Детектирование гарей на территории Восточной Сибири по данным AVHRR/NOAA (1984–2016) с использованием комбинированного подхода

О. А. Томшин, В. С. Соловьев

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю. Г. Шафера СО РАН, Якутск, 677980, Россия
E-mail: tomshinoa@gmail.com

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова Якутск, 677000, Россия
E-mail: solovyev@ikfia.ysn.ru

В работе представлены результаты детектирования гарей в лесах Восточной Сибири по данным проекта LTDR (1984–2016) с использованием комбинированного подхода, включающего на этапе валидации экспертную оценку достоверности выделенных пороговым алгоритмом гарей. Сравнение результатов детектирования с данными MODIS (продукт MCD64A1 C6, 2001–2016 гг.) и данными проекта GFED-4 (1995–2016) продемонстрировало хорошее согласие с коэффициентами корреляции ~0,95, ~0,87 и средними относительными ошибками 16,5 и 40,6 % соответственно. Анализ пространственного распределения гарей выявил, что на территории к западу от оз. Байкал качество их детектирования несколько ухудшается. Такое снижение обусловлено тем, что в этой части Восточной Сибири гари чаще имеют небольшие размеры и с учётом более низкого разрешения данных LTDR в сравнении с данными MODIS вероятность их обнаружения оказывается ниже. Комбинированный подход показал, что в некоторых регионах, имеющих сложный ландшафт подстилающей поверхности, данные MODIS часто предоставляют недостоверную информацию по гарям. По результатам детектирования построены годовые карты гарей на территории Восточной Сибири за 1984–2016 гг. Сделан вывод, что применение комбинированного подхода на основе экспертной оценки с использованием дополнительных подтверждающих гарь условий обеспечивает более высокий (по сравнению с полностью автоматизированными алгоритмами) уровень достоверности детектирования гарей, особенно для участков с горным рельефом, сложной текстурой земной поверхности, типом растительного покрова и/или расположенных на высоких широтах, где возникновение гарей крайне маловероятно.

Ключевые слова: гари, лесные пожары, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 04.04.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-137-149

Введение

Лесные пожары (ЛП) являются важным природным фактором, оказывающим значительное влияние на окружающую среду. Негативное воздействие ЛП ухудшает качество биоразнообразия и снижает ресурсный потенциал лесов. Наибольший урон терпят лесные экосистемы с низким реабилитационным потенциалом, к числу которых относятся бореальные леса Восточной Сибири, произрастающие на вечной мерзлоте в условиях резко-континентального климата (Лыткина, Миронова, 2009; Соловьев и др., 2009; Щербаков и др., 1979). В результате пожаров в атмосферу выбрасывается значительное количество парниковых газов (CO_2, CO, CH_4, NO_x) и аэрозольных дымовых частиц, влияющих на физико-химические процессы в атмосфере, радиационный баланс и в целом на климат (Гинзбург и др., 2008; Ершов и др., 2009; Соловьев, Будищев, 2010; Томшин, Соловьев, 2018; Швиденко, Щепащенко, 2013; van der Werf et al., 2010).

Газодымовые выбросы могут переноситься на значительные расстояния от очагов сибирских пожаров: при устойчивом западном переносе наблюдались ситуации, когда дымовые шлейфы, пересекая Тихий океан, достигали Североамериканского континента, в случае

северо-восточного переноса — берегов Баренцева и Карского морей (Bertschi, Jaffe, 2005; Heilman et al., 2014; Sapkota et al., 2005; Tomshin, Solovyev, 2014). Иногда в атмосфере образуются застойные зоны, обусловленные соответствующей конфигурацией барических и ветровых полей, где происходит аккумуляция газодымовых выбросов и образуются аэрозольные поля площадью в несколько миллионов квадратных километров с высокими значениями АОТ. Подобные крупномасштабные аэрозольные образования могут сохраняться около 5–7 сут после прекращения пожаров (Томшин, Соловьев, 2016).

Резкое снижение альбедо подстилающей поверхности, где прошли лесные пожары, нарушает температурный режим почвы. В условиях криолитозоны это обстоятельство зачастую приводит к формированию термокарстовых образований и повышению обводнённости местности. Дальнейшее разрушение вечной мерзлоты приведёт к масштабной инжекции в атмосферу CO_2 и CH_4, содержащихся в огромном количестве в вечномёрзлых грунтах, и последующему усилению парникового эффекта. Следует отметить, что «парниковый потенциал» метана в атмосфере более чем в 20 раз выше, чем у углекислого газа.

За последние десятилетия в условиях глобального потепления повысилась лесопожарная активность. Согласно результатам моделирования динамики лесных пожаров, в России и Канаде в условиях более тёплого климата угроза крупных лесных пожаров существенно возрастает при повышении среднегодовой температуры на планете больше чем на 2 °С. В соответствии с прогнозами, площадь, проходимая огнём каждый год, в некоторых районах зоны бореальных лесов может удвоиться, а частота возгораний возрасти на 50 % (Замолодчиков, Краев, 2016; Кондратьев, Григорьев, 2004).

Целью работы является детектирование гарей на территории Восточной Сибири по данным LTDR AVHRR (1984–2016) с помощью комбинированного подхода на основе многопорогового алгоритма и экспертной оценки с привлечением километровых (LAC — Location Area Code) и четырёхкилометровых (GAC — Global Area Coverage) снимков AVHRR из архива NOAA CLASS и выделенных на них активных очагов («хотспотов»).

Исследуемый регион

Восточная Сибирь (ВС) включает азиатскую территорию России от Енисея до водораздельных хребтов, идущих вдоль Тихого океана (*рис. 1*, граница ВС отмечена чёрной пунктирной линей, см. с. 139). Площадь Восточной Сибири — 7,2 млн км². Большая её часть занята таёжным Среднесибирским плоскогорьем, сменяющимся на севере тундровыми низменностями, на юге и востоке — высокими горными хребтами Западных и Восточных Саян, горами Забайкалья и Яно-Колымского края. Большая часть ВС находится в зоне распространения вечномёрзлых пород (белая линия на *рис. 1*), которая оказывает влияние на температурный, влажностный режим почв и, следовательно, на растительный покров региона.

На крайнем севере преобладают арктические пустыни с бедной растительностью. Южнее располагается зона тундры. Восточносибирская тайга простирается от рубежей лесотундры на севере до границы с Монголией на юге на площади около 5 млн км², из которых 3,5 млн км² занято хвойными лесами. Преобладающим типом растительности является даурская лиственница. Лиственные леса занимают нижние части горных склонов.

Зима в ВС продолжается от 5 до 8 мес, однако лето относительно тёплое. Июль в Восточной Сибири почти всюду теплее, чем на тех же широтах Европейской части России. Климат ВС резко континентальный. Разница между средними температурами самого холодного и самого тёплого месяцев в разных районах составляет от 40 до 65 °С, а в Восточной Якутии абсолютные годовые амплитуды температур достигают 100 °С. Континентальность климата проявляется в сравнительно небольшом количестве осадков, выпадающих главным образом в июле и августе (Национальный..., 2007). Вследствие низкого уровня осадков и высоких летних температур воздуха, обусловленных резко континентальным климатом ВС, высок риск возникновения крупномасштабных лесных пожаров. Связанная с развитием региона растущая антропогенная нагрузка на окружающую среду заметно повышает риски возникновения лесных пожаров.

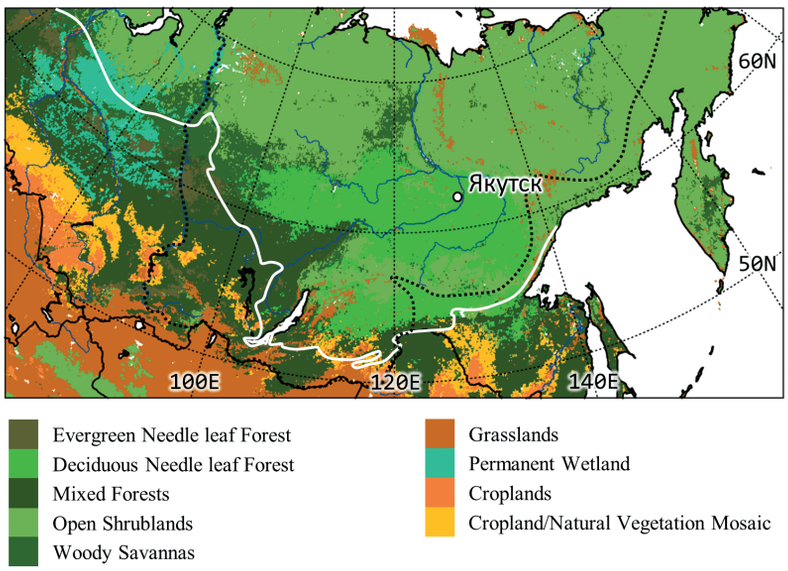


Рис. 1. Карта типов растительного покрова Восточной Сибири по данным MODIS (продукт MCD12C1). Чёрной пунктирной линией отмечена граница ВС, белой линией — граница распространения вечномёрзлых пород

Данные и методы

В качестве исходного набора данных были использованы данные проекта LTDR v. 5 (Land Long Term Data Record), представленные в виде глобальных дневных композитных снимков AVHRR/NOAA (Advanced Very High Resolution Radiometer / National Oceanic and Atmospheric Administration) с пространственным разрешением 0,05° (~5 км) и охватывающие период с 1981 г. по настоящее время (Pedelty et al., 2007).

В качестве опорных использованы данные MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) (продукт MCD64A1 C6) и данные проекта Global Fire Emission Database (GFED-4). Продукт MCD64A1 C6 представляет собой ежемесячные карты гарей с пространственным разрешением 500 м, охватывающий временной интервал с 2001 г. по настоящее время (Giglio et al., 2018). Продукт GFED-4 создан на основе данных ATSR (Along Track Scanning Radiometers) (1995–2001) и MODIS (MCD64A1 C5.1, 2001 – н. в.), имеет пространственное разрешение 0,25° (Giglio et al., 2013).

Границы и типы растительного покрова (см. *рис. 1*) определялись по продукту MCD12C1 (MODIS), имеющему пространственное разрешение 0,05°. MCD12C1 различает 16 типов растительного покрова, из которых на территории Восточной Сибири представлено девять.

Снимки AVHRR с километровым (LAC) и четырёхкилометровым (GAC) пространственным разрешением получены из архива NOAA CLASS (URL: https://www.class.noaa.gov/).

За последние два десятка лет было разработано большое количество методов и алгоритмов детектирования гарей лесных пожаров по данным дистанционного зондирования. К наиболее используемым можно отнести методы, основанные на отслеживании изменений в растительном покрове после пожара по значениям вегетационных индексов (Röder et al., 2008; Rogan, Yool, 2001). Другие автоматизированные методы опираются на информацию об очагах горения («хотспотах») для подтверждения выявленных изменений отражательной способности растительного покрова (Барталев и др., 2014; Fraser et al., 2000; Giglio et al., 2018). Также в последнее время получили распространение методы, использующие нейросети (Brewer et al., 2005; Pu, Gong 2004), объектно-ориентированный анализ изображений (Mitri, Gitas, 2004) и комбинированные методы (Moreno Ruiz et al., 2012; Tomshin, Solovyev, 2018). Однако достоверность дешифрации гарей по космоснимкам зависит не только от технических параметров съёмочной аппаратуры, времени и условий съёмок, но и во многом от локальных климатогеографических особенностей и характеристик растительности рассматриваемого региона. Так,

например, с помощью алгоритма выделения гарей по изменениям значений нормализованного относительного индекса растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) на пройденных пожарами лесных участках авторами были картированы гари на территории Якутии (Tomshin, Solovyev, 2018). Однако при попытке использования этого подхода для остальной части Восточной Сибири, отличающейся климатическими условиями и типами растительности, данный метод оказался недостаточно эффективным по причине большой зависимости качества получаемых результатов от адаптации пороговых значений к той или иной местности.

В работе (Moreno Ruiz et al., 2012) предложена функциональная схема алгоритма, показавшего хорошие результаты при обнаружении гарей в бореальных лесах. Детектирование гарей с помощью этого метода осуществляется в два этапа. На первом этапе происходит выделение потенциально выгоревших участков с помощью порогового алгоритма, основанного на определении гарей по наибольшим значениям индекса BBFI (Burned Boreal Forest Index). В качестве вспомогательных параметров используются значения альбедо в 1-м и 2-м каналах AVHRR, значения радиояркостной температуры по 3-му каналу AVHRR и значения вегетационного индекса GEMI (Global Environmental Monitoring Index). Для каждого отдельного года производится расчёт указанных параметров за 10-дневные интервалы, полученные значения затем сравниваются с аналогичными значениями за предыдущий и последующий годы для исключения повторного картирования гарей. На втором этапе осуществляется валидация выделенных участков с помощью заранее обученной на тестовом наборе данных байесовской сети, результаты которой сильно зависят от качества исходного набора данных, на котором происходит её обучение.

Для территории Восточной Сибири на сегодняшний день отсутствует наземная информация с результатами достоверного картирования гарей за продолжительный период, поэтому в качестве обучающего набора данных часто используются данные MODIS. Однако, как выяснилось в ходе работы, алгоритм MODIS может выдавать недостоверные гари на местности со сложным рельефом и/или типом подстилающей поверхности, которые в дальнейшем могут быть «унаследованы» байесовской сетью.

Примеры ложного срабатывания алгоритма детектирования гарей по данным MODIS (продукт MCD64A1 C6) показаны на *рис. 2* (см. с. 141). На *рис. 2а*, *б* приведён снимок местности вблизи р. Вилюй, полученный 7 августа 2013 г. со спутника Landsat-8 (разрешение 30 м); жёлтой линией отмечены границы гарей (продукт MCD64A1 C6), красными точками — «хотсопты» MODIS за пожароопасный сезон 2013 г. Расположенные в правой части *рис. 2б* выделенные гари совпадают с множеством зарегистрированных «хотспотов», что свидетельствует о том, что на данной территории действительно наблюдались пожары. Дополнительно достоверность выделенных гарей по информации MODIS (в данном случае) подтверждается визуально наблюдаемыми гарями на космоснимке Landsat-8 (см. *рис. 2а*). Однако алгоритм MODIS также обнаруживает «гари», приходящиеся на участки с песчаным покрытием (см. *рис. 2а*, *б*, светлые участки).

На *рис. 2в*, *г* приведён снимок 2-го канала MODIS с разрешением 250 м (продукт MOD02QKM) за 15 сентября 2002 г.; жёлтой линией отмечена граница гари (продукт MCD64A1 C6); красными точками показаны «хотспоты» за 2002 г. Достоверность гари, отчётливо наблюдаемой на *рис. 2в*, подтверждается наличием на этом участке многочисленных «хотспотов» (см. *рис. 2г*), тогда как остальные «гари» не подтверждаются ни визуально, ни «хотспотами», ни дымовыми шлейфами за 2002 г., что делает достоверность этих гарей крайне сомнительной.

На *рис. 2д*, *е* приведены снимки различных участков Верхоянского хребта, сделанные со спутника Landsat-8 (разрешение 30 м) 5 сентября 2016 г., где границы детектированных по данным MODIS гарей (MCD64A1 C6) показаны жёлтой линией. Однако в течение 2016 г. на данных участках не зарегистрировано ни одного «хотспота», дымовые шлейфы также отсутствуют. Аналогичная ситуация с выделением ложных гарей в горной местности наблюдается достаточно регулярно. Также нередки случаи, когда «гари» по данным MODIS обнаруживаются на высоких широтах и далеко не в летнее время, что делает их достоверность крайне маловероятной.

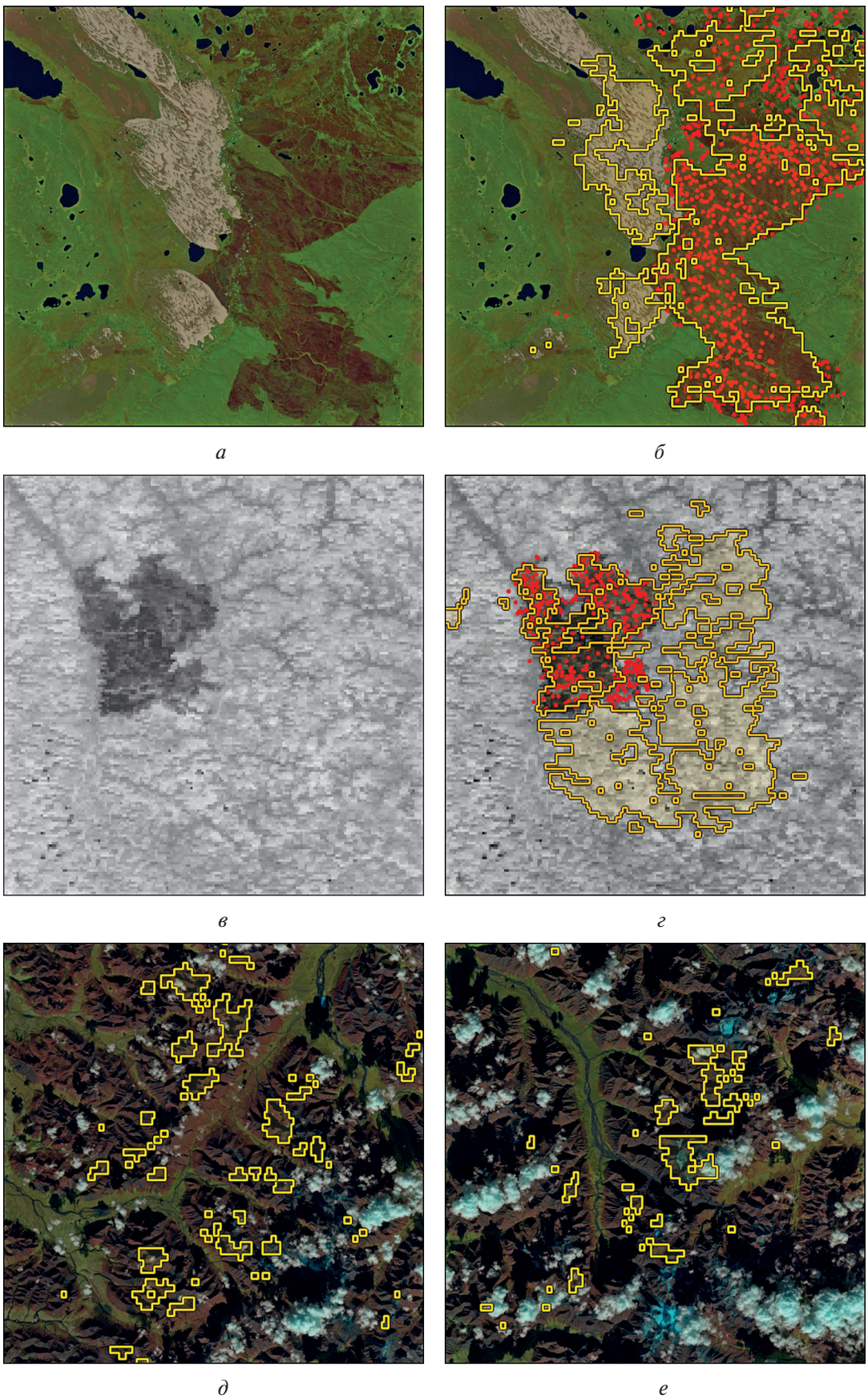
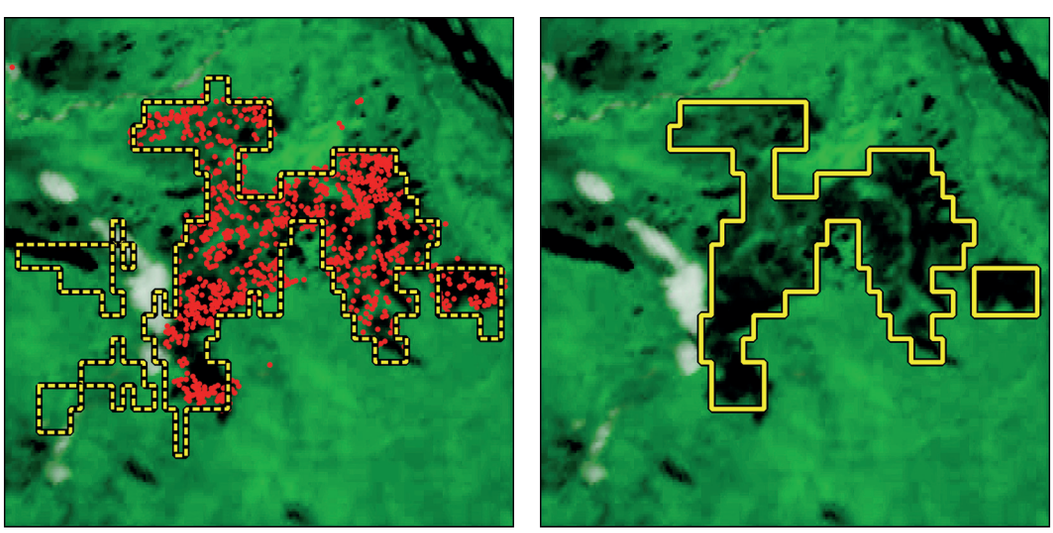


Рис. 2. Снимок Landsat-8 (30 м) за 07.08.2013 (*а*, *б*); снимок MODIS (250 м) за 15.09.2002 (*в*, *г*); снимки Landsat-8 (30 м) за 05.09.2016 (*д*, *е*). Жёлтыми линиями отмечены границы гарей по продукту MCD64A1 C6, красными точками — «хотспоты» MODIS за соответствующие года

Уровень достоверности обнаруженных гарей можно повысить, отсеяв ложные на основе экспертной оценки, сделанной с привлечением дополнительных критериев. Для этого гари, детектированные с помощью порогового этапа алгоритма, разработанного по функциональной схеме (Moreno Ruiz et al., 2012), подвергаются валидации в следующей последовательности. На первом этапе исключаются гари, совпадающие с водными объектами. Далее происходит сопоставление с гарями предыдущего года: на этом этапе отсеиваются гари, не относящиеся к текущему году. На следующем шаге процедуры валидации привлекаются «хотспоты», которые были обнаружены в течение пожароопасного сезона по данным AVHRR с помощью алгоритма (Li et al., 2000). Если на участке локализации гари обнаруживаются «хотспоты», то она идентифицируется как достоверная, в противном случае процесс валидации продолжается с использованием снимков 2-го канала радиометра AVHRR (LAC, GAC). Достоверность гари в такой ситуации подтверждается визуально наблюдаемым на снимке высококонтрастным тёмным объектом (с низкими значениями альбедо) и/или характерными дымовыми шлейфами. В наиболее сложных случаях анализируются данные о рельефе подстилающей поверхности, типе растительности и почвы местности, сроках космосъёмки и пр. Безусловно, такой подход требует выполнения «ручной» работы, объём которой зависит от размеров обрабатываемой территории, поэтому его применение оправдано в региональных масштабах.

Обсуждение результатов

На *рис. 3* приведён пример выделения гарей по данным LTDR в августе 2013 г. на левом берегу р. Вилюй методом комбинированного подхода. В результате обработки данных LTDR пороговый алгоритм выделил потенциальные гари (см. *рис. 3а*, участки, оконтуренные прерывистой жёлтой линией). Растровой подложкой рисунка послужил соответствующий снимок AVHRR (1 км) с нанесёнными «хотспотами» (красные точки), обнаруженными по данным AVHRR за пожароопасный сезон 2013 г. На этапе валидации отсутствие «хотспотов» на некоторых выделенных потенциальных гарях послужило основанием для эксперта интерпретировать их как ложные и исключить из конечного продукта (см. *рис. 3б*). Сравнивая результаты с продуктом MCD64A1 (см. *рис. 2б*), надо отметить, что, выполнив более точное оконтуривание границ реальных гарей, алгоритм детектирования MODIS в данном случае не сумел отфильтровать ложные гари, которые пришлись на песчаные участки (см. *рис. 2а*, *б*).



а *б*

Рис. 3. Пример выделения гари на участке со сложным типом поверхности: *а* — потенциально выгоревшие участки, детектированные пороговым алгоритмом по данным LTDR (прерывистые жёлтые линии) и «хотспоты» AVHRR за 2013 г. (красные точки); *б* — окончательный результат выделения гари после экспертной оценки (жёлтые линии). Подложка — снимок AVHRR от 07.08.2013

На *рис. 4* представлены результаты обработки данных AVHRR с помощью комбинированного подхода (КП) (красная линия), данные MODIS MCD64A1 C6 (синяя линия) и данные GFED-4 (чёрная линия). На *рис. 5* показаны результаты сопоставления данных КП с данными MODIS и GDFED-4. Как видно из рисунков, полученные в работе количественные оценки выгоревшей территории хорошо согласуются с данными MODIS в период с 2001 по 2016 г. и данными GFED-4 в период с 1995 по 2016 г. Значения коэффициента корреляции составили 0,98 ($P < 0{,}001$) и 0,94 ($P < 0{,}001$) для MCD64A1 C6 и GFED-4 соответственно, что позволяет применить комбинированный подход ко всему набору данных AVHRR (LTDR) с 1984 г. Величина средней относительной ошибки (MAPE) для данных MODIS составила 16,5 %, для GFED-4 — 40,6 %.

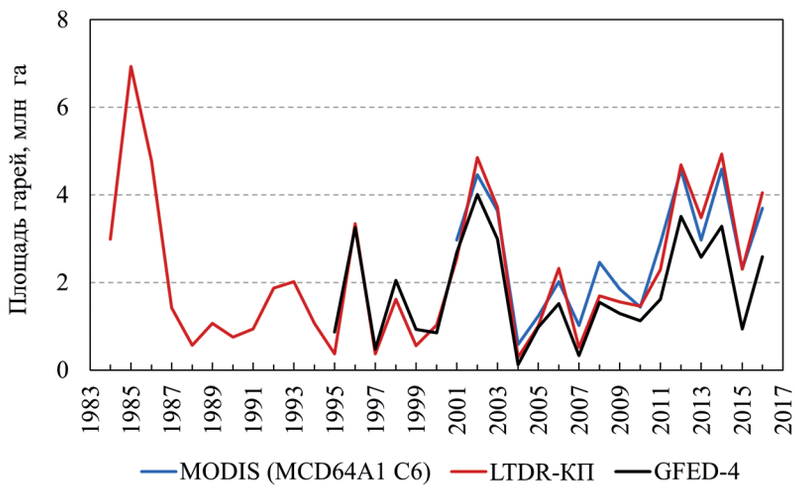
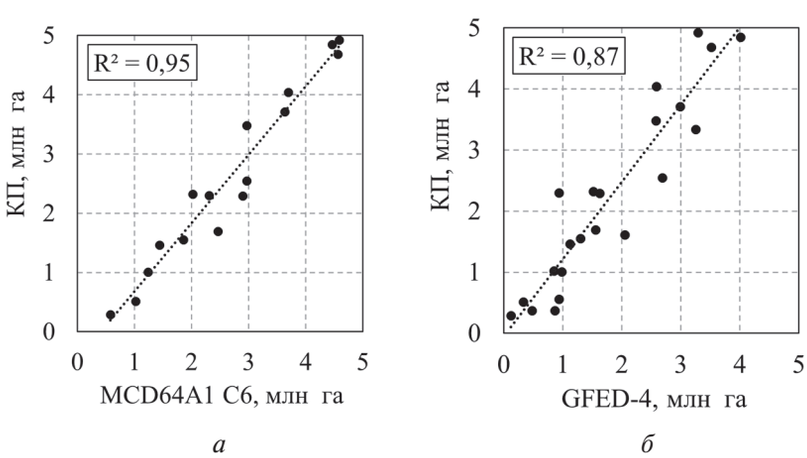


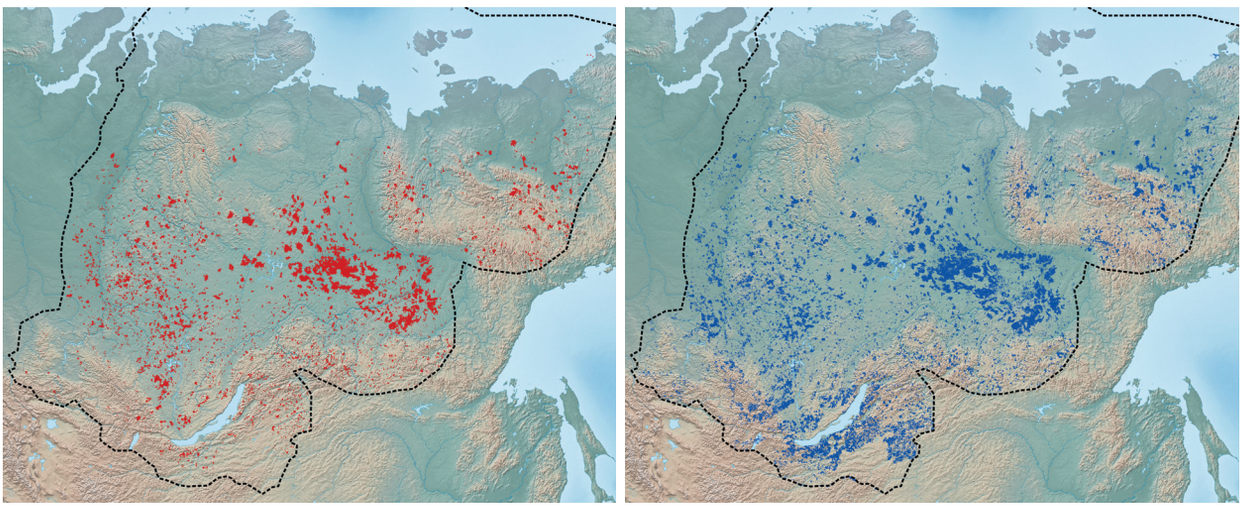
Рис. 4. Межгодовые вариации площадей гарей по данным комбинированного подхода, GFED-4 и MCD64A1 C6



а *б*

Рис. 5. Сравнение площадей гарей: *а* — по данным КП и MCD64A1 C6; *б* — по данным КП и GFED-4

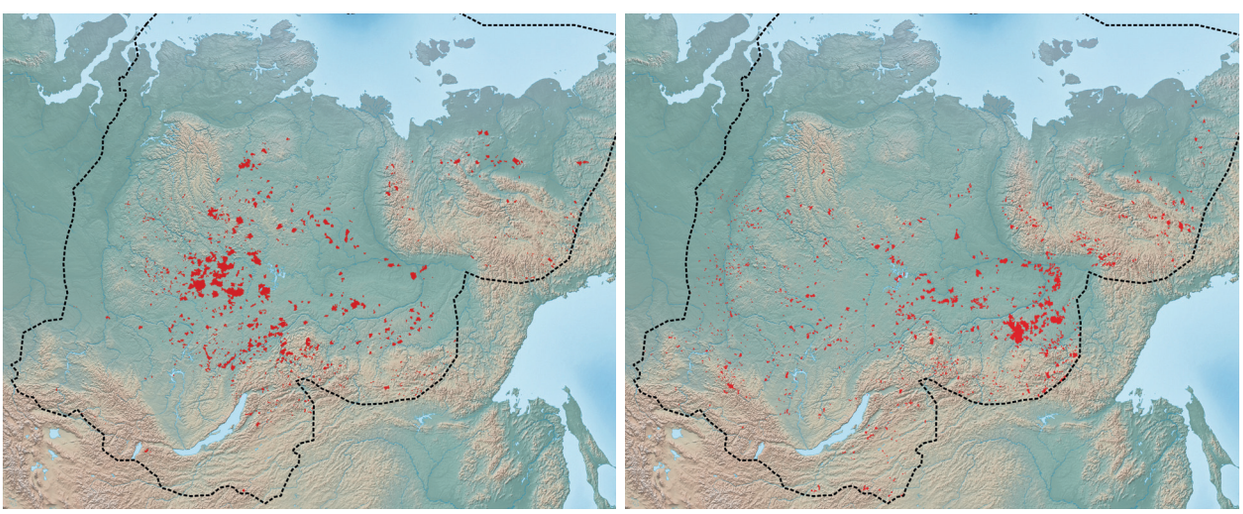
На *рис. 6* представлены карты гарей лесных пожаров на территории Восточной Сибири за 2001–2016 гг.: на левой панели рисунка показаны гари, полученные методом КП (красные точки), на правой — по данным MODIS (синие точки). Как видно из рисунка, наблюдается хорошее согласие пространственного расположения гарей, полученных в данной работе, с пространственной конфигурацией гарей MODIS. Однако следует отметить, что по данным MODIS заметно лучше выделяются мелкомасштабные гари, что обусловлено более высоким разрешением продукта MODIS (500 м) по сравнению с данными КП (~6 км).



а *б*

Рис. 6. Карты гарей КП (*а*) и MCD64A1 C6 (*б*) за 2001–2016 гг.

На *рис. 7* приведены сводные карты гарей за 1980-е (*а*) и 1990-е (*б*) годы, обнаруженные с помощью комбинированного подхода. На *рис. 5а* видно, что набольшее количество крупных лесных пожаров в 1980-е гг. произошло в центральной части Восточной Сибири, на границе Красноярского края, Иркутской области и Якутии. В 1990-е гг. (см. *рис. 5б*) большая часть крупных пожаров была зафиксирована на территории Якутии, вдоль р. Алдан.



а *б*

Рис. 7. Сводные карты гарей за 1980-е (*а*) и 1990-е (*б*) годы по данным КП

Заключение

С помощью комбинированного подхода, включающего валидацию обнаруженных пороговым алгоритмом гарей на основе экспертной оценки, были детектированы гари лесных пожаров на территории Восточной Сибири по данным AVHRR/NOAA (проект LTDR) за период 1984–2016 гг.

Анализ сопоставления результатов обработки данных AVHRR (LTDR) с данными MODIS показал, что для некоторых участков со сложным ландшафтом подстилающей поверхности продукт MCD64A1 C6 (2001–2016) выдаёт ложные гари. Валидация результатов детектирова-

ния на основе экспертного анализа позволяет избежать упомянутых ошибок и повышает достоверность детектирования гарей.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными MODIS и GFED-4: коэффициенты корреляции составили ~0,95 и ~0,87, а средние относительные ошибки — 16,5 и 40,6 % соответственно. Также хорошо согласуются пространственные распределения гарей. Заметный процент относительных ошибок во многом обусловлен разницей пространственных разрешений снимков MODIS и AVHRR (LTDR); данные GFED-4 построены по снимкам MODIS и ATSR. В юго-западной части Восточной Сибири, к западу от оз. Байкал, количество гарей по данным комбинированного подхода ниже по сравнению с данными MODIS. Это обусловлено тем, что гари в этой части Восточной Сибири часто имеют небольшие размеры и с учётом более низкого разрешения данных LTDR по сравнению с данными MODIS вероятность их обнаружения оказывается заведомо ниже.

В целом валидация гарей на основе экспертной оценки обеспечила более высокий (по сравнению с полностью автоматизированными алгоритмами) уровень достоверности детектирования гарей, особенно на участках с горным рельефом, сложной текстурой земной поверхности, типом растительного покрова и/или расположенных на высоких широтах, что и было показано в работе.

Работа частично поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации и Сибирским отделением Российской академии наук (проект II.16.1.7).

Литература

1. *Барталев С. А.*, *Лупян Е. А.*, *Стыценко Ф. В.*, *Панова О. Ю.*, *Ефремов В. Ю.* Экспресс-картографирование повреждений лесов России пожарами по спутниковым данным Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 9–20.
2. *Гинзбург А. С.*, *Губанова Д. П.*, *Минашкин В. М.* Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Российский хим. журн. 2008. Т. LII. № 5. С. 112–119.
3. *Ершов Д. В.*, *Ковганко К. А.*, *Сочилова Е. Н.* ГИС-технология оценки пирогенных эмиссий углерода по данным Terra-Modis и государственного учета лесов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 2. С. 365–372.
4. *Замолодчиков Д.*, *Краев Г.* Влияние изменений климата на леса России: зафиксированные воздействия и прогнозные оценки // Устойчивое лесопользование. 2016. № 4(48). С. 23–31.
5. *Кондратьев К. Я.*, *Григорьев А. А.* Лесные пожары как компонент природной экодинамики // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17. № 04. С. 279–292.
6. *Лыткина Л. П.*, *Миронова С. И.* Послепожарная сукцессия в лесах криолитозоны (на примере Центральной Якутии) // Экология. 2009. № 3. С. 168–173.
7. Национальный атлас России. В 4-х т. Т. 2. Природа. Экология. М.: ПКО «Картография», 2007. 496 с.
8. *Соловьев В. С.*, *Будищев А. А.* Возмущения аэрозольной оптической толщины атмосферы, вызванные лесными пожарами в Якутии // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 7. С. 626–629.
9. *Соловьев В. С.*, *Козлов В. И.*, *Муллаяров В. А.* Дистанционный мониторинг лесных пожаров и гроз в Якутии. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 2009. 108 с.
10. *Томшин О. А.*, *Соловьев В. С.* Исследование крупномасштабных неоднородностей аэрозольных полей, вызванных лесными пожарами в Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 7. С. 598–602.
11. *Томшин О. А.*, *Соловьев В. С.* Особенности лесопожарной активности в бореальных лесах мерзлотного региона Восточной Сибири // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 261–271.
12. *Швиденко А. З.*, *Щепащенко Д. Г.* Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.
13. *Щербаков И. П.*, *Забелин О. Ф.*, *Карпель Б. А.* Лесные пожары в Якутии и их влияние на природу леса. Новосибирск: Наука, 1979. 226 с.
14. *Bertschi I. T.*, *Jaffe D. A.* Long-range transport of ozone, carbon monoxide, and aerosols to the NE Pacific troposphere during the summer of 2003: observations of smoke plumes from Asian boreal fires // J. Geophysical Research. 2005. V. 110. No. D5. P. D05303.

15. *Brewer C. K.*, *Winne J. C.*, *Redmond R. L.*, *Opitz D. W.*, *Mangrich M. V.* Classifying and mapping wildfire severity: a comparison of methods // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2005. V. 71. No. 11. P. 1311–1320.
16. *Fraser R. H.*, *Li Z.*, *Landry R.* SPOT-VEGETATION for characterising boreal forest fires // Intern. J. Remote Sensing. 2000. V. 21. No. 18. P. 3525–3532.
17. *Giglio L.*, *Randerson J. T.*, *van der Werf G. R.* Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth generation global fire emissions database (GFED4) // J. Geophysical Research: Biogeosciences. 2013. V. 118. No. 1. P. 317–328.
18. *Giglio L.*, *Boschetti L.*, *Roy D. P.*, *Humber M. L.*, *Justice C. O.* The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 217. P. 72–85.
19. *Heilman W. E.*, *Liu Y.*, *Urbanski S.*, *Kovalev V.*, *Mickler R.* Wildland fire emissions, carbon, and climate: Plume rise, atmospheric transport, and chemistry processes // Forest Ecology and Management. 2014. V. 317. P. 70–79.
20. *Li Z.*, *Kaufman Y. J.*, *Ichoku C.*, *Fraser R.*, *Trishchenko A.*, *Giglio L.*, *Jin J.*, *Yu X.* A Review of AVHRR-based Active Fire Detection Algorithms: Principles, Limitations, and Recommendations // Global and Regional Vegetation Fire Monitoring from Space: Planning a Coordinated International Effort. Hague: SPB Academic Publishing BV, 2000. P. 199–225.
21. *Mitri G. H.*, *Gitas I. Z.* A semi-automated object-oriented model for burned area mapping in the Mediterranean region using Landsat-TM imagery // Intern. J. Wildland Fire. 2004. V. 13. No. 3. P. 367–376.
22. *Moreno Ruiz J. A.*, *Riaño D.*, *Arbelo M.*, *French N. H. F.*, *Ustin S. L.*, *Whiting M. L.* Burned area mapping time series in Canada (1984–1999) from NOAA-AVHRR LTDR: A comparison with other remote sensing products and fire perimeters // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 117. P. 407–1414.
23. *Pedelty J.*, *Devadiga S.*, *Masuoka E.*, *Brown M.*, *Pinzon J.*, *Tucker C.*, *Vermote E.*, *Prince S.*, *Nagol J.*, *Justice C.*, *Roy D.*, *Junchang J.*, *Schaaf C.*, *Jicheng L.*, *Privette J.*, *Pinheiro A.* Generating a long-term land data record from the AVHRR and MODIS Instruments // IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. Barcelona, 2007. P. 1021–1025.
24. *Pu R.*, *Gong P.* Determination of burnt scars using logistic regression and neural network techniques from a single post-fire Landsat 7 ETM+ image // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2004. V. 70. No. 7. P. 841–850.
25. *Röder A.*, *Hill J.*, *Duguy B.*, *Alloza J. A.*, *Vallejo R.* Using long time series of Landsat data to monitor fire events and post-fire dynamics and identify driving factors. A case study in the Ayora region (eastern Spain) // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112. No. 1. P. 259–273.
26. *Rogan J.*, *Yool S. R.* Mapping fire-induced vegetation depletion in the Peloncillo Mountains Arizona and New Mexico // Intern. J. Remote Sensing. 2001. V. 22. No. 16. P. 3101–3121.
27. *Sapkota A.*, *Symons J. M.*, *Kleissl J.*, *Wang L.*, *Parlange M. B.*, *Ondov J.*, *Breysse P. N.*, *Diette G. B.*, *Eggleston P. A.*, *Buckley T. J.* Impact of the 2002 Canadian forest fires on particulate matter air quality in Baltimore city // Environmental Science and Technology. 2005. V. 39. No. 1. P. 24–32.
28. *Tomshin O. A.*, *Solovyev V. S.* The impact of large-scale forest fires on atmospheric aerosol characteristics // Intern. J. Remote Sensing. 2014. V. 35. No. 15. P. 5742–5749.
29. *Tomshin O. A.*, *Solovyev V. S.* Detection of burnt areas in Yakutia on long-term NOAA satellites data (1985–2015) // Proc. SPIE on 24th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2018. V. 10833. P. 108338B.
30. *van der Werf G. R.*, *Randerson J. T.*, *Giglio L.*, *Collatz G. J.*, *Mu M.*, *Kasibhatla P. S.*, *Morton D. C.*, *Defries R. S.*, *Jin Y.*, *Van Leeuwen T. T.* Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009) // Atmospheric Chemistry and Physics. 2010. V. 10. No. 23. P. 11707–11735.

Combined approach to burned area mapping in Eastern Siberia using AVHRR/NOAA data (1984–2016)

O. A. Tomshin, V. S. Solovyev

Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS
Yakutsk 677980, Russia
E-mail: tomshinoa@gmail.com
M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk 677000, Russia
E-mail: solovyev@ikfia.ysn.ru

The paper presents the results of burned area (BA) mapping in Eastern Siberian forests using LTDR project data. A combined approach that includes expert assessment of burned areas detected by threshold algorithm is proposed. Comparison with MODIS (MCD64A1 C6, 2001–2016) and GFED-4 (1995–2016) data shows good agreement with correlation coefficients of ~0.95, ~0.87 and average relative errors 16.5% and 40.6 %, respectively. Analysis of the spatial distribution of BA shows that in the territory west of the Baikal the quality of BA detection is somewhat degraded. This decrease is due to generally smaller size of BA in this region and, given lower resolution of the LTDR data as compared to the MODIS data, the probability of their detection is lower. The combined approach shows that in some regions that have a complex landscape MODIS data often provide unreliable results. Annual maps of BA in Eastern Siberia are constructed for 1984–2016. It is concluded that the use of a combined approach based on expert assessment with additional conditions provides a higher (compared to fully automated algorithms) level of confidence in BA detection, especially over areas with mountainous terrain, complex ground surface texture, vegetation type and/or over areas located at high latitudes, where the occurrence of wildfires is extremely unlikely.

Keywords: burned area, forest fires, remote sensing

Accepted: 04.04.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-137-149

References

1. Bartalev S. A., Loupian E. A., Stytsenko F. V., Panova O. Yu., Efremov V. Yu., Ekspress-kartografirovanie povrezhdenii lesov Rossii pozharami po sputnikovym dannym Landsat (Rapid mapping of forest burnt areas over Russia using Landsat data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 9–20.
2. Ginzburg A. S., Gubanova D. P., Minashkin V. M., Vliyanie estestvennykh i antropogennykh aerozolei na global'nyi i regional'nyi klimat (The impact of natural and anthropogenic aerosols on the global and regional climate), *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*, 2008, Vol. LII, No. 5, pp. 112–119.
3. Ershov D. V., Kovganko K. A., Sochilova E. N., GIS-tekhnologiya otsenki pirogennykh emissii ugleroda po dannym Terra-Modis i gosudarstvennogo ucheta lesov (GIS technology for estimating pyrogenic carbon emissions from Terra-Modis data and state forest inventory), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 6, No. 2, pp. 365–372.
4. Zamolodchikov D., Kraev G., Vliyanie izmenenii klimata na lesa Rossii: zafiksirovannye vozdeistviya i prognoznye otsenki (Impact of climate change on Russia's forests: recorded impacts and predictive estimates), *Ustoichivoe lesopol'zovanie*, 2016, No. 4(48), pp. 23–31.
5. Kondrat'ev K. Ya., Grigor'ev A. A., Lesnye pozhary kak komponent prirodnoi ekodinamiki (Forest fires as a component of natural ecodynamics), *Optika atmosfery i okeana*, 2004, Vol. 17, No. 4, pp. 279–292.
6. Lytkina L. P., Mironova S. I., Poslepozharnaya suktsessiya v lesakh kriolitozony (na primere Tsentral'noi Yakutii) (Post-fire succession in the forests of the permafrost zone (on example of Central Yakutia)), *Ekologiya*, 2009, No. 3, pp. 168–173.
7. *Natsional'nyi atlas Rossii*, *V 4 t.*, *T. 2*, *Priroda. Ekologiya* (National Atlas of Russia, Vol. 2: Nature. Ecology), Moscow: PKO "Kartografiya", 2007, 496 p.

8. Solovyev V. S., Budishchev A. A., Vozmushcheniya aerozol'noi opticheskoi tolshchiny atmosfery, vyzvannye lesnymi pozharami v Yakutii (Disturbances of aerosol optical thickness of atmosphere caused by forest fires in Yakutia), *Optika atmosfery i okeana*, 2010, Vol. 23, No. 7, pp. 626–629.
9. Solovyev V. S., Kozlov V. I., Mullayarov V. A., *Distantsionnyi monitoring lesnykh pozharov i groz v Yakutii* (Remote monitoring of forest fires and thunderstorms in Yakutia), Yakutsk: YaNTs SO RAN, 2009, 108 p.
10. Tomshin O. A., Solovyev V. S., Issledovanie krupnomasshtabnykh neodnorodnostei aerozol'nykh polei, vyzvannykh lesnymi pozharami v Sibiri (Studying of large-scale inhomogeneities of aerosol fields caused by forest fires in Siberia), *Optika atmosfery i okeana*, 2016, Vol. 29, No. 7, pp. 598–602.
11. Tomshin O. A., Solovyev V. S., Osobennosti lesopozharnoi aktivnosti v boreal'nykh lesakh merzlotnogo regiona Vostochnoi Sibiri (Features of forest fire activity in boreal forests of the permafrost region of Eastern Siberia), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 261–271.
12. Shvidenko A. Z., Shchepashchenko D. G., Klimaticheskie izmeneniya i lesnye pozhary v Rossii (Climate change and forest fires in Russia), *Lesovedenie*, 2013, No. 5, pp. 50–61.
13. Shcherbakov I. P., Zabelin O. F., Karpel B. A., *Lesnye pozhary v Yakutii i ikh vliyanie na prirodu lesa* (Forest fires in Yakutia and their impact on the nature of the forest), Novosibirsk: Nauka, 1979, 226 p.
14. Bertschi I. T., Jaffe D. A., Long-range transport of ozone, carbon monoxide, and aerosols to the NE Pacific troposphere during the summer of 2003: observations of smoke plumes from Asian boreal fires, *J. Geophysical Research*, 2005, Vol. 110, No. D5, p. D05303.
15. Brewer C. K., Winne J. C., Redmond R. L., Opitz D. W., Mangrich M. V., Classifying and mapping wildfire severity: a comparison of methods, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2005, Vol. 71, No. 11, pp. 1311–1320.
16. Fraser R. H., Li Z., Landry R., SPOT-VEGETATION for characterising boreal forest fires, *Intern. J. Remote Sensing*, 2000, Vol. 21, No. 18, pp. 3525–3532.
17. Giglio L., Randerson J. T., van der Werf G. R., Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4), *J. Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, Vol. 118, No. 1, pp. 317–328.
18. Giglio L., Boschetti L., Roy D. P., Humber M. L., Justice C. O., The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 217, pp. 72–85.
19. Heilman W. E., Liu Y., Urbanski S., Kovalev V., Mickler R., Wildland fire emissions, carbon, and climate: Plume rise, atmospheric transport, and chemistry processes, *Forest Ecology and Management*, 2014, Vol. 317, pp. 70–79.
20. Li Z., Kaufman Y. J., Ichoku C., Fraser R., Trishchenko A., Giglio L., Jin J., Yu X., A Review of AVHRR-based Active Fire Detection Algorithms: Principles, Limitations, and Recommendations, In: *Global and Regional Vegetation Fire Monitoring from Space: Planning a Coordinated International Effort*, Hague: SPB Academic Publishing BV, 2000, pp. 199–225.
21. Mitri G. H., Gitas I. Z., A semi-automated object-oriented model for burned area mapping in the Mediterranean region using Landsat-TM imagery, *Intern. J. Wildland Fire*, 2004, Vol. 13, No. 3, pp. 367–376.
22. Moreno Ruiz J. A., Riaño D., Arbelo M., French N. H. F., Ustin S. L., Whiting M. L., Burned area mapping time series in Canada (1984–1999) from NOAA-AVHRR LTDR: A comparison with other remote sensing products and fire perimeters, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 117, pp. 407–414.
23. Pedelty J., Devadiga S., Masuoka E., Brown M., Pinzon J., Tucker C., Vermote E., Prince S., Nagol J., Justice C., Roy D., Junchang J., Schaaf C., Jicheng L., Privette J., Pinheiro A., Generating a long-term land data record from the AVHRR and MODIS Instruments, *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, Proc. Conf., Barcelona, 2007, pp. 1021–1025.
24. Pu R., Gong P., Determination of burnt scars using logistic regression and neural network techniques from a single post-fire Landsat 7 ETM+ image, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2004, Vol. 70, No. 7, pp. 841–850.
25. Röder A., Hill J., Duguy B., Alloza J. A., Vallejo R., Using long time series of Landsat data to monitor fire events and post-fire dynamics and identify driving factors. A case study in the Ayora region (eastern Spain), *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, No. 1, pp. 259–273.
26. Rogan J., Yool S. R., Mapping fire-induced vegetation depletion in the Peloncillo Mountains Arizona and New Mexico, *Intern. J. Remote Sensing*, 2001, Vol. 22, No. 16, pp. 3101–3121.
27. Sapkota A., Symons J. M., Kleissl J., Wang L., Parlange M. B., Ondov J., Breysse P. N., Diette G. B., Eggleston P. A., Buckley T. J., Impact of the 2002 Canadian forest fires on particulate matter air quality in Baltimore city, *Environmental Science and Technology*, 2005, Vol. 39, No. 1, pp. 24–32.
28. Tomshin O. A., Solovyev V. S., The impact of large-scale forest fires on atmospheric aerosol characteristics, *Intern. J. Remote Sensing*, 2014, Vol. 35, No. 15, pp. 5742–5749.

29. Tomshin O. A., Solovyev V. S., Detection of burnt areas in Yakutia on long-term NOAA satellites data (1985–2015), *Proc. SPIE on 24th Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 2018, Vol. 10833, p. 108338B.
30. van der Werf G. R., Randerson J. T., Giglio L., Collatz G. J., Mu M., Kasibhatla P. S., Morton D. C., Defries R. S., Jin Y., Van Leeuwen T. T., Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, Vol. 10, No. 23, pp. 11707–11735.