритмом MOD14 по температурам в канале 3.5-4 мкм точки, детектированные как горячие, лежат в диапазоне работы именно контекстуального алгоритма, т.е. их температура в канале 3.5-4 мкм лежит между 310 К (305 К – ночью) и 360 К. При этом следует отметить, что если рассмотреть распределение детектированных точек по температуре, то хорошо видно, что оно фактически обрывается на температуре 310 К (305 К – ночью). Таким образом, достаточно большое число точек, видимо, просто выбрасывается из рассмотрения установленным нижним порогом области работы контекстуального алгоритма. Анализ распределений детектированных пожаров по температуре в канале 3.5-4 мкм в различные периоды наблюдений также показывает, что, видимо, именно этот порог является наиболее чувствительным к изменению условий наблюдений.

Поэтому при проведении работы по адаптации алгоритма MOD14 к условиям наблюдений и типам подстилающей поверхности усилия в первую очередь должны быть направлены на поиск оптимального значения данного порога для различных условий наблюдений и типов растительного покрова.

Для получения данных, необходимых для проведения анализа возможности адаптации алгоритма MOD14 к региональным условиям, в центрах приема и обработки данных, работающих в интересах ИСДМ Рослесхоз [5-7], была реализована следующая схема обработки данных прибора MODIS:

- в алгоритме MOD14 был установлен нижний порог работы контекстуального алгоритма 270 К.
- все точки, получаемые после работы алгоритма, температура которых превышала стандартные значения дневных и ночных порогов, направлялись на стандартную процедуру обработки, использующуюся в ИСДМ Рослесхоз.
- все данные, получаемые после работы алгоритма с пониженным порогом, собирались в централизованную базу данных (БД) для дальнейшего анализа.

Точки, попадающие в централизованную БД, аннотировались по стандартной схеме, использующейся в ИСДМ Рослесхоз, т.е. им приписывались различные атрибуты, позволяющие определить, на какой тип территории, и в какую область они попали. К стандартным атрибутам, использующимся в ИСДМ Рослесхоз, была добавлена температура, получаемая в 31 канале прибора MODIS (11 мкм) в окрестности детектированной точки. Эта температура характеризует температуру поверхности в точке наблюдения.

Система сбора данных начала функционировать с конца июля 2006 года и функционировала до конца пожароопасного сезона 2006 года и продолжила функционирование в пожароопасном сезоне 2007 года. За это время всего в БД поступило около 1 млн. точек. В том числе более 700 тысяч точек, детектированных днем и более 200 тысяч точек детектированных ночью.

Распределение дневных и ночных точек, полученных по температуре в канале 3.5-4 мкм приведено на рис. 1. Из представленных распределений хорошо видно, что в области значений температуры ниже используемых порогов лежит значительное количество точек. Так, в ночное время ниже стандартного порога 305 К попало почти 83% детектированных точек, а в дневное время почти 76%. В то же время, следует отметить, что понижение порога температуры, при которой точки начинают рассматриваться, как потенциальные пожары, не приводит к обвальному росту числа детектируемых точек – здесь срабатывают другие критерии алгоритма MOD14. Этот факт еще раз подтверждает правильность предположения о возможности проведения варьирования стандартного порога, используемого в алгоритме, и в ряде случаев понижения его значения.

Хотелось бы обратить внимание на тот факт, что на «дневном» распределении, гораздо более четко, чем на ночном выражен левый пик. Анализ распределения детектированных точек на территориях, покрытых лесом, приведенный на рис. 2, показывает, что фактически в этот пик вносят вклад только точки, обнаруженные на этих территориях. Отметим, что эти точки могут быть связаны со слабыми низовыми пожарами. Поскольку наблюдается достаточно большое число таких точек, планируется детальное изучение данного факта в дальнейшем.

Для анализа накопленных данных и оценки возможности выбора оптимального порога для разных условий наблюдения и разных лесорастительных условий необходимо иметь опорную информацию о том, является ли действительно детектированная точка пожаром или это ложное срабатывание алгоритма. Стандартный путь получения такой информации – это выделение некоторых тестовых регионов и сбор по ним наземных данных или спутниковых данных высокого разрешения. Такой путь достаточно затратен и требует как полевых исследований, так и в большинстве случаев, проведения ручной обработки и анализа спутниковых данных. Такие работы могут быть реально проведены лишь на небольшом числе тестовых регионов при достаточно ограниченных условиях наблюдений и типах лесорастительных условий. Поэтому такой путь практически не может позволить провести работы по адаптации параметров алгоритма к широкому классу лесорастительных условий и условий наблюдений.

Поэтому нами был предложен другой подход к проведению анализа данных. Он основан на сравнении данных о детектированных пожарах с данными детектирования гарей (площадей, пройденных огнем), полученными на основе обработки информации, поступающей от прибора VEGETATION, установленного на спутнике SPOT [8], а с 2007-го года и на основе данных прибора MODIS, установленного на спутниках TERRA и AQUA. Данные о площадях, пройденных огнем, получают на основе анализа рядов данных о состоянии растительного покрова и изменений, происходящих в них. Алгоритм выделения гарей достаточно подробно описан в работах [9, 10], он прошел различные уровни валидации [11] и с 2005 года используется в ИСДМ Рослесхоз [5-7]. Это позволяет получать информацию о площадях, пройденных огнем, на всей территории России. Таким образом, для анализа качества детектирования активных пожаров на всей территории России для достаточно широкого спектра условий наблюдений, мы имеем независимую информацию о том, был ли действительно пожар в окрестности детектированной точки или нет.

Для проведения анализа данных был предложен следующий подход:

- каждая детектированная точка с помощью алгоритма MOD14 была сопоставлена с информацией о гарях и, если в окрестности точки была найдена гарь, которая образовалась в период детектирования пожара, точка считалась подтвержденной.
- после проведения сопоставления строились зависимости процента детектированных точек активных пожаров, совпавших с гарями, от температуры (далее такую зависимость мы будем называть ВС-зависимость).
- данные зависимости строились для различных типов поверхности и различных условий наблюдения.

На рис. 3 и 4 приведены зависимости процента совпадений точек, детектированных алгоритмом MOD14 по данным прибора MODIS, с гарями, детектированными на основе данных прибора VGT для дневных и ночных наблюдений. На графиках также отмечены пороги отсека, исполь-

зующиеся в стандартном алгоритме MOD14, ниже которых точки вообще не рассматриваются. Следует отметить, что выше некоторого значения температуры графики выходят практически на постоянное значение («пределный процент совпадений»), а ниже - равномерно спадают до нуля. Это хорошо видно особенно на графиках для ночных условий наблюдения. При этом «пределный процент совпадений» в случае лесных территорий для ночных наблюдений составляет 90%, а для дневных примерно 70%. Для нелесных территорий этот процент составляет соответственно 50% и 40%. Следует отметить, что низкий процент совпадений на нелесной территории, видимо, связан с ошибками в детектировании гарей на этих территориях из-за достаточно быстрого восстановления растительности. Поэтому в нашем дальнейшем анализе мы будем использовать лишь данные по лесным территориям, на которых происходит устойчивое детектирование гарей.

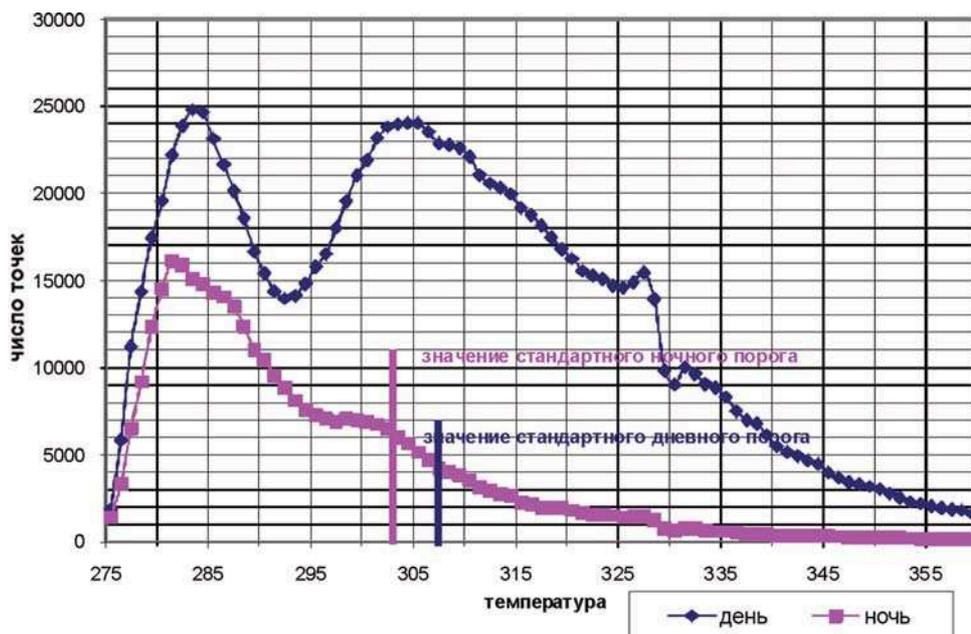


Рис. 1. Распределение по температуре в канале 3.5-4 мкм горячих точек, детектированных алгоритмом MOD14 с пониженным порогом работы контекстуального алгоритма на территории России за пожароопасный сезон 2007 года

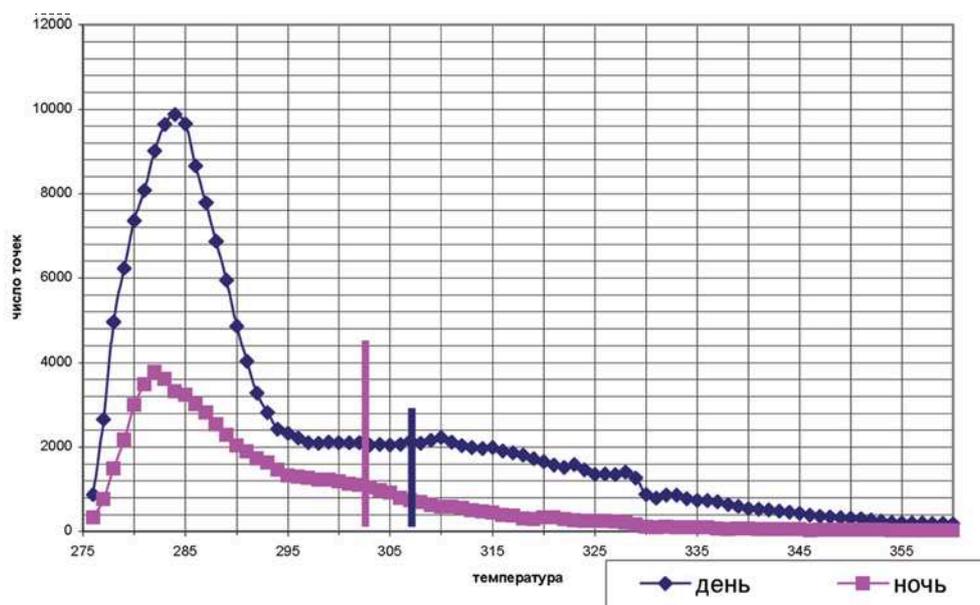


Рис. 2. Распределение по температуре в канале 3.5-4 мкм горячих точек, детектированных на территориях, покрытых лесом, алгоритмом MOD14 с пониженным порогом работы контекстуального алгоритма на территории России за пожароопасный сезон 2007 года

Следует также отметить, что при детектировании гарей может происходить их пропуск в случае, если гарь имеет достаточно малый размер см. [9-11]. Для того чтобы проанализировать и оценить возможность отсека таких ошибок нами были построены и проанализированы ВС-зависимости для гарей различной площади. Проведенный анализ показал, что действительно для гарей с площадью  $> 200$  га мы имеем достаточно высокий процент совпадений, на который кривые выходят при высоких температурах, а при пожарах с площадью  $< 200$  га процент таких совпадений низок. Поэтому для детального анализа основных особенностей ВС-зависимостей для их построения использовались только точки, принадлежащих пожарам с площадью  $> 200$  га.

Рассмотренные зависимости приведены на рис. 5. Было обнаружено, что графики имеют следующую особенность. При высоких температурах график практически выходит на константу, что фактически соответствует подтверждению детектированных точек гарями. Отличие констант, на которые выходят зависимости, определяется, видимо, как уже говорилось выше, пропусками при работе алгоритма, который детектирует гари. В области низких температур процент совпадений начинает достаточно быстро падать. При этом на графиках может быть выделен достаточно характерный излом. Температура именно этого излома и определяет значение порога, выше (правее) которого алгоритм практически не дает ложных тревог. Следует отметить, что анализ представленных интегральных по всей территории России ВС-зависимостей показывает, что используемый стандартный порог в MOD 14 в «среднем» для территории России выбран «почти» оптимальным образом для ночных наблюдений и несколько занижен для дневных наблюдений.

Спад графика левее излома, видимо, определяется тем, что в этой области температур возникают ошибки детектирования, связанные с ложными тревогами. При этом ход зависимости определяет вероятность правильности детектирования пожара при данной температуре. Следует отметить, что для того чтобы избежать ошибок, связанных с работой алгоритма детектирования гарей, и определить для каждой температуры правильную вероятность детектирования, следует провести перенормировку зависимостей.

Для того чтобы проверить правильность оценки вероятности корректного детектирования был проведен анализ совпадения точек, детектированных с пониженным порогом с действующими пожарами.

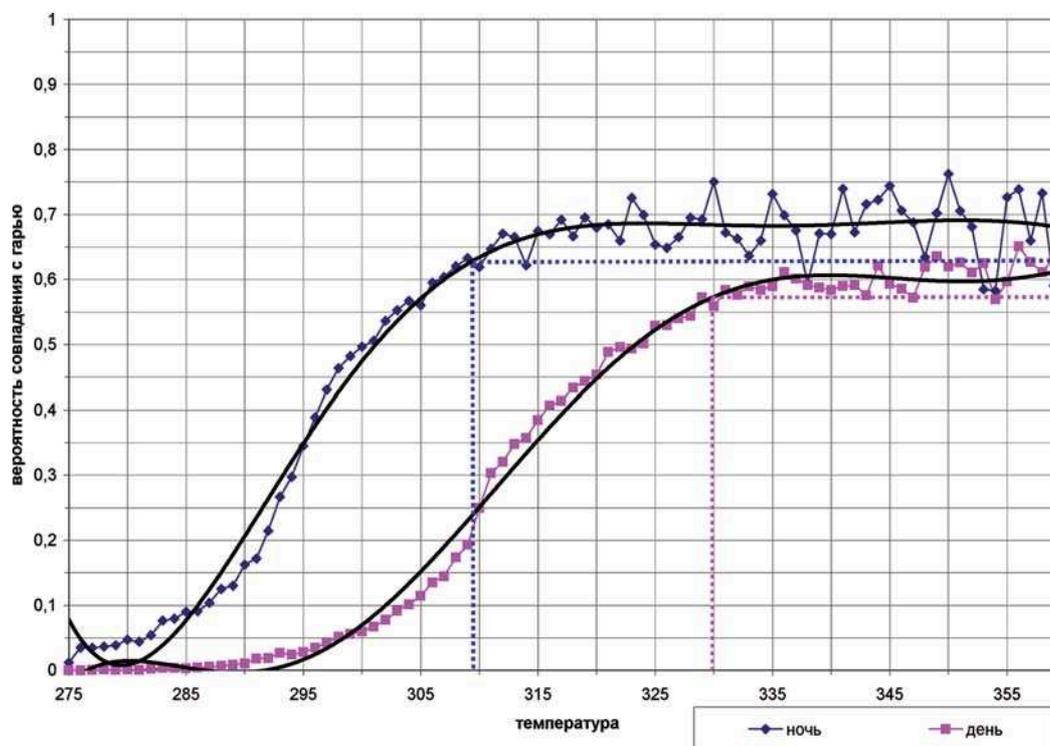


Рис. 3. ВС-зависимость для всех детектированных точек за пожароопасный сезон 2007 г.

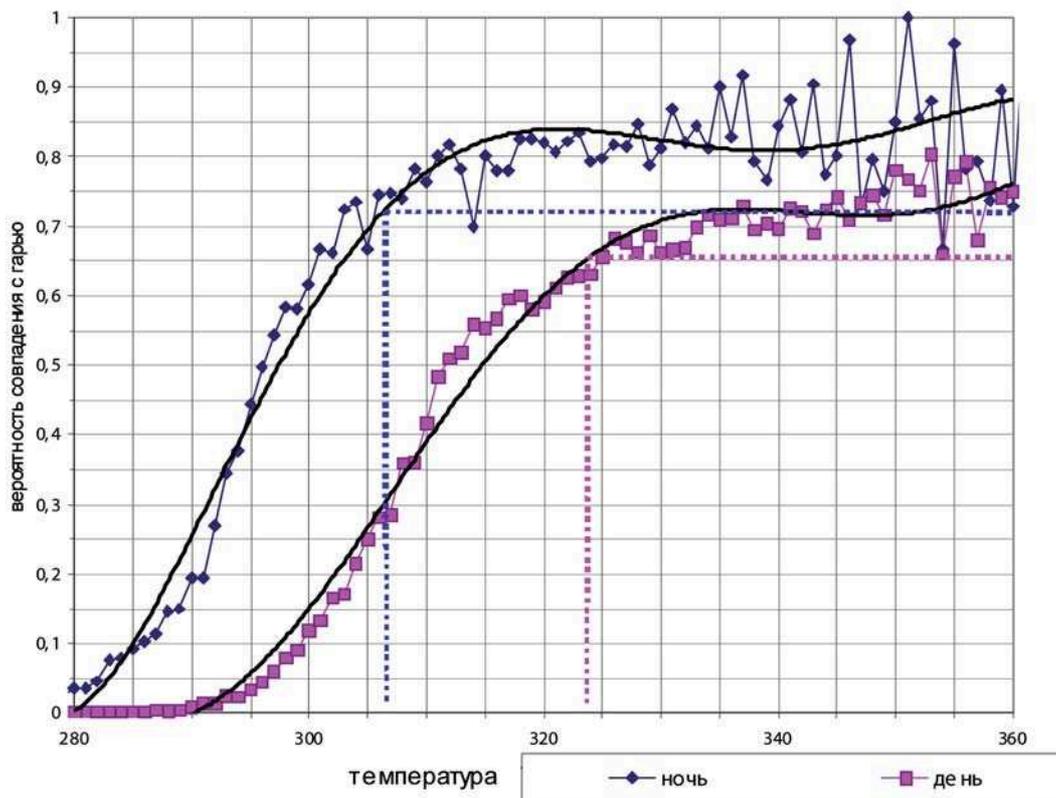


Рис. 4. ВС-зависимость для всех детектированных точек в пожароопасном сезоне 2007 года на территориях, покрытых лесом

Следует отметить, что полученные точки достаточно хорошо совпадают с перенормированными ВС-зависимостями, рассчитанными для соответствующих территорий. Это хорошо видно из рис. 6, на котором звездочками отмечены вероятности совпадения низкотемпературных детектированных подозрений на пожар с реально действующими пожарами. Это подтверждает, что полученными перенормированными ВС-зависимостями можно пользоваться для оценки вероятности правильности детектирования пожара при фиксированной температуре в канале 3,5 мкм.

Обратим внимание на то, что перенормировка, безусловно, может быть проведена, исходя из разных предположений. На наш взгляд наиболее приемлемым предположением, является то, что для высоких температур график должен выходить на значение 100% (1) вероятности детектирования, т.е. все высокотемпературные пожары и гари от них детектируются. Именно эту перенормировку мы использовали при построении зависимостей, приведенных на рис. 6.

Отметим, что в случае если такую перенормировку удастся сделать корректно, может быть предложен алгоритм выбора оптимального порога, представленный на рис. 7. Следует отметить, что одним из основных преимуществ предлагаемого алгоритма является то, что алгоритм может быть полностью автоматизирован. Нами был реализован прототип такого алгоритма, который был использован для построения оценок оптимальных значений порогов при наблюдениях в условиях различных температур подстилающей поверхности. Дело в том, что достаточно хорошо известно, что процент пропусков пожаров достаточно сильно зависит от того, при каких значениях температуры подстилающей поверхности происходят наблюдения и детектирование пожаров. Это в первую очередь определяется тем фактом, что при низких температурах подстилающей поверхности температура пикселей, в которых происходит горение, может достаточно сильно падать, поскольку интегральная температура пикселя зависит как от температуры горения, так и от температуры подстилающей поверхности, а также от процента площади, занятой в пикселе зоной активного горения. Зависимость оптимального порога детектирования от температуры подстилающей поверхности подтверждают также и ВС-зависимости, приведенные на рис. 8 и 9.

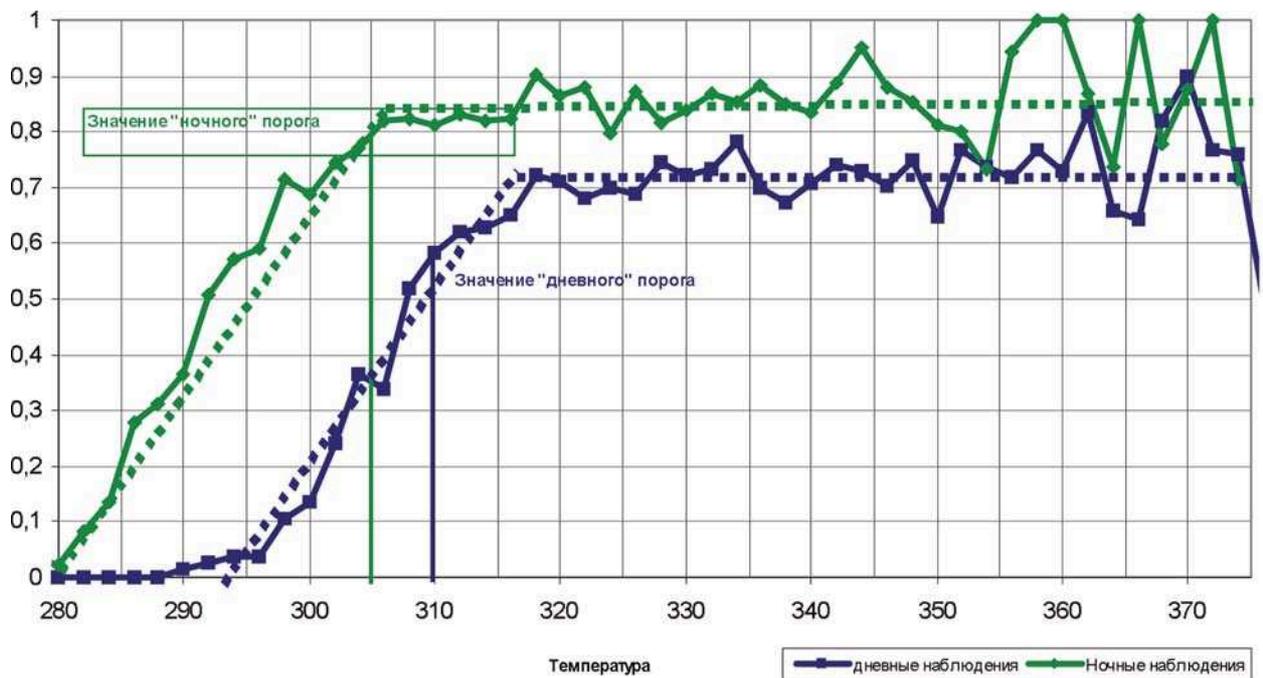


Рис. 5. ВС-зависимость для точек, находящихся вблизи пожаров, площадь которых превышает 200 га

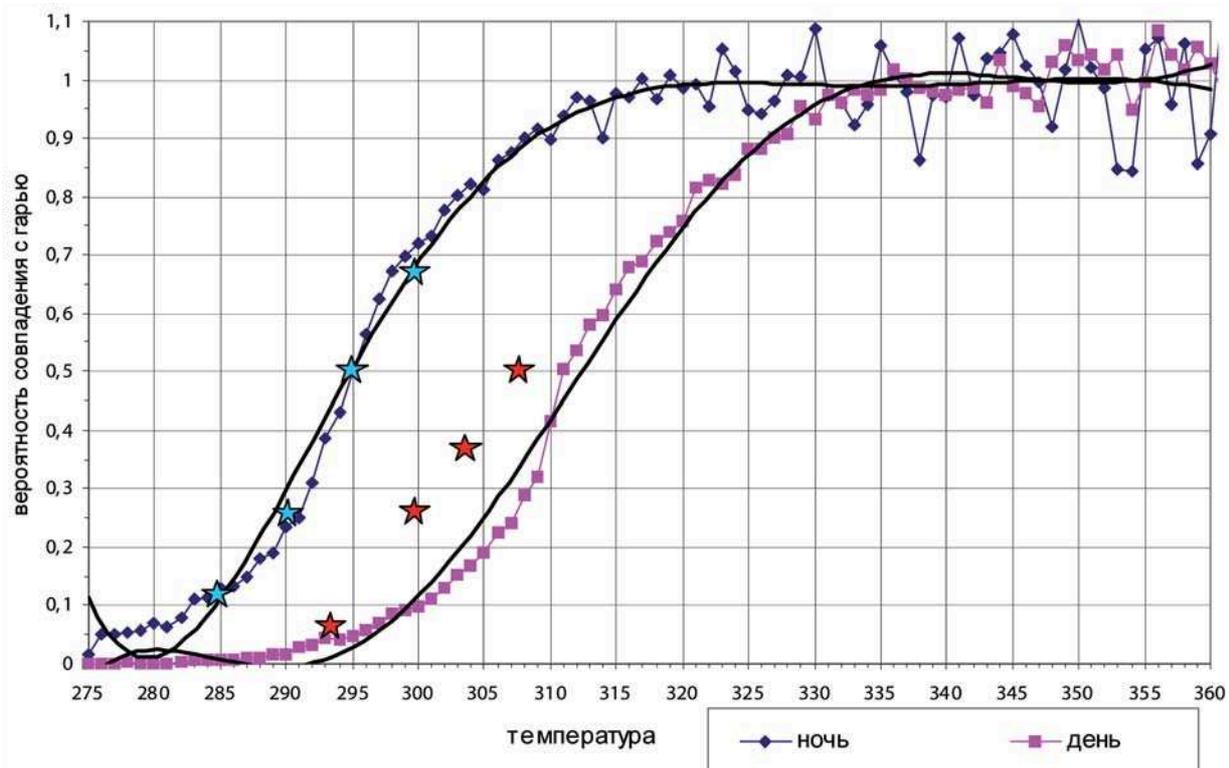


Рис. 6. Совпадение ВС-зависимостей с вероятностью совпадения точек, детектированных с пониженным порогом с фактически действующими пожарами (отмечены звездочками)

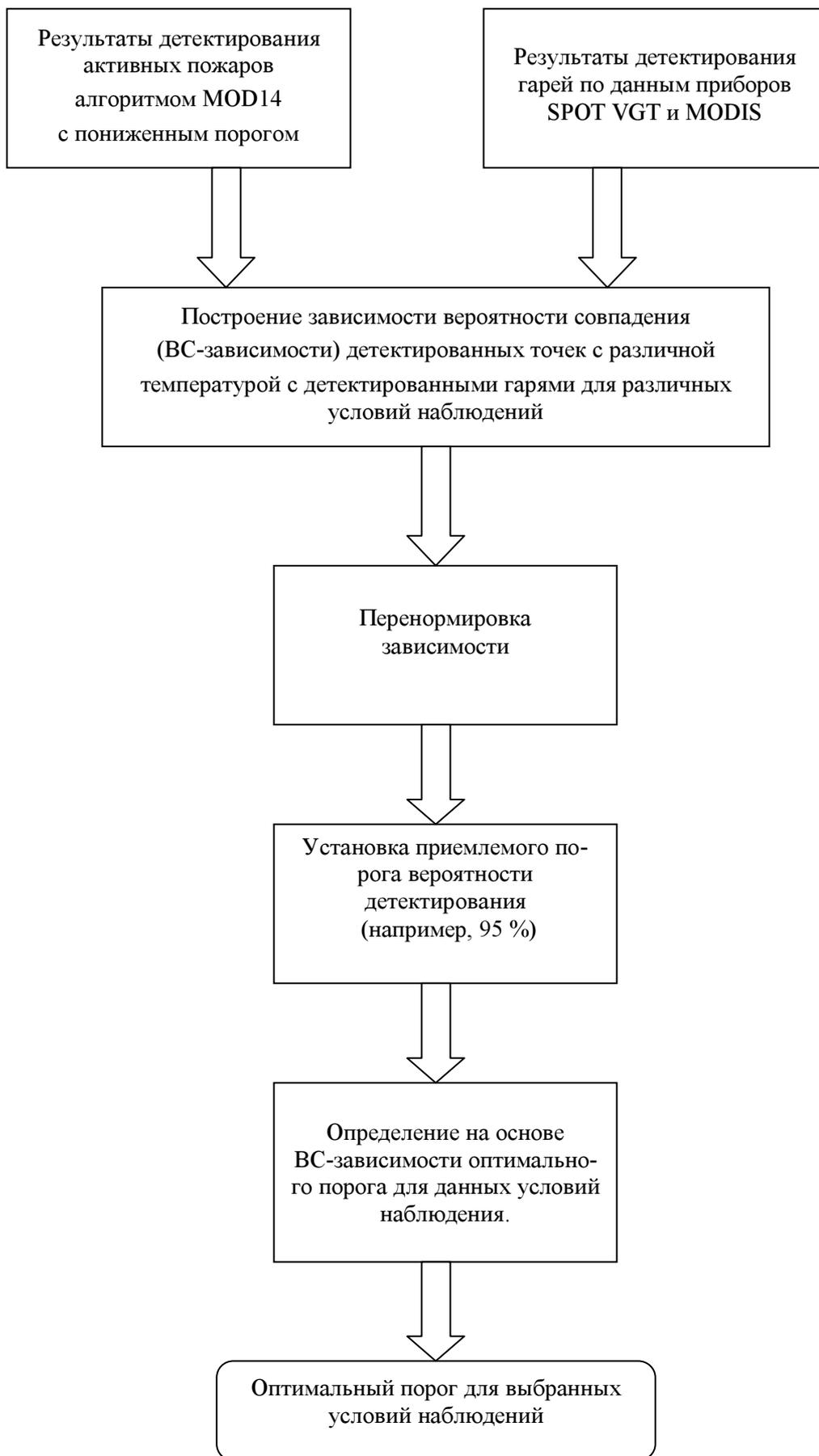


Рис. 7. Алгоритм автоматизированного выбора оптимального порога

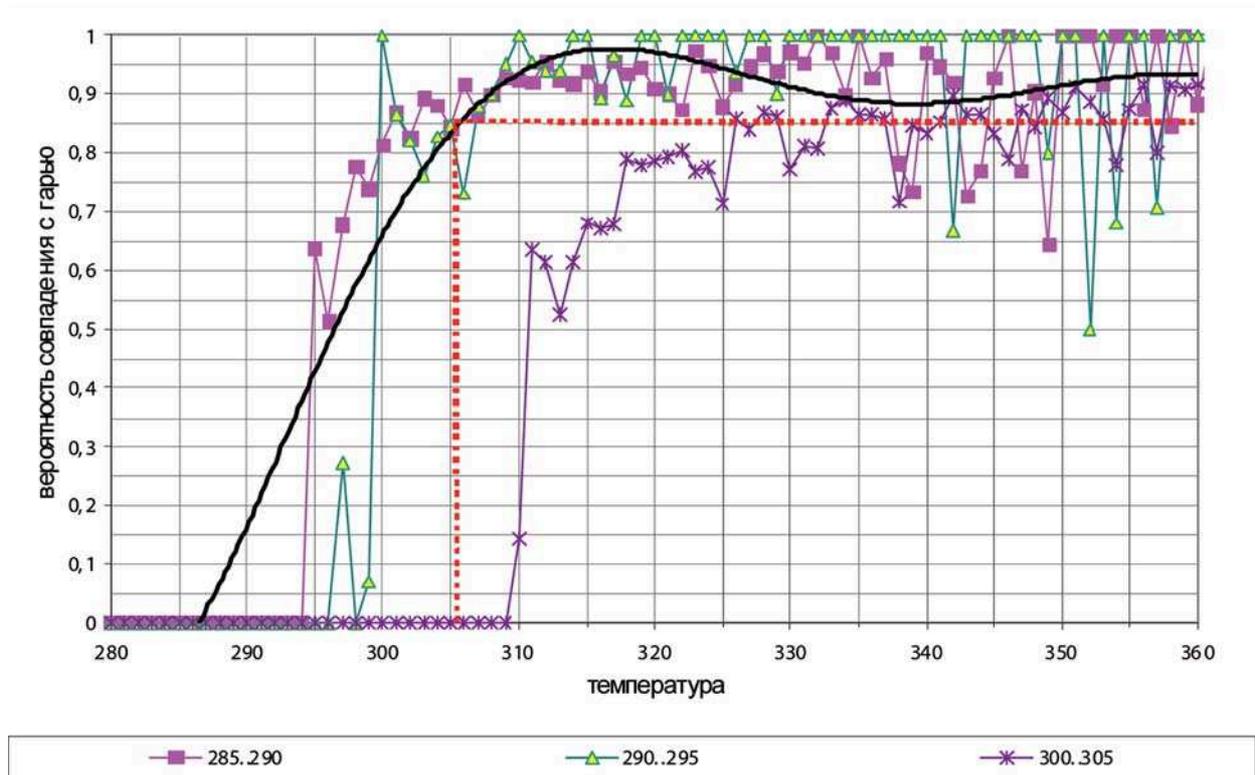


Рис. 8. ВС- зависимость для условий ночных наблюдений при различной температуре подстилающей поверхности

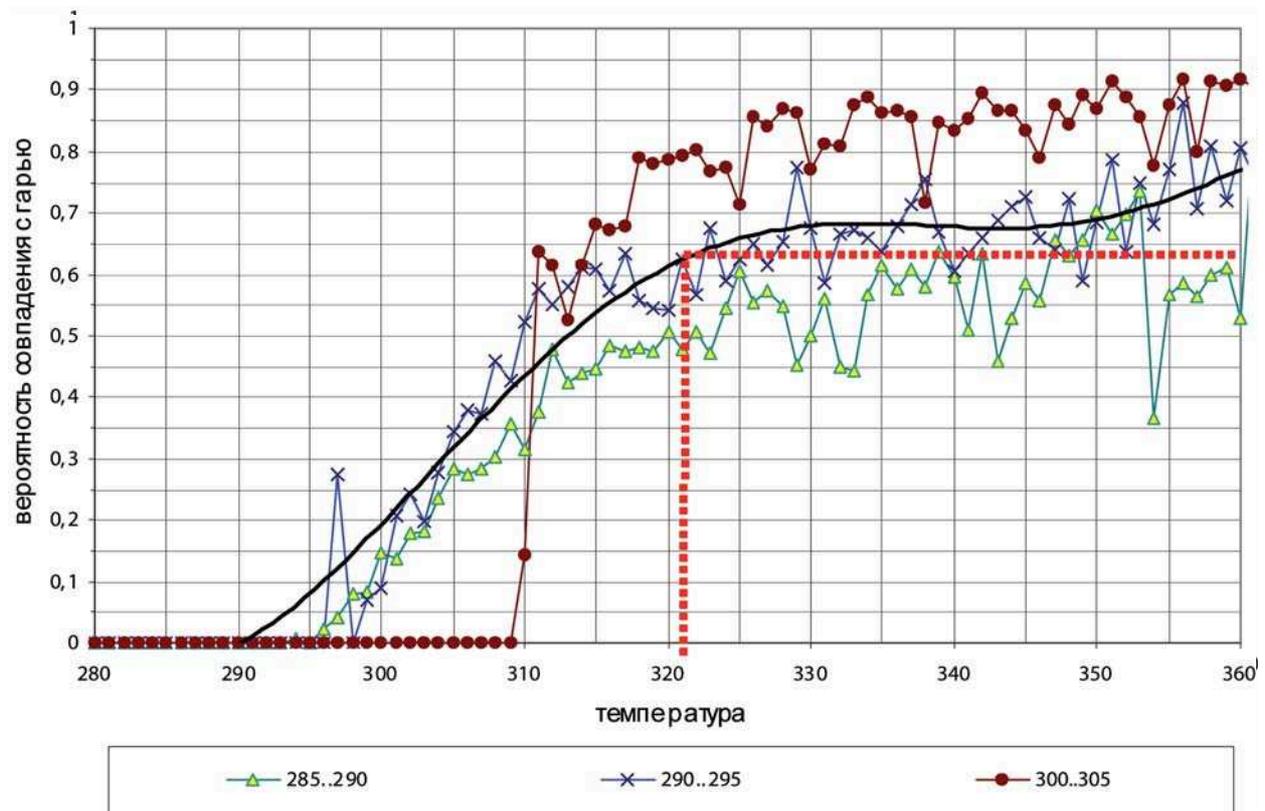


Рис. 9. ВС- зависимость для условий ночных наблюдений при различной температуре подстилающей поверхности

С помощью предложенного алгоритма зависимостей были получены следующие «оптимальные» пороги для детектирования пожаров с ошибкой менее 5%:

Для ночных условий:

<i>Диапазон температуры поверхности (по данным 31-го канала MODIS) гр. Кельвина</i>	<i>Порог, выше которого ошибка детектирования не превышает 5% гр. Кельвина</i>
<285	307
285-290	306
290-295	305
295-300	317
305-310	325
>310	333

Для дневных условий:

<i>Диапазон температуры поверхности (по данным 31-го канала MODIS) гр. Кельвина</i>	<i>Порог, выше которого ошибка детектирования не превышает 5% гр. Кельвина</i>
<285	322
285-290	323
290-295	322
295-300	322
305-310	328
>310	331

Таким образом, мы видим, что предложенный метод и алгоритм позволяют производить выбор и оптимизацию пороговых значений в алгоритме детектирования пожаров, не используя данных наземных измерений, а опираясь только на независимые алгоритмы детектирования пожаров и их последствий (гарей) по спутниковым данным. Такой подход может фактически позволить создать новый класс алгоритмов, для которых может быть проведена адаптация к условиям наблюдений без использования дорогостоящих данных наземных измерений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №07-07-12065) и Федерального агентства лесного хозяйства Российской Федерации (проект № МГ-02.06/23К).

## Литература

1. Justice, C.O., Giglio, L., Korontzi, S., Owens, J., Morisette, J. T., Roy, D., Descloitres, J., Al-leaume, S., Petitcolin, F., and Kaufman, Y., 2002, The MODIS fire products. Remote Sensing of Environment, 83:244-262.
2. Yoram Kaufman, Chris Justice. Algorithm Technical Background Document MODIS FIRE PRODUCTS (Version 2.2 Nov. 10 1998) (EOS ID# 2741).
3. Louis Giglio, Jacques Descloitres, Christopher O. Justice, Yoram J. Kaufman. An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS. Remote Sensing of Environment 87 (2003) 273–282.
4. Bobbe, T., Descloitres, J., Finco, M., Giglio, L., Justice, C., Sohlberg, R., and Townshend, J. (2002). MODIS Land Rapid Response System: implementation with USDA Forest Service and implications for active fire detection and land cover change products from future moderate resolution sensors. NPOESS MAXI Review 2002, Silver Spring, MD.
5. Беляев А.И., Ершов В.В., Луян Е.А., Романюк Б.В., Сухинин А.И., Тацилин С.А. Национальная система сбора, обработки и анализа информации о природных пожарах и ее сопряжение с международными и региональными информационными сетями // Управление лесными пожарами

на экорегиональном уровне Материалы международного научно-практического семинара (Хабаровск, Россия, 9-12 сентября 2003 г.). М.: Издательство «Алекс», 2004. С. 156-166.

6. *Беляев А.И., Коровин Г.Н., Лупян Е.А.* Использование спутниковых данных в системе дистанционного мониторинга лесных пожаров МПР РФ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научн. статей. М.: GRANP polygraph, 2005. Т. 1. С. 20-29.

7. *Беляев А.И., Коровин Г.Н., Лупян Е.А.* Состояние и перспективы развития Российской системы дистанционного мониторинга лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научн. статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2006. Т. 1. С. 341-350.

8. *Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А., Уваров И.А.* Оценка площади повреждений наземных экосистем Северной Евразии пожарами в 2001-2003 годах по спутниковым данным инструмента SPOT-Vegetation // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сборник научных статей. М.: GRANP polygraph, 2005. Т. 2. С.354-366.

9. *Егоров В.А., Барталев С.А., Лупян Е.А., Уваров И.А.* Мониторинг повреждений растительного покрова пожарами по данным спутниковых наблюдений // Известия вузов: геодезия и аэрофотосъемка, 2006. Вып. 2. С. 98-109.

10. *Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A. and Uvarov I.A.* Multi-year circumpolar assessment the area burnt in boreal ecosystems using SPOT-Vegetation // submitted to International Journal of Remote Sensing, 2005 (ID № TRES-LET-2005-0098)

11. *Барталев С.А., Беляев А.И., Егоров В.А., Еришов Д.В., Коровин Г.Н., Коршунов Н.А., Котельников Р.В., Лупян Е.А.* Валидация результатов выявления и оценки площадей, поврежденных пожарами лесов по данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сборник научных статей. М.: GRANP polygraph, 2005. Т. 2. С. 343-353.