

П.К. Янец, С.А. Иванова, Ю.Г. Данилов
СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ GOOGLE EARTH ENGINE (GEE) И СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ LANDSAT ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Аннотация. Проблема лесных пожаров становится все более заметной как в глобальном, так и в местном масштабе. Пожары в Якутии являются серьезной проблемой. Бореальные леса играют важную роль в глобальном потеплении и циркуляции углекислого газа. Изменения пожарного режима и климата в этом регионе уже начались, и это оказывает влияние на углеродную динамику в региональном и глобальном масштабе. Все чаще при изучении пожаров используются спутниковые данные. В последние годы при обработке спутниковых данных используются так называемые «большие данные». Чтобы правильно оценить масштаб угрозы, необходимо разработать эффективную методику оценки послепожарных характеристик. Для исследований были выбраны данные с сенсора MODIS Collection 6 из-за их большей доступности и достаточного пространственного разрешения для нашей работы. Использованы данные за период с 2001 по 2019 год из пожарного архива FIRMS. В данной статье представлен метод определения некоторых характеристик пожаров с использованием «больших данных» и платформы Google Earth Engine. Алгоритмы, созданные для определения основных послепожарных характеристик, были применены на примере Верхоянского района Якутии. Результаты приведены на примере пожаров в период 2001-2019 годов. Для анализа использовались данные программы FIRMS из инструмента Modis и VIIRIS, а также данные Landsat.

Ключевые слова: лесной пожар, Якутия, Верхоянский район, Landsat, FIRMS, Google Earth Engine, большие данные, NBR.

P.K. Janiec, S.A. Ivanova, Y.G. Danilov
M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

USING GOOGLE EARTH ENGINE (GEE) AND LANDSAT SATELLITE IMAGES TO DETECT FOREST FIRES

Abstract. The problem of forest fires is becoming more and more visible both globally and locally. Fires in Yakutia are a serious problem. Boreal forests play an important role in global warming and carbon dioxide circulation. Changes in the fire regime and climate in this region have already begun, and this has an impact on

ЯНЕЦ Петр Кжуштоф – аспирант Эколого-географического отделения Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова. E-mail: piotrjaniec2@gmail.com

JANIEC Petr Kzhushstof – post-graduate student, Ecological and Geographical Division, Institute of Natural Sciences, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University. E-mail: piotrjaniec2@gmail.com

ИВАНОВА Светлана Алексеевна – к.п.н., доцент Эколого-географического отделения Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова. E-mail: sa.ivanova@s-vfu.ru

IVANOVA Svetlana Alekseevna – Candidate of Pedagogical Science, Associate Professor, Ecological and Geographical Division, Institute of Natural Sciences, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University. E-mail: sa.ivanova@s-vfu.ru

ДАНИЛОВ Юрий Георгиевич – к.г.н., доцент Эколого-географического отделения Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова. E-mail: iug.danilov@s-vfu.ru

DANILOV Yuri Gerogievich – Candidate of Geographic Sciences, Associate Professor, Ecological and Geographical Division, Institute of Natural Sciences, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University. E-mail: iug.danilov@s-vfu.ru

carbon dynamics on a regional and global scale. Increasingly, satellite data is being used to study fires. In recent years, so-called “Big Data” has been used in the processing of satellite data. In order to correctly assess the magnitude of the threat, it is necessary to develop an effective methodology for assessing post-fire performance. Data from the MODIS Collection 6 sensor were chosen for research because of their greater availability and sufficient spatial resolution for our work. We used data for the period from 2001 to 2019 from the FIRMS fire archive. This article presents a method for determining some of the characteristics of fires using Big Data and the Google Earth Engine platform. Algorithms created to determine the main post-fire characteristics were applied on the example of the Verkhoyansk region of Yakutia. The results are given on the example of fires in Verkhoyansk district of Yakutia in the period 2001 – 2019. For the analysis, data from the FIRMS program from the Modis and VIIRS instruments, as well as Landsat data were used.

Keywords: forest fire, Yakutia, Verkhoyansk district, Landsat, FIRMS, Google Earth Engine, big data, NBR.

Введение

В последние десятилетия тема лесных пожаров становится все более актуальной. Лесные пожары являются одной из основных причин экологического ущерба. Особенно катастрофические пожары, площадь которых превышает 500 га, вызывают сильные нарушения в дикой природе, вызывая длительные и вредные изменения, а также способствуют формированию парникового эффекта. В среднем за год в мире образуется несколько сотен тысяч лесных пожаров. На территории Российской Федерации с начала пожароопасного периода 2019 г. возникло более 14,4 тыс. очагов природных пожаров на общей площади свыше 10 078 млн. га [1].

Одна из самых сложных ситуаций наблюдается в Республике Саха (Якутия). Бореальные леса играют важную роль в глобальном потеплении и циркуляции углекислого газа. Изменения пожарного режима и климата в этом регионе уже начались, и это оказывает влияние на углеродную динамику в региональном и глобальном масштабе. Наиболее значительные изменения связаны с бореальными лесными массивами [2]. На такой обширной и труднодоступной территории, как бореальные леса, полевые исследования невозможны и нерентабельны. Не вызывает сомнения факт, что Якутия очень важна в глобальной экосистеме. Тем не менее региону уделяется слишком мало внимания. Большая территория, неразвитая сеть дорожной инфраструктуры и низкая плотность населения затрудняют исследования в этой части мира. Чтобы правильно оценить масштаб угрозы, необходимо разработать эффективную методику оценки послепожарных характеристик. Этот метод должен быть простым, точным, дешевым и быстрым. Для реализации этих целей необходимо использовать данные дистанционного зондирования и так называемые «big data».

Для исследований были выбраны данные с сенсора MODIS Collection 6 из-за их большей доступности и достаточного пространственного разрешения для нашей работы. Использованы данные за период с 2001 по 2019 год из пожарного архива FIRMS. Версия Earth Engine набора данных Fire Information for Resource Management System (FIRMS) содержит продукт обнаружения пожара LANCE в растеризованном виде. Для работы с таким количеством данных была выбрана платформа геопространственной обработки данных «Google Earth Engine» (GEE) на базе Google Cloud Platform. Алгоритмы, созданные для определения основных послепожарных характеристик, были применены на примере Верхоянского района Якутии.

Материалы и методы исследования

В качестве исследовательского региона был выбран Верхоянский район Республики Саха Якутия. Этот регион был выбран вследствие большого количества пожаров в последние годы и большой изменчивости климатических и разнообразию орографических условий.

В Республике Саха (Якутия) открытых данных о лесных пожарах с геопривязкой нет. Есть база данных о лесных пожарах Минприроды (<https://minpriroda.sakha.gov.ru>), но эти данные являются табличными, и без географической привязки невозможно создать базу данных ГИС, необходимую для данного вида исследований. В дополнение к этим данным использовано два источника данных дистанционного зондирования. Данные систем Modis (FIRMS) и Landsat.

Данные систем Modis собираются с 2001 г. по настоящее время. Для исследований были выбраны данные с сенсора MODIS Collection 6 из-за их большей доступности и достаточного пространственного разрешения для нашей работы. Использованы данные за период с 2001 по 2019 год из пожарного архива FIRMS. Версия Earth Engine набора данных Fire Information for Resource Management System (FIRMS) содержит продукт обнаружения пожара LANCE в растрованном виде. Активные очаги возгорания в режиме реального времени (NRT) обрабатываются LANCE с использованием стандартного продукта MODIS MOD14/MYD14 Fire and Thermal Anomalies. Каждое активное место пожара представляет собой центроид пикселя длиной 1 км, который помечается алгоритмом как содержащий один или несколько очагов возгорания внутри пикселя. Данные растрованы следующим образом: для каждой активной точки пожара определяется ограничивающая рамка (BB) длиной 1 км; идентифицируются пиксели в синусоидальной проекции MODIS, которые пересекают BB; если несколько BB пересекают один и тот же пиксель, сохраняется пиксель с большей достоверностью [3].

Второй источник данных – это продукты миссии Landsat. Использованы данные спутников Landsat 5, 7 и 8. Собраны все доступные изображения за период 2001-2019 гг. Места возможных пожаров были выбраны с использованием данных FIRMS. Вокруг каждого пожара, зарегистрированного спутником Modis, создан буфер радиусом 3 км. Затем на каждом участке, охваченном буфером, было выбрано 2 изображения: за год до пожара и через год после пожара. Критерии выбора: съемка в течение вегетационного периода, как можно меньшая облачность.

Следующим шагом было создание маски, закрывающей облака, воду и снег на каждом изображении Landsat. Целью этого было исключение из дальнейшего анализа мест, где отсутствуют возможности возгорания. Для достижения этой цели использовался канал pixel_qa, содержащийся в данных Landsat Surface Reflectance. Пример функции создания маски для данных Landsat 8, показан на рис. 1.

```
function maskL8sr(image) {
  // Bits 3 and 5 are cloud shadow and cloud, respectively.
  var cloudShadowBitMask = 1 << 3;
  var cloudsBitMask = 1 << 5;
  var waterBitMask = 1 << 2;
  var snowBitMask = 1 << 4;
  // Get the pixel QA band.
  var qa = image.select('pixel_qa');

  // Both flags should be set to zero, indicating clear
  conditions.
  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudShadowBitMask).eq(0)
    .and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask).eq(0))
    .and(qa.bitwiseAnd(waterBitMask).eq(0))
    .and(qa.bitwiseAnd(snowBitMask).eq(0));

  // Return the masked image, scaled to reflectance, without
  the QA bands.
  return image.updateMask(mask).divide(10000)
    .select("B[0-9]*")
    .copyProperties(image, ["system:time_start"]);
}
```

Рис. 1. Пример функции создания маски для данных Landsat 8

На следующем этапе была оценена тяжесть пожара. Тяжесть пожара оценивается дистанционно с использованием спектральных индексов, как по одностатейным, так и по многовременным индексным данным [4–7]. Один из показателей, представленных в качестве надежного средства картирования интенсивности пожара, называется нормализованным коэффициентом горения (NBR), вычисляемым как разность между отражением в ближнем инфракрасном (NIR) и среднем инфракрасном (MIR) диапазонах, деленная на их сумму [8]. В Landsat 4-7 (1):

$$NBR = \frac{(\text{канал 4} - \text{канал 7})}{(\text{канал 4} + \text{канал 7})} \quad (1)$$

В Landsat 8 (2):

$$NBR = \frac{(\text{канал 5} - \text{канал 7})}{(\text{канал 5} + \text{канал 7})} \quad (2)$$

Для каждого из изображений, до и после, пожара был рассчитан NBR в каждом из пикселей снимка.

Затем был рассчитан показатель ΔNBR . ΔNBR рассчитывается по формуле (3):

$$\Delta NBR = NBR_{prefire} - NBR_{postfire} \dots \quad (3)$$

В лесах Северной Америки ΔNBR широко применялся как совпадающий (один год после пожара) показатель воздействия на растительный покров [8]. Разница между NBR до и после пожара в настоящее время является основным методом картирования крупных удаленных пожаров на общественных территориях.

Объемы значений ΔNBR могут варьировать в зависимости от сцены, и для достижения наилучших результатов интерпретация в конкретных случаях всегда должна основываться на некоторой полевой оценке. Однако классификация из программы USGS FireMon [9] может быть полезна в качестве первого приближения для интерпретации разницы в NBR. Поэтому значения ΔNBR были реклассифицированы в соответствии с табл. 1.

Таблица 1 – Классы ΔNBR по степени тяжести пожара

УРОВЕНЬ ТЯЖЕСТИ ПОЖАРА	ДИАПАЗОН ΔNBR
Высокий послепожарный рост	< -0.25
Низкий послепожарный рост	От -0.25 до -0.1
Несгоревшее	От -0.1 до +0.1
Пожар низкой степени тяжести	От 0.1 до 0.27
Пожар средней степени тяжести	От 0.27 до 0.44
Пожар средней и высокой степени тяжести	От 0.44 до 0.66
Пожар высокой степени тяжести	> 0.66

Перед установкой пределов возгорания необходимо было сгладить переклассифицированные растры. Необходимо было удалить отдельные пиксели, пространственно попадающие в другие классы, и сгладить границы классов. Для этого производилась линейная свертка. Использовалась функция `image.convolve`. Использовалось низкочастотное (сглаживающее) ядро для удаления высокочастотной информации. Сглаживание позволило ускорить векторизацию и решить проблему недостаточной вычислительной мощности.

Следующим этапом было определение границ пожаров. Границы лесных пожаров определялись на основе ΔNBR . На основании наблюдений было установлено, что все значения ΔNBR , превышающие 0,27, находились на территории пожаров. Значения ΔNBR между 0,00 – 0,27 часто давали ошибочные результаты, поэтому они не были классифицированы как пожарные

территории. Данные с ΔNBR выше 0,27 были объединены в маску и затем векторизованы, что позволило определить пределы пожаров.

Заключительным этапом было определение площади каждого пожара в период с 2001 по 2019 год. Вся методика исследования представлена на рисунке 2.

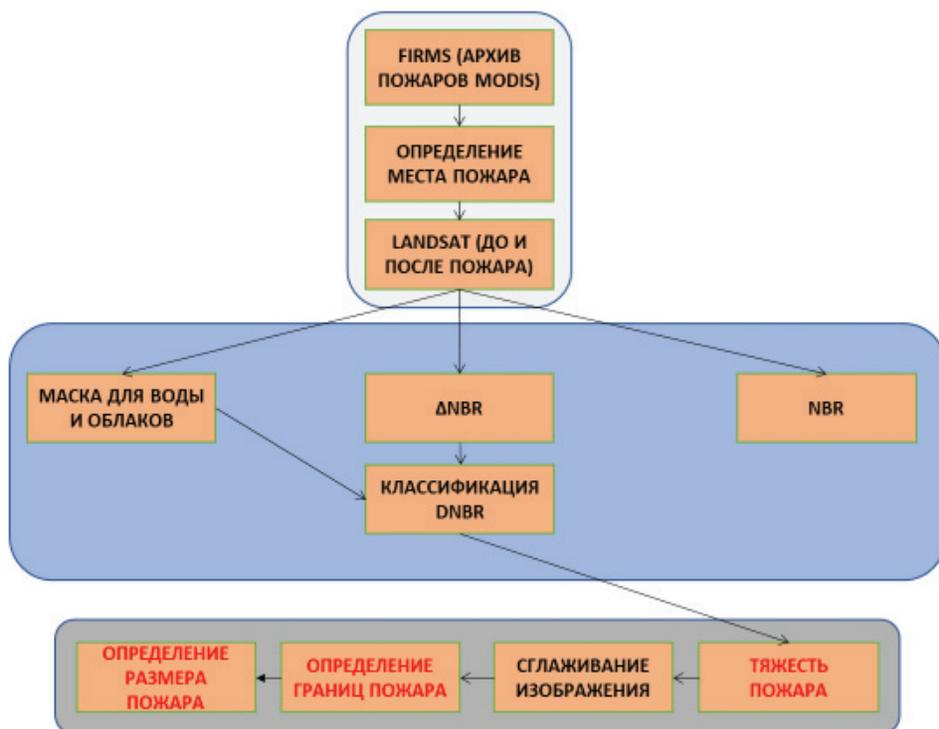


Рис. 2. Методика определения характеристик пожаров с помощью GEE

Результаты исследования

Верхоянский район один из тридцати четырех муниципальных районов в Республике Саха (Якутия). Он расположен на севере региона. Район относится к горной зоне, где территорию занимает Верхоянская горная система. На севере района широко распространены лишайниковые и моховые тундры. Средняя температура января колеблется от -48°C до -38° , а средняя температура июля колеблется от $+16^{\circ}\text{C}$ до $+17^{\circ}$. Годовое количество осадков колеблется от 150 до 300 миллиметров. Главной рекой региона является река Яна. Бассейн реки Яны охватывает как высокогорья с преимущественным развитием горных тундр и каменистых пустынь, так и плоскогорья с горными лиственничными лесами. В горном ландшафте преобладают кедровый стланик и кустарниковая береза, а поверхность почвы покрывают лишайники [10].

Результаты в картографической форме представлены на примере пожара 2014 г. в центральной части Верхоянского района. Для анализа использовались снимки Landsat 8. Все результаты, представленные в схематической форме, приведены на рис. 3.

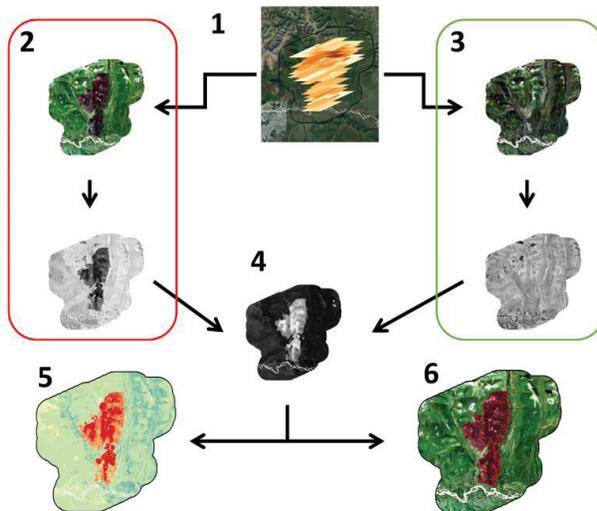


Рис. 3. Результаты анализа пожаров в Верхоянском районе на примере пожара 2014 г. (1. Пожар по данным FIRMS; 2. Снимок Landsat за год до пожара (2013), композиция RGB и индикатор NBR; 3. Снимок Landsat через год после пожара (2015), композиция RGB и индикатор NBR; 4. Индикатор ΔNBR ; 5. Классификация ΔNBR на 6 классов тяжести; 6. Площадь пожара по данным Landsat)

На рис. 4 представлена карта пожара с указанием классов тяжести пожара и площади пожара. По нашим подсчетам, площадь пожара составила 7914,69 га. Самая большая площадь была классифицирована как пожар высокой степени тяжести (3595,39 га). 3067,69 га классифицированы в класс средней и высокой степени тяжести. Наименьшая площадь была классифицирована как пожар средней степени тяжести (1251,61 га). Класс низкой тяжести был отклонен из анализа, так как слишком много пикселей в этом классе было неправильно классифицировано.

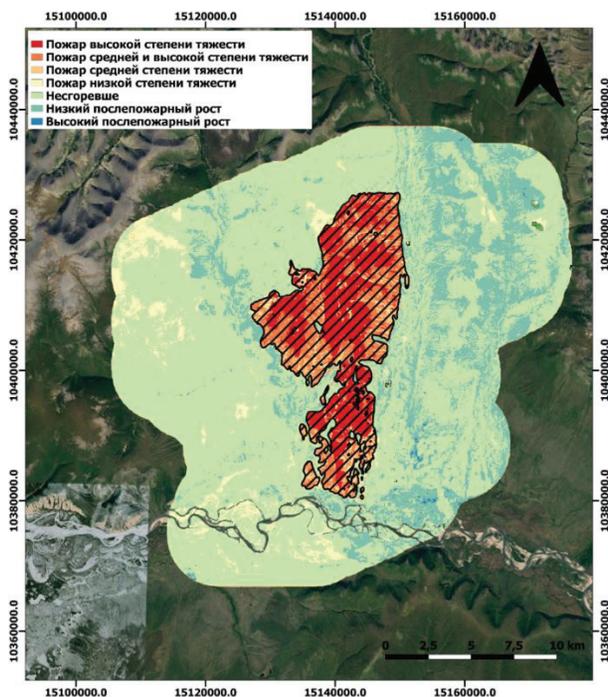


Рис. 4. Карта пожара 2014 г. в центральной части Верхоянского района с указанием классов тяжести пожара и площади пожара. Черной линией обозначена площадь пожара

Можно отметить, что площадь пожара, по данным FIRMS и Landsat, значительно отличается (рис. 5). По данным FIRMS, площадь пожара составила 24185,49 га. Площадь, созданная с помощью NBR и изображений Landsat, составляет 7914,6 га. Площадь, полученная из данных Landsat, более чем в 3 раза меньше, чем площадь, полученная из данных FIRMS.

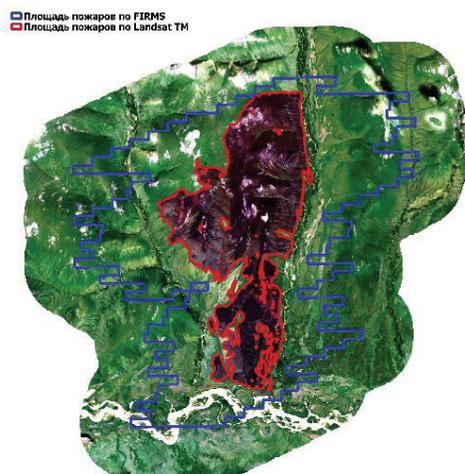


Рис. 5. Сравнение площади пожаров по FIRMS и Landsat

Также был проведен анализ площади пожаров в период с 2001 по 2019 год. В табл. 2 представлено сравнение общей годовой площади пожаров в эти годы, на территории исследования. В анализе сравнивалась площадь, рассчитанная по данным FIRMS и Landsat.

Таблица 2 – Сопоставление площади пожаров на территории Верхоянского района по данным FIRMS и Landsat

Год	Площадь пожаров, [га]		Разница, [%]
	FIRMS	Landsat	
2001	973549,53	-	-
2002	121354,81	-	-
2003	148681,16	-	-
2004	0,00	-	-
2005	106163,96	-	-
2006	20891,96	-	-
2007	41096,19	-	-
2008	51620,51	14319,25	72,26
2009	125328,37	-	-
2010	18645,50	-	-
2011	19367,85	1444,86	92,54
2012	90415,11	11714,57	87,04
2013	53897,96	-	-
2014	80212,85	19425,49	75,78
2015	4520,49	5,25	99,88
2016	9085,77	217,30	97,61
2017	10030,41	275,16	97,26
2018	382216,78	196157,10	48,68
2019	1791980,55	737059,71	58,87

Можно заметить, что для данных Landsat не во все годы было доступно достаточное количество изображений, из-за чего невозможно вычислить площадь пожаров. Это связано с географическим положением, в котором пролеты спутников Landsat 4-5 не так часты, сбоем корректора линии сканирования на спутнике Landsat 7 и частой сильной облачностью. Только после 2013 года, когда начал работать спутник Landsat 8, стало возможным ежегодно собирать необходимое количество снимков для расчета площади пожаров для всего региона. Можно заметить, что, как и на примере, показанном на рисунке № 5, общая площадь пожаров, рассчитанная с помощью Landsat, ежегодно в несколько раз меньше, чем рассчитанная с помощью данных FIRMS. Процентная разница колеблется между 48,68 % и 99,88 %. Можно заметить, что разница увеличивается с уменьшением общей годовой площади пожаров.

Обсуждение результатов

В этой работе представлен метод автоматического определения площади и тяжести пожара, с помощью GEE. GEE уже использовался для такой работы как в глобальном [11], так и в местном масштабе [12-13]. В этой работе показано использование GEE на северо-востоке Сибири на примере Верхоянского района Якутии.

Первым этапом работ было определение потенциальных мест возгорания. Для этого использовались данные FIRMS. Эти данные имеют пространственное разрешение 1 км, что сильно влияет на их точность. Такой большой пиксель мог привести к тому, что небольшие пожары не могли быть идентифицированы. Именно это могло привести к тому, что в 2004 году не было зарегистрировано ни одного пожара. Это подтверждается исследованиями Уэйгла, который изучал пожары на Аляске [14]. Использование данных FIRMS позволило существенно сузить территорию исследования, что уменьшило объем данных и ускорило последующие вычисления.

Для определения характеристик пожаров использовались изображения Landsat. Такой подход позволил уменьшить масштаб анализов с 1 км до 30 м. Из-за отсутствия данных за 2001–2007 и 2010, 2011 и 2013 годы было невозможно провести дальнейший анализ в эти годы. Для другой территории в эти годы возможно использование данных Landsat 4 и 5, однако необходимо заранее проверить карты покрытия данными для этих спутников. С 2014 года методика может успешно применяться на территории Якутии, так как спутник Landsat 8 обеспечивает полное покрытие территории республики.

Для определения тяжести пожара использовался индикатор ΔNBR . Этот индекс успешно использовался во многих исследованиях [15-16]. Индекс хорошо себя зарекомендовал на территории Верхоянского района, но в будущем диапазоны значений в отдельных классах могут быть немного изменены и адаптированы к региону на основе выборочных площадок. Индекс также чувствителен к топографии, поэтому в будущем необходимо включить этот фактор в исследование [17].

На последнем этапе рассчитывалась площадь возгорания на исследуемой территории. Он рассчитан на основе данных FIRMS и Landsat. Можно сделать вывод, что данные FIRMS и Landsat существенно различаются по результатам. В дальнейшем эти данные следует сравнить с официальными данными пожарной службы, чтобы определить, какие из них более точны. Однако визуальный осмотр показывает, что результаты, полученные по данным Landsat, более точны. Это также подтверждается исследованиями Мортон, который сравнивал данные Landsat и Modis [18].

Заключение

Якутия – одна из самых больших, наименее населенных и урбанизированных территорий в мире. Ежегодно, здесь горит несколько миллионов гектаров леса. При исследовании лесных пожаров очень важно определить их характеристики. В масштабе Якутии определить эти характеристики в полевых условиях невозможно. Это приведет к слишком большому экономическим и временным потерям.

Можно сделать вывод, что метод, представленный в исследованиях, несмотря на необходимость доработки, демонстрирует значительный потенциал и большое преимущество перед традиционными методами. GEE значительно упрощает работу с «большими данными». Это исследование подчеркивает силу применения обработки изображений GEE для непрерывного анализа изображений Landsat. В ближайшем будущем включение новых спутников, таких как Sentinel, позволит ученым лучше понять пожары и определять их характеристики. В дополнение к включению большего количества изображений, доступных в интерфейсе GEE, растущее сообщество специалистов-практиков GEE также приведет к дальнейшему развитию инструментов и методов, предназначенных для ускорения обработки изображений и анализа спутниковых изображений.

В будущем метод, представленный в исследовании, может быть использован на практике в лесном хозяйстве, пожарной службе и других службах, а также использоваться для определения потерь после пожаров и при планировании дальнейших действий.

Литература

1. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2019 году». – М.: МЧС России; ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2020. – 259 с.
2. Kasischke E.S. Fire, Climate change, and carbon cycling in the boreal forest. Vol. 138. – Springer Science & Business Media, 2012. – 464 p.
3. Giglio L. Modis collection 6 active fire product user's guide revision A. – Unpublished Manuscript, Department of geographical Sciences University of Maryland, 2015. – 64 p.
4. Jakubauskas M.E., Lulla K.P., Mausel P.W. Assessment of vegetation change in a fire-altered forest landscape // PE&RS, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 1990. – vol. 56(3). – P. 371-377.
5. White J.E., Ryan K., Key C., Running S. Remote sensing of fire severity and vegetation recovery // International Journal of Wildland Fire – 1996. – vol. 6. – P. 125–136.
6. Michalek J.L., Colwell J.E., French N.H.F., Kasischke E.S., Johnson R.D. Using Landsat data to estimate carbon release from burned biomass in an Alaskan spruce forest complex // International. Journal of. Remote Sensing – 2000. – vol. 21. – P. 329–343.
7. Cocke E., Fule P.Z., Crouse J.E. Comparison of burn severity assessments using differenced normalized burn ratio and ground data // International Journal of Wildland Fire. – 2005. – vol. 14. – P. 189–198.
8. Smith A.M.S., Lentile L.B., Huda A.T., Morgan P. Evaluation of linear spectral unmixing and Δ NBR for predicting post-fire recovery in a North American ponderosa pine forest // International Journal of Remote Sensing. – 2007. – Vol. 28. – P. 5159-5166.
9. Lutes D.C. FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system / Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 1 CD., 2006.
10. Атлас сельского хозяйства Якутской АССР / ред. кол.: И.А. Матвеев, М.Е. Николаев, Т.Д. Сивцев и др. – М.: ГУГК при СМ СССР, 1989. – 115 с.
11. Long T., Zhang Z., He G., Jiao W., Tang C., Wu B., Yin R. 30 m Resolution Global Annual Burned Area Mapping Based on Landsat Images and Google Earth Engine // Remote Sensing. – 2019. – vol. 11(5). – P. 489.
12. Daldegan G.A., Roberts D.A., Ribeiro F. de Figueiredo. Spectral mixture analysis in Google Earth Engine to model and delineate fire scars over a large extent and a long time-series in a rainforest-savanna transition zone // Remote Sensing of Environment. – 2019. – vol. 232. – P. 111340.
13. Quintero N., Viedma O., Urbieto I. R., Moreno J.M. Assessing Landscape Fire Hazard by Multitemporal Automatic Classification of Landsat Time Series Using the Google Earth Engine in West-Central Spain // Forests. – 2019. – vol. 10(6). – P. 518.
14. Waigl C.F., Stuefer M., Prakash A., Ichoku C. Detecting high and low-intensity fires in Alaska using VIIRS I-band data: An improved operational approach for high latitudes // Remote Sensing of Environment. – 2017. – vol. 199. – P. 389-400.
15. Escuin S., Navarro R., Fernandez P. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images // International Journal of Remote Sensing. – 2008. – vol. 29.4. – P. 1053-1073.

16. Chafer C.J. A comparison of fire severity measures: an Australian example and implications for predicting major areas of soil erosion // *Catena*. – 2008. – vol. 74.3. – P. 235-245.
17. Verbyla D.L., Kasischke E.S., Hoy E.E. Seasonal and topographic effects on estimating fire severity from Landsat TM/ETM+ data // *International Journal of Wildland Fire*. – 2008. – vol. 17.4. – P. 527-534.
18. Morton D.C., DeFries R.S., Nagol J., Souza Jr.C.M., Kasischke E.S., Hurtt G.C., Dubayah R. Mapping canopy damage from understory fires in Amazon forests using annual time series of Landsat and MODIS data // *Remote Sensing of Environment*. – 2011. – vol. 115(7). – P. 1706-1720.

References

1. Gosudarstvennyj doklad «O sostoyanii zashchity naseleniya i territorij Rossijskoj Federacii ot chrezvychajnyh situacij prirodnoho i tekhnogennogo haraktera v 2019 godu». – M.: MCHS Rossii; FGBU VNII GOCHS (FC), 2020. – 259 s.
2. Kasischke E.S. Fire, Climate change, and carbon cycling in the boreal forest. Vol. 138. – Springer Science & Business Media, 2012. – 464 p.
3. Giglio L. Modis collection 6 active fire product user's guide revision A. – Unpublished Manuscript, Department of geographical Sciences University of Maryland, 2015. – 64 p.
4. Jakubauskas M.E., Lulla K.P., Mausel P.W. Assessment of vegetation change in a fire-altered forest landscape // *PE&RS, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. – 1990. – vol. 56(3). – P. 371-377.
5. White J.E., Ryan K., Key C., Running S. Remote sensing of fire severity and vegetation recovery // *International Journal of Wildland Fire* – 1996. – vol. 6. – P. 125-136.
6. Michalek J.L., Colwell J.E., French N.H.F., Kasischke E.S., Johnson R.D. Using Landsat data to estimate carbon release from burned biomass in an Alaskan spruce forest complex // *International Journal of Remote Sensing* – 2000. – vol. 21. – P. 329-343.
7. Cocke E., Fule P.Z., Crouse J.E. Comparison of burn severity assessments using differenced normalized burn ratio and ground data // *International Journal of Wildland Fire*. – 2005. – vol. 14. – P. 189-198.
8. Smith A.M.S., Lentile L.B., Huda A.T., Morgan P. Evaluation of linear spectral unmixing and Δ NBR for predicting post-fire recovery in a North American ponderosa pine forest // *International Journal of Remote Sensing*. – 2007. – Vol. 28. – P. 5159-5166.
9. Lutes D.C. FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system / Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 1 CD., 2006.
10. Atlas sel'skogo hozjajstva YAkutskoj ASSR / red. kol.: I.A. Matveev, M.E. Nikolaev, T.D. Sivcev i dr. – M.: GUGK pri SM SSSR, 1989. – 115 s.
11. Long T., Zhang Z., He G., Jiao W., Tang C., Wu B., Yin R. 30 m Resolution Global Annual Burned Area Mapping Based on Landsat Images and Google Earth Engine // *Remote Sensing*. – 2019. – vol. 11(5). – P. 489.
12. Daldegan G.A., Roberts D.A., Ribeiro F. de Figueiredo. Spectral mixture analysis in Google Earth Engine to model and delineate fire scars over a large extent and a long time-series in a rainforest-savanna transition zone // *Remote Sensing of Environment*. – 2019. – vol. 232. – P. 111340.
13. Quintero N., Viedma O., Urbieta I. R., Moreno J.M. Assessing Landscape Fire Hazard by Multitemporal Automatic Classification of Landsat Time Series Using the Google Earth Engine in West-Central Spain // *Forests*. – 2019. – vol. 10(6). – P. 518.
14. Waigl C.F., Stuefer M., Prakash A., Ichoku C. Detecting high and low-intensity fires in Alaska using VIIRS I-band data: An improved operational approach for high latitudes // *Remote Sensing of Environment*. – 2017. – vol. 199. – P. 389-400.
15. Escuin S., Navarro R., Fernandez P. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images // *International Journal of Remote Sensing*. – 2008. – vol. 29.4. – P. 1053-1073.
16. Chafer C.J. A comparison of fire severity measures: an Australian example and implications for predicting major areas of soil erosion // *Catena*. – 2008. – vol. 74.3. – P. 235-245.
17. Verbyla D.L., Kasischke E.S., Hoy E.E. Seasonal and topographic effects on estimating fire severity from Landsat TM/ETM+ data // *International Journal of Wildland Fire*. – 2008. – vol. 17.4. – P. 527-534.
18. Morton D.C., DeFries R.S., Nagol J., Souza Jr.C.M., Kasischke E.S., Hurtt G.C., Dubayah R. Mapping canopy damage from understory fires in Amazon forests using annual time series of Landsat and MODIS data // *Remote Sensing of Environment*. – 2011. – vol. 115(7). – P. 1706-1720.