

# Использование данных дистанционного зондирования Земли для оценки повторяемости пиков горимости в лесах Российской Федерации

Р. В. Котельников

Филиал ВНИИЛМ «Центр лесной пирологии», Красноярск, 660062, Россия  
E-mail: kotelnikovrv@firescience.ru

Из-за большого числа факторов, влияющих на возникновение и распространение лесных пожаров, таких как климатические условия, топография местности и человеческая деятельность, горимость лесных массивов в целом носит случайный недетерминированный характер. Вместе с тем формирование больших объёмов хорошо структурированных данных дистанционного зондирования лесных пожаров позволяет выявить ряд закономерностей, например повторяемость пиков горимости (средний межпожарный интервал). Эти циклы могут быть связаны как с погодной составляющей, так и с лесорастительными особенностями. Анализ таких циклов целесообразно выполнять по данным о пройденной огнём площади. В качестве территориальной единицы для анализа целесообразно использовать лесные районы (для учёта лесорастительной специфики) внутри субъектов Российской Федерации (для учёта социально-экономических факторов). Во всех анализируемых выборках для рассматриваемых территорий Российской Федерации возможны только семь или восемь вариантов значений доминирующего периода. Это позволяет перейти от конкретных величин к группам территорий, что упрощает анализ влияния длины выборки на значения доминирующего периода. Результаты определения доминирующего цикла в данных классическим методом спектрального анализа (на основе максимального значения периодограммы) часто зависят от длины анализируемой выборки. При этом полученные значения периода колебаний при уменьшении длины выборки незначительно смещаются в меньшую сторону. Если в половине или в больше половины случаев (вариантов выборок) значение доминирующего периода соответствует одной группе, то можно сделать вывод, что для указанных территорий цикл повторения горимости уже сформировался и относительно стабилен, а наблюдаемое отличие в данных связано с недостатками алгоритма спектрального анализа. Для оценки пожарных режимов целесообразно использовать среднее значение доминирующего периода по результатам анализа нескольких выборок (наиболее продолжительных в рамках имеющихся исходных данных). Доминирующий цикл повторения пиков горимости удалось рассчитать для 61 % территории. При этом для 14 % территории повышенная горимость повторяется приблизительно каждые четыре года. Полученная в ходе исследования карта-схема повторяемости горимости лесов на территории лесных районов в границах субъектов Российской Федерации может быть использована при информационной поддержке управленческих решений в сфере стратегического планирования охраны лесов от пожаров. Для того чтобы при расчёте среднегодовых значений снизить влияние цикличности горимости лесов, целесообразно выбирать глубину ретроспективных данных, кратную целому числу полученных значений доминирующего периода. Результаты расчётов показывают, что для большей части территорий такое рекомендованное значение составляет 11 лет, что соответствует циклу Швабе – Вольфа.

**Ключевые слова:** лесные пожары, дистанционное зондирование, спектральный анализ, пожарные режимы

Одобрена к печати: 19.09.2024  
DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-9-19

## Введение

Лесные пожары представляют собой одно из наиболее значимых природных явлений, оказывающих существенное влияние на экосистемы, климат и биологическое разнообразие. Они играют важную роль в формировании лесных ландшафтов, способствуя обновлению растительности и созданию благоприятных условий для некоторых видов. Однако наряду с положительными эффектами в большинстве случаев лесные пожары приводят к разрушительным последствиям, таким как уничтожение больших площадей лесов, выбросы углекислого газа, а иногда и к деградации почв.

Из-за большого числа факторов, влияющих на возникновение и распространение лесных пожаров, таких как климатические условия, топография местности и человеческая деятельность, горимость лесных массивов в целом носит случайный недетерминированный характер. Вместе с тем формирование больших объёмов хорошо структурированных данных, таких как сведения о пройденных огнём площадях, полученные по данным космического мониторинга, позволяют выявить определённые закономерности.

Одна из таких закономерностей — повторяемость периодов с повышенной горимостью. Анализ данных за длительное время показывает, что в различных регионах мира существуют циклы, в течение которых наблюдается увеличение частоты и интенсивности пожаров. Эти циклы могут быть связаны как с погодной составляющей, так и с лесорастительными особенностями территорий.

Несмотря на то, что цикличность всех метеорологических и гидрологических явлений учесть затруднительно, существует мнение, что наибольшее влияние на состояние нижних слоёв атмосферы, формирование атмосферных вихрей, антициклоническую деятельность оказывает солнечная активность (Вильдяев, Логунов, 2009; Пудовкин, 1996), циклический характер которой вполне можно оценить.

Лесорастительные особенности территорий частично определяются природно-климатическими факторами и, очевидно, тоже зависят от солнечных циклов.

Ряд исследователей уже изучали взаимосвязь горимости лесов и солнечных циклов. Так, в работе (Каткова, 2021) сравнение делалось по доле пожаров в год со среднегодовыми значениями на примере Тверской и Ленинградской областей. На основании результатов оценки делался вывод, что периоды лесопожарных пиков в этих областях с вероятностью 0,8 ожидаются в годы максимумов и минимумов солнечной активности. Существенным недостатком указанной работы можно назвать отсутствие алгоритма численной оценки полученных результатов.

Есть работы (Костырина, 1978), которые показали отсутствие взаимосвязи между напряжённостью пожароопасного сезона (доля дней с высокой пожарной опасностью в зависимости от условий погоды) и солнечной активностью (на примере Хабаровского края).

Несмотря на то, что указанная взаимосвязь до сих пор считается спорной, сам факт повторяемости пожаров на отдельных территориях не вызывает сомнений.

В лесной пирологии уже укрепилось такое понятие, как «пожарный режим», концепция которого доминирует в понимании циклического воздействия пожаров на экосистемные процессы и формирование лесных сообществ (Валендик, Иванова, 2001; Шешуков и др., 2008; Kobziar et al., 2024; Krebs et al., 2010).

Характеристики пожарного режима включают: 1) частоту возникновения лесных пожаров, средний интервала возврата огня (межпожарный интервал, *англ.* Mean Fire Return Interval — MFRI, или среднее количество лет между пожарами для рассматриваемого участка леса); 2) условия формирования пожароопасных сезонов; 3) частоту засух и условия возникновения экстремальных пожароопасных сезонов; 4) уровень пожарной опасности лесной территории, связанный с грозовой активностью; 5) природную пожарную опасность лесных участков; 6) вид, структуру и запасы растительных горючих материалов; 7) вид и поведение лесных пожаров, присущих данной формации; 8) возможные экологические последствия лесных пожаров (Шешуков и др., 2008; Archibald et al., 2013; Bergeron et al., 2002).

Например, в Республике Тыва и Красноярском крае дендрохронологический анализ и реконструкция хронологии лесных пожаров показали, что в сосновых насаждениях пожары возникали с интервалом от 2 до 34 лет, а средняя периодичность составляет 6–11 лет. В горных кедровых лесах длительность среднего беспожарного интервала в последние годы по сравнению с началом ретроспективных наблюдений увеличилась в четыре раза (до 40 лет), а интервала между катастрофическими пожарами — до 70 лет (Иванова и др., 2015). В Эвенкии межпожарный интервал равен  $82 \pm 7$  и  $95 + 7$  лет (соответственно для методов оценки по пожарным подсушинам и с дополнением признака начала роста поколения лиственницы, возникшего после наиболее раннего пожара) (Харук и др., 2005). По данным зарубежных источников, в западных экозонах бореального региона американского кон-

тинента повышенная горимость наблюдается в среднем один раз за 5–7 лет, в восточных — один раз за 20 лет (Kasischke, Turetsky, 2006).

В дополнение к временной изменчивости движущей силой воздействия пожаров на экосистемные структуры и процессы может быть пространственная гетерогенность факторов пожарного режима (Collins, Stephens, 2010; Keeley, Stephenson, 2000).

Знание пожарных режимов в целом и межпожарного интервала в частности позволяет повысить качество управленческих решений в системе охраны лесов (Flatley, Fulé, 2016; Freeman et al., 2017). Вместе с тем следует отметить, что сложность взаимодействия различных факторов, а также существенные климатические изменения приводят к тому, что границы даже уже устоявшихся пожарных режимов существенно сдвигаются (Hu et al., 2010; Keane et al., 2002; Prichard et al., 2017; Tangney et al., 2022).

Имеющиеся в открытом доступе результаты исследований пожарных режимов российских лесов касались в основном локальных территорий. Дальнейшие исследования затруднялись отсутствием достоверных данных о лесных пожарах за временные интервалы, достаточные для анализа временных циклов.

При этом информация о цикличности уровня горимости регионов была бы полезна для стратегического планирования мероприятий, связанных с охраной лесов от пожаров. Простое усреднение данных на уровень регионов в целом приводит к смешиванию циклов и «смазыванию» закономерностей. Это касается как влияния погодной составляющей, так и лесорастительной.

Целью исследования стал анализ повторяемости пиков горимости лесов в лесных районах Российской Федерации.

Основная гипотеза исследования заключается в том, что если для статистического анализа выбрать территории в границах лесных районов внутри субъектов Российской Федерации (далее — территории), то это станет определённым компромиссом между однородностью условий (в рамках лесного района) и необходимостью обобщения для получения выборки данных нужного размера (для снижения влияния случайных факторов). Деление лесного района границами субъекта Российской Федерации не только позволяет детализировать результаты (вся площадь лесного района обычно велика), но и дополнительно учесть социально-экономические различия территорий, которые также существенно влияют на площадь, пройденную лесными пожарами.

Кроме того, знание цикличности возникновения повышенной горимости на исследуемой территории позволит определить оптимальный интервал для анализа ретроспективных данных о пожарах (например, для вычисления среднесноголетних значений). Это можно рассматривать как дополнительную цель исследования.

Основные задачи исследования:

- выбор исходных данных для оценки горимости лесов;
- выбор временных интервалов для анализа;
- определение доминирующего цикла в данных для каждой территории;
- оценка устойчивости полученных результатов к изменению временного интервала;
- выбор оптимального интервала для оценки среднесноголетних показателей;
- интерпретация полученных результатов.

## Исходные данные для исследования

Горимость природных территории традиционно характеризуется количеством возникающих пожаров и площадью, пройденной огнём. Существует несколько источников указанной информации, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки.

Сведения о лесных пожарах, поступающие от региональных диспетчерских служб, не всегда достоверны и не являются однородными, в том числе из-за того, что пожары на удалённых территориях не всегда входили в официальную отчётность.

При этом данные дистанционного зондирования Земли из космоса также имеют ряд недостатков. В частности, не всегда можно отделить лесные пожары от случаев горения,

не связанных с пожарами (например, профилактических выжиганий, сжиганий порубочных остатков и т.д.). Кроме того, при использовании некоторых методов из-за особенностей детектирования один крупный пожар может регистрироваться большим числом отдельных «термоточек». С этой точки зрения для задач оценки циклического характера горимости лесов целесообразно использовать не количество пожаров (или термоточек), а данные о пройденной огнём площади.

В настоящее время существует ряд методов и подходов к оценке площадей лесных пожаров с использованием средств космического мониторинга, краткий анализ которых приведён, например, в работе (Лупян и др., 2021).

Для корректного анализа цикличности необходимо рассмотреть максимально однородные ряды данных, которые получены по одним и тем же алгоритмам на всём периоде анализируемых данных. Учитывая специфику поставленных задач, в качестве основного источника информации использовалась система ВЕГА-Лес (<http://forest.geosmis.ru/>) (Балашов и др., 2020). Имеющиеся там сведения о пройденной огнём площади формировались на основе данных Collection 6 прибора MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), установленного на спутниках Terra и Aqua (Louis, 2015). Полученный из системы ВЕГА-Лес набор данных был также объединён с базой данных Информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров (ИСДМ-Рослесхоз) (Котельников и др., 2019) для выделения загораний, зарегистрированных в лесах.

## Методика

С целью снижения числа случаев ложного детектирования для анализа были выбраны только пожары, которые попадали в выделенные лесопожарные зоны, и только те, у которых лесная площадь превышала 25 га. Кроме того, для повышения точности на этапе предварительной обработки данные были очищены от выбросов. Учитывая, что площади, пройденные огнём, в больших выборках распределены по закону, близкому к логнормальному (Котельников, Лупян, 2022), то в качестве критерия выбросов был выбран метод на основе функции *medk-loud* (Brys et al., 2004). Выбросы заменялись на значения, которые были рассчитаны в качестве пороговых. На следующем шаге из данных был исключён тренд.

За основу предлагаемого подхода взят классический метод спектрального анализа, который предусматривает выбор доминирующего цикла по максимальному значению периодограммы (Percival, Walden, 1993).

Из-за специфики алгоритма построения периодограммы на результат сильно влияет длина интервала, по которому производится расчёт (так называемый «граничный эффект» и феномен «спектральной утечки»). Подобные негативные эффекты приводят к искажениям в точке, соответствующей половине выбранного интервала, а также в точках, соответствующих целым значениям гармоник (Golden et al., 2023). Основным методом смягчения влияния такого эффекта становится усреднение результатов оценки наличия циклов по выборкам разной длины.

Учитывая, что сокращение длины выборки тоже существенно снижает точность результатов и приводит к частичной потере информации, предлагается сформировать на основе исходных данных следующие контрольные выборки: 1) 2001–2022 гг.; 2) 2001–2021 гг.; 3) 2002–2022 гг.; 4) 2002–2021 гг. Такой подход позволит проанализировать влияние на результат как изменения интервала, так и его смещения во времени.

В результате исследования получено, что значения доминирующего цикла для всех рассматриваемых территорий по России составляют всего семь-восемь возможных вариантов (*рис. 1*, см. с. 14). Это позволяет разделить территории на соответствующие группы с одинаковой повторяемостью пиков горимости. Так как, из-за описанного выше эффекта изменения периодограммы для целых гармоник, значение доминирующего периода при увеличении интервала незначительно смещается (в сторону увеличения), при анализе результатов предлагается сравнивать между собой в выборках данных не значения периода, а номера указанных выше групп.



Если номер группы присутствует не менее чем в трёх выборках, то в качестве доминирующего цикла для рассматриваемой территории берётся среднее значение по указанным выборкам. Для остальных участков считаем результат недостаточно достоверным. То есть с точки зрения поставленных целей исследования условно выбираем в качестве критерия достоверности данных совпадение результатов в 75 % случаев.

Зная доминирующие периоды для отдельных территорий, можем рассчитать оптимальную глубину ретроспективной выборки для оценки среднемноголетних данных. Учитывая принятый в законодательстве срок стратегического планирования, это значение не должно быть меньше 10 лет. Для получения искомой величины необходимо увеличивать длительность доминирующего периода в целое число раз и взять за основу первое целое число, большее или равное десяти.

## Полученные результаты

Доминирующие периоды для каждой группы территорий приведены в *таблице*.

Выделение групп территорий со схожим циклом повторяемости горимости лесов

Номер выборки	Годы	Группа территорий							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	2001–2022	7,3(3)	5,500	4,400	3,6(6)	3,143	2,750	2,4(4)	2,200
2	2001–2021	7,000	5,250	4,200	3,500	3,000	2,625	2,3(3)	–
3	2002–2022	7,000	5,250	4,200	3,500	3,000	2,625	2,3(3)	–
4	2002–2021	6,6(6)	5,000	4,000	3,3(3)	2,857	2,5	2,2(2)	–

Как видно из *таблицы*, сокращение длины анализируемой выборки влияет на значения доминирующих периодов. При сокращении интервала величина доминирующих периодов немного снижается и величина этого смещения тоже сокращается.

Если мы рассматриваем выборки 2 и 3 (одинаковая длина), то, например, для группы территорий 1 получился доминирующий период семь лет. И что мы сместим в одну сторону (начать с 2001 г.), что в другую сторону (начать с 2002 г.), всё равно будет семь лет. Таким образом, значение доминирующих периодов в выборках одинаковой длины одинаковы для всех групп и не зависят от смещения по времени.

Для обобщённого анализа полученных результатов построим график, где по вертикальной оси отложим долю площади территорий, соответствующую каждому доминирующему циклу. По горизонтальной оси последовательно отложим значения периода доминирующего цикла (не в масштабе) (см. *рис. 1*).

Как видно из диаграммы (см. *рис. 1*), значения периодов для соответствующих групп близки и отличия в большей степени обусловлены спецификой алгоритма расчёта периодограммы (зависят от объёма выборки). При этом доля территории, отнесённая к соответствующей группе, меняется незначительно. Для каждой территории возьмём за основу только ту группу, которая не меняется в трёх и более выборках. Для удобства практического использования результатов, период для доминирующих циклов округлим до целого значения. Территориальное распределение результата показано на *рис. 2* (см. с. 14).

На карте-схеме видно, что для 39 % территорий доминирующий период достоверно определить невозможно. На этой территории пожары с большой долей вероятности тоже носят периодический характер. Вместе с тем период колебаний значительно меняется, что не даёт возможности оценить доминирующий период при имеющихся объёмах данных.

Больше всего (14 %) встречается территорий, где горимость повторяется приблизительно каждые четыре года. Территории с одинаковой цикличностью горимости лесов географически распределены без видимой закономерности.

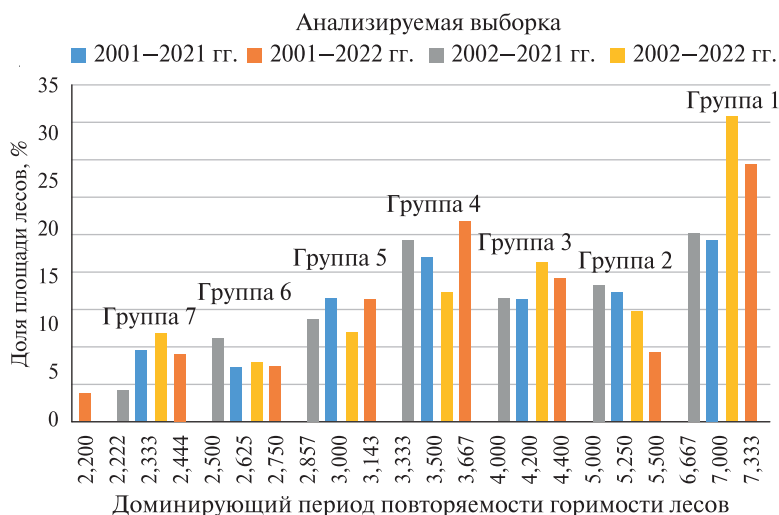


Рис. 1. Доля площади лесных районов Российской Федерации с соответствующим доминирующим периодом повторяемости горимости лесов по результатам анализа нескольких контрольных выборок данных

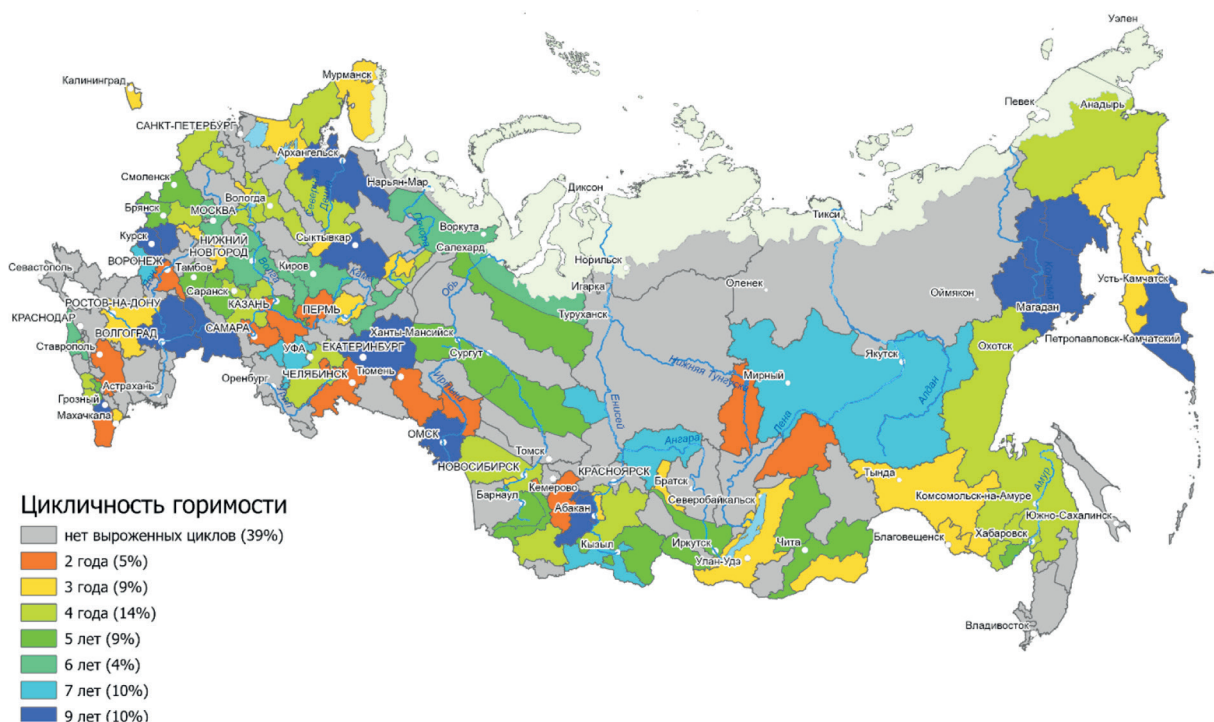


Рис. 2. Карта-схема повторяемости горимости лесов по результатам анализа данных дистанционного зондирования Земли (2001–2022)

Для оценки оптимальной глубины ретроспективной выборки исходных данных о горимости лесов рассчитаем для каждой территории ближайшее наименьшее целое число (но не меньше 10 лет), показывающее, сколько полных периодов колебаний умещается в искомый интервал.

Как видно из диаграммы (рис. 3, см. с. 15), для большей части территорий рекомендуемая глубина ретроспективной выборки составляет 11 лет. Это значит, что для снижения ошибок в среднемноголетних данных, связанных с периодическими изменениями горимости, целесообразно формировать выборку данных длиной 11 лет (или кратную 11 годам, например, 22, 33 года и т. д.).

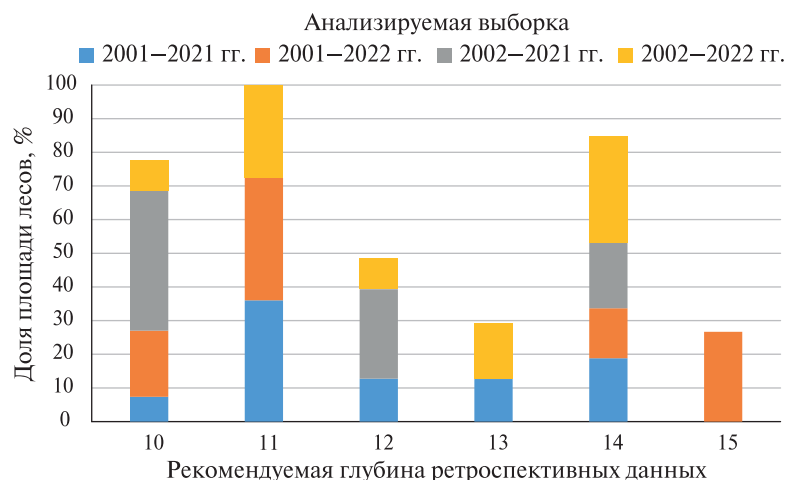


Рис. 3. Доля территории с соответствующим значением рекомендуемой глубины ретроспективных данных для снижения влияния цикличности горимости лесов

Полученный результат хорошо согласуется с наиболее известным циклом солнечной активности, который имеет период около 11 лет (цикл Швабе – Вольфа). Этот цикл характеризуется увеличением и уменьшением количества солнечных пятен на поверхности Солнца, и обычно его связывают с повторяемостью паводков, циклах маловодных лет, засух и т.д. (Вильдяев, Логунов, 2009).

## Выводы

Оценивать повторяемость лет с повышенной горимостью лесов (межпожарный интервал) целесообразно по данным о пройденной огнём площади, полученным в рамках дистанционного мониторинга пожаров из космоса. В качестве территориальной единицы для анализа целесообразно использовать лесные районы (для учёта лесорастительной специфики) внутри субъектов Российской Федерации (для учёта социально-экономических факторов).

Во всех анализируемых выборках для рассматриваемых территорий Российской Федерации возможны только семь или восемь вариантов значений доминирующего периода. Это позволяет перейти от конкретных значений к группам территорий, что упрощает анализ влияния длины выборки на значения доминирующего периода.

Результаты расчёта доминирующего цикла классическим методом спектрального анализа (на основе максимального значения периодограммы) существенно зависят от длины анализируемой выборки. При этом значение доминирующего периода при уменьшении длины незначительно смещается в меньшую сторону.

Если половине или больше половины случаев (выборках) значение доминирующего периода соответствует одной группе, то можно сделать вывод, что для указанных территорий цикл повторения горимости относительно стабильный, а наблюдаемое отличие связано с недостатками алгоритма спектрального анализа.

Для оценки пожарных режимов целесообразно использовать среднее значение доминирующего периода по результатам анализа нескольких выборок (наиболее продолжительных в рамках имеющихся исходных данных).

Полученная в ходе исследования карта-схема повторяемости горимости лесов на территории лесных районов в границах субъектов Российской Федерации может быть использована при информационной поддержке управленческих решений в сфере стратегического планирования охраны лесов от пожаров.

Для того чтобы при расчёте среднесрочных значений снизить влияние циклического характера горимости лесов, целесообразно выбирать глубину ретроспективных данных, кратную 11 годам. Указанное значение косвенно подтверждает взаимосвязь горимости лесов и малого солнечного цикла (Швабе – Вольфа).

## Литература

1. *Балашов И. В., Кашицкий А. В., Барталев С. А., Барталев С. С.* и др. Информационная система комплексного мониторинга лесов и охотничьих угодий России ВЕГА-Лес // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 73–88. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-73-88.
2. *Валендик Э. Н., Иванова Г. А.* Пожарные режимы в лесах Сибири и Дальнего Востока // Лесоведение. 2001. № 4. С. 69–79.
3. *Вильдяев В. М., Логунов О. Ю.* О цикличности природных процессов // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2009. № 4 (106). С. 34–43.
4. *Иванова Г. А., Иванов В. А., Кукавская Е. А.* Периодичность пожаров в лесах Республики Тыва // Хвойные бореальной зоны. 2015. Т. 33. № 5–6. С. 204–209.
5. *Каткова Т. Е.* Прогнозирование пожарного риска в лесных экосистемах с использованием индексов солнечной активности // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 12. С. 60–64. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-12-60-64.
6. *Костырина Т. В.* Прогнозирование пожарной опасности в лесах юга Хабаровского края: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Красноярск, 1978. 23 с.
7. *Котельников Р. В., Лупян Е. А.* Особенности дистанционно оцениваемых распределений площадей лесных пожаров для территорий с различным уровнем пожарной охраны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 75–87. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-75-87.
8. *Котельников Р. В., Лупян Е. А., Барталев С. А., Ершов Д. В.* Космический мониторинг лесных пожаров: история создания и развития ИСДМ-Рослесхоз // Лесоведение. 2019. № 5. С. 399–409. DOI: 10.1134/S0024114819050048.
9. *Лупян Е. А., Стыценок Ф. В., Сенько К. С. и др.* Оценка площадей пожаров на основе детектирования активного горения с использованием данных шестой коллекции приборов MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 178–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-178-192.
10. *Пудовкин М. И.* Влияние солнечной активности на состояние нижней атмосферы и погоду // Соросовский образовательный журн. 1996. Т. 10(11). С. 106–113.
11. *Харук В. И., Двинская М. Л., Рэнсон К. Дж.* Пространственно-временная динамика пожаров в листовенных лесах северной тайги Средней Сибири // Экология. 2005. № 5. С. 334–343.
12. *Шешуков М. А., Брусова Е. В., Позднякова В. В.* Современные пожарные режимы в лесах Дальнего Востока // Лесоведение. 2008. № 4. С. 3–9.
13. *Archibald S., Lehmann C. E. R., Gómez-Dans J. L., Bradstock R. A.* Defining pyromes and global syndromes of fire regimes // Proc. National Academy of Sciences. 2013. V. 110. No. 16. P. 6442–6447. DOI: 10.1073/pnas.1211466110.
14. *Bergeron Y., Leduc A., Harvey B. D., Gauthier S.* Natural fire regime: a guide for sustainable management of the Canadian boreal forest // Silva Fennica. 2002. V. 36. No. 1. P. 81–95.
15. *Brys G., Hubert M., Struyf A.* A Robust Measure of Skewness // J. Computational and Graphical Statistics. 2004. V. 13. No. 4. P. 996–1017. DOI: 10.1198/106186004X12632.
16. *Collins B. M., Stephens S. L.* Stand-replacing patches within a ‘mixed severity’ fire regime: quantitative characterization using recent fires in a long-established natural fire area // Landscape Ecology. 2010. V. 25. No. 6. P. 927–939. DOI: 10.1007/s10980-010-9470-5.
17. *Flatley W. T., Fulé P. Z.* Are historical fire regimes compatible with future climate? Implications for forest restoration // Ecosphere. 2016. V. 7. No. 10. Article e01471. DOI: 10.1002/ecs2.1471.
18. *Freeman J., Kobziar L., Rose E. W., Cropper W.* A critique of the historical-fire-regime concept in conservation // Conservation Biology. 2017. V. 31. No. 5. P. 976–985. DOI: 10.1111/cobi.12942.
19. *Golden K. M., Murphy N. B., Hallman D., Cherkaev E.* Stieltjes functions and spectral analysis in the physics of sea ice // Nonlinear Processes in Geophysics. 2023. V. 30. No. 4. P. 527–552. DOI: 10.5194/npg-30-527-2023.
20. *Hu F., Higuera P., Walsh J., Chapman W. et al.* Tundra burning in Alaska: Linkages to climatic change and sea ice retreat // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2010. V. 115. Iss. G4. DOI: 10.1029/2009JG001270.
21. *Kasischke E. S., Turetsky M. R.* Recent changes in the fire regime across the North American boreal region — Spatial and temporal patterns of burning across Canada and Alaska // Geophysical Research Letters. 2006. V. 33. No. 9. Article L09703. DOI: 10.1029/2006GL025677.
22. *Keane R. E., Parsons R. A., Hessburg P. F.* Estimating historical range and variation of landscape patch dynamics: limitations of the simulation approach // Ecological Modelling. 2002. V. 151. No. 1. P. 29–49. DOI: 10.1016/S0304-3800(01)00470-7.



23. Keeley J. E., Stephenson N. L. Restoring natural fire regimes to the Sierra Nevada in an era of global change // Cole D. N., McCool S. F. et al. Wilderness science in a time of change conference. V. 5. Wilderness ecosystems, threats, and management: Proc. RMRS-P-15-VOL-5. 2000. P. 255–265.
24. Kobziar L. N., Hiers J. K., Belcher C. M. et al. Principles of fire ecology // Fire Ecology. 2024. V. 20. No. 1. Article 39. DOI: 10.1186/s42408-024-00272-0.
25. Krebs P., Pezzatti G. B., Mazzoleni S. et al. Fire regime: history and definition of a key concept in disturbance ecology // Theory in Biosciences. 2010. V. 129. No. 1. P. 53–69. DOI: 10.1007/s12064-010-0082-z.
26. Louis G. MODIS Collection 6 active fire product user's guide revision A. Department of Geographical Sciences University of Maryland, 2015. 64 p.
27. Percival D. B., Walden A. T. Spectral Analysis for Physical Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 561 p.
28. Prichard S. J., Stevens-Rumann C. S., Hessburg P. F. Tamm Review: Shifting global fire regimes: Lessons from reburns and research needs // Forest Ecology and Management. 2017. V. 396. P. 217–233. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.03.035.
29. Tangney R., Paroissien R., Le Breton T. D. et al. Success of post-fire plant recovery strategies varies with shifting fire seasonality // Communications Earth and Environment. 2022. V. 3. No. 1. Article 126. 9 p. DOI: 10.1038/s43247-022-00453-2.

## The use of Earth remote sensing data to assess the recurrence of burnability peaks in forests of the Russian Federation

R. V. Kotelnikov

*Center of Forest Pyrology, Branch of the All-Russian Research Institute  
for Silviculture and Mechanization of Forestry, Krasnoyarsk 660062, Russia  
E-mail: kotelnikovrv@firescience.ru*

Because of the large number of factors influencing the occurrence and spread of forest fires, such as climatic conditions, topography and human activity, the burnability of forests is generally random and non-deterministic. However, the generation of large volumes of well-structured remotely sensed data on forest fires allows us to identify a number of patterns, such as the recurrence of burnability peaks (mean fire interval). These cycles can be related to both weather and forest conditions. It is reasonable to analyze such cycles using data on the area covered by fire. As a territorial unit for analysis, it is reasonable to use forest districts (to account for forestry specifics) within constituent entities of the Russian Federation (to account for socio-economic factors). In all analyzed samples, only 7 or 8 variants of values of the dominant period are possible for the considered territories of the Russian Federation. This allows us to move from specific values to groups of territories, which simplifies the analysis of the influence of the sample length on the values of the dominant period. The results of determining the dominant cycle in the data using the classical method of spectral analysis (based on the maximum value of the periodogram) often depend on the length of the analyzed sample. In this case, the obtained values of the oscillation period are slightly shifted downward when the sample length is reduced. If in half or more than half of cases (sample variants) the value of the dominant period corresponds to one group, it can be concluded that for the specified territories the cycle of burning recurrence has already formed and is relatively stable, and the observed difference in the data is related to the shortcomings of the spectral analysis algorithm. To assess fire regimes, it is advisable to use the average value of the dominant period based on the results of the analysis of several samples (the longest within the available initial data). It was possible to calculate the dominant cycle of repetition of the peaks of burning for 61 % of the territory. At the same time, for 14 % of the territory, increased burnability is repeated approximately every 4 years. The map-scheme of forest burn recurrence in the territory of forest areas within the boundaries of the subjects of the Russian Federation obtained in the course of the study can be used for information support of management decisions in the sphere of strategic planning of forest protection from fires. In order to reduce the influence of the oscillatory cyclicity of the nature of forest fires when calculating long-term averages, it is advisable to choose the depth of retrospective data that is a multiple of the whole number of obtained values of the dominant period. The results of calculations show that for most of the territories such a recommended value is 11 years, which corresponds to the Schwabe-Wolf cycle.

**Keywords:** forest fires, remote sensing, spectral analysis, fire regimes

Accepted: 19.09.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-9-19

## References

1. Balashov I. V., Kashnitskii A. V., Bartalev S. A. et al., VEGA-Les: information system for complex monitoring of forests and hunting grounds in Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 73–88 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-73-88.
2. Valendik E. N., Ivanova G. A., Fire regimes in the forests of Siberia and the Far East, *Lesovedenie*, 2001, No. 4, pp. 69–79 (in Russian).
3. Vildyaev V. M., Logunov O. Yu., About recurrence of natural processes, *Use and protection of natural resources in Russia*, 2009, No. 4(106), pp. 34–43 (in Russian).
4. Ivanova G. A., Ivanov V. A., Kukavskaya E. A., Frequency of fires in the forests of the Republic of Tyva, *Conifers of the Boreal Zone*, 2015, Vol. 33, No. 5–6, pp. 204–209 (in Russian).
5. Katkova T. E., Forecasting fire risk in forest ecosystems using solar activity index, *Ecology and Industry of Russia*, 2021, Vol. 25, No. 12, pp. 60–64 (in Russian), DOI: 10.18412/1816-0395-2021-12-60-64.
6. Kostyrina T. V., *Prognozirovanie pozharnoi opasnosti v lesakh yuga Khabarovskogo kraia: avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk* (Forecasting of fire danger in the forests of the south of the Khabarovsk Territory, Cand. s.-kh. sci.), Krasnoyarsk, 1978, 23 p. (in Russian).
7. Kotelnikov R. V., Loupian E. A., Features of remotely estimated distributions of forest fire areas for territories with different levels of fire protection, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 4 (in Russian), pp. 75–87, DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-75-87.
8. Kotelnikov R. V., Lupyan E. A., Bartalev S. A., Ershov D. V., Space monitoring of forest fires: history of creation and development of ISDM-Rosleskhos, *Lesovedenie*, 2019, No. 5, pp. 399–409 (in Russian), DOI: 10.1134/S0024114819050048.
9. Loupian E. A., Stytsenko F. V., Senko K. S. et al., Burnt area assessment using MODIS Collection 6 active fire data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 158–175 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
10. Pudovkin M. I., Effect of solar activity on the lower atmosphere and weather, *Soros Educational J.*, 1996, No. 10(11), pp. 106–113 (in Russian).
11. Kharuk V. I., Dvinskaya M. L., Ranson K. J., The spatiotemporal pattern of fires in northern taiga larch forests of Central Siberia, *Ecologia*, 2005, Vol. 36, No. 5, pp. 302–311 (in Russian), DOI: 10.1007/s11184-005-0077-z.
12. Sheshukov M. A., Brusova E. V., Pozdnyakova V. V., The present fire regimes in forests of the Far East, *Lesovedenie*, 2008, No. 4, pp. 3–9 (in Russian).
13. Archibald S., Lehmann C. E. R., Gómez-Dans J. L., Bradstock R. A., Defining pyromes and global syndromes of fire regimes, *Proc. National Academy of Sciences*, 2013, Vol. 110, No. 16, pp. 6442–6447, DOI: 10.1073/pnas.1211466110.
14. Bergeron Y., Leduc A., Harvey B. D., Gauthier S., Natural fire regime: a guide for sustainable management of the Canadian boreal forest, *Silva Fennica*, 2002, Vol. 36, No. 1, pp. 81–95.
15. Brys G., Hubert M., Struyf A., A Robust Measure of Skewness, *J. Computational and Graphical Statistics*, 2004, Vol. 13, No. 4, pp. 996–1017, DOI: 10.1198/106186004X12632.
16. Collins B. M., Stephens S. L., Stand-replacing patches within a ‘mixed severity’ fire regime: quantitative characterization using recent fires in a long-established natural fire area, *Landscape Ecology*, 2010, Vol. 25, No. 6, pp. 927–939, DOI: 10.1007/s10980-010-9470-5.
17. Flatley W. T., Fulé P. Z., Are historical fire regimes compatible with future climate? Implications for forest restoration, *Ecosphere*, 2016, Vol. 7, No. 10, Article e01471, DOI: 10.1002/ecs2.1471.
18. Freeman J., Kobziar L., Rose E. W., Cropper W., A critique of the historical-fire-regime concept in conservation, *Conservation Biology*, 2017, Vol. 31, No. 5, pp. 976–985, DOI: 10.1111/cobi.12942.
19. Golden K. M., Murphy N. B., Hallman D., Cherkaev E., Stieltjes functions and spectral analysis in the physics of sea ice, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2023, Vol. 30, No. 4, pp. 527–552, DOI: 10.5194/npg-30-527-2023.
20. Hu F., Higuera P., Walsh J., Chapman W. et al., Tundra burning in Alaska: Linkages to climatic change and sea ice retreat, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, Vol. 115, DOI: 10.1029/2009JG001270.
21. Kasischke E. S., Turetsky M. R., Recent changes in the fire regime across the North American boreal region — Spatial and temporal patterns of burning across Canada and Alaska, *Geophysical Research Letters*, 2006, Vol. 33, No. 9, Article L09703, DOI: 10.1029/2006GL025677.

22. Keane R. E., Parsons R. A., Hessburg P. F., Estimating historical range and variation of landscape patch dynamics: limitations of the simulation approach, *Ecological Modelling*, 2002, Vol. 151, No. 1, pp. 29–49, DOI: 10.1016/S0304-3800(01)00470-7.
23. Keeley J. E., Stephenson N. L., Restoring natural fire regimes to the Sierra Nevada in an era of global change, In: Cole D. N., McCool S. F., Borrie W. T. et al., *Wilderness science in a time of change conference-Vol. 5, Wilderness ecosystems, threats, and management: Proc. RMRS-P-15-VOL-5*, 2000, pp. 255–265.
24. Kobziar L. N., Hiers J. K., Belcher C. M. et al., Principles of fire ecology, *Fire Ecology*, 2024, Vol. 20, No. 1, Article 39, DOI: 10.1186/s42408-024-00272-0.
25. Krebs P., Pezzatti G. B., Mazzoleni S. et al., Fire regime: history and definition of a key concept in disturbance ecology, *Theory in Biosciences*, 2010, Vol. 129, No. 1, pp. 53–69, DOI: 10.1007/s12064-010-0082-z.
26. Louis G., *MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide Revision A*, Department of Geographical Sciences University of Maryland, 2015, 64 p.
27. Percival D. B., Walden A. T., *Spectral Analysis for Physical Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 561 p.
28. Prichard S. J., Stevens-Rumann C. S., Hessburg P. F., Tamm Review: Shifting global fire regimes: Lessons from reburns and research needs, *Forest Ecology and Management*, 2017, Vol. 396, pp. 217–233, DOI: 10.1016/j.foreco.2017.03.035.
29. Tangney R., Paroissien R., Le Breton T. D. et al., Success of post-fire plant recovery strategies varies with shifting fire seasonality, *Communications Earth and Environment*, 2022, Vol. 3, No. 1, pp. 1–9, DOI: 10.1038/s43247-022-00453-2.