

Пространственно-временной анализ природных пожаров в лесотундре Западной Сибири

Д. В. МОСКОВЧЕНКО^{1, 2}, С. П. АРЕФЬЕВ^{1, 2}, М. Д. МОСКОВЧЕНКО², А. А. ЮРТАЕВ²

¹Тюменский научный центр СО РАН
625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86
E-mail: ipos@ipdn.ru

²Тюменский государственный университет
625003, Тюмень, ул. Володарского, 6

Статья поступила 03.10.2019

После доработки 15.11.2019

Принята к печати 21.11.2019

АННОТАЦИЯ

Климатические изменения последних десятилетий и усиление антропогенного воздействия на севере Западной Сибири существенно усиливают угрозу возникновения природных пожаров. Однако пространственные и временные закономерности распространения пожаров в предтундровых районах недостаточно исследованы. В результате дешифрирования космоснимков Landsat за период 1985–2018 гг. определено, что воздействию пожаров подверглось 10,5 % территории лесотундры Западной Сибири. Максимальная горимость (23 %) выявлена у лиственничных и елово-лиственничных лишайниковых редколесий. Геоботаническим индикатором повышенной пожарной опасности является доминирование в структуре растительного покрова эпигейных кустистых лишайников. Показано, что пожары происходят главным образом в центральной части лесотундры, где сосредоточены крупнейшие газовые месторождения. Отмечена положительная достоверная корреляция площади гарей с температурным режимом летнего периода (средней и максимальной летней температурами) и отрицательная – с суммой летних осадков. Дендрохронологический анализ показал, что величина межпожарного интервала на отдельных участках изменялась от 15 до 60 лет (в среднем – около 30 лет).

Ключевые слова: Западная Сибирь, лесотундра, природные пожары, космоснимки, дендрохронология.

Природные пожары относят к наиболее опасным экзогенным нарушениям в естественных экосистемах [Швиденко и др., 2011]. Ежегодная площадь горевших лесов в России составляет, по разным оценкам, от 0,55–2,40 до $(2–10) \times 10^6$ га, причем большая их часть (70–90 %) приходится на Сибирь [Харук, Пономарев, 2017]. Многочисленные исследования свидетельствуют об увеличении числа возгораний и площади гарей в таежной зоне Си-

бири в последние десятилетия [Рубцов и др., 2010; Швиденко, Щепаченко, 2013; Пономарев, Харук, 2016]. Основной причиной этого является отчетливо выраженный тренд к росту температуры воздуха, который наиболее сильно проявляется в центральных районах севера Западной Сибири, Якутии, Прибайкалья и Забайкалья, юга Сибири [Павлов, Малкова, 2010]. Характерно, что потепление приводит к росту пожарной опасности не только

в лесах, но и в тундрах. Так, в тундрах Аляски изменение структуры растительного покрова из-за глобального потепления вызвало рост числа и интенсивности пожаров [Bret-Harte et al., 2013; Tsuyuzaki et al., 2018].

Однако в некоторых районах учащение пожаров является следствием не столько потепления климата, сколько возрастания антропогенной активности [Syphard et al., 2017]. На севере Западной Сибири насчитывается более 200 месторождений углеводородов, разработка которых приводит к возрастанию горимости. Так, на территории Уренгойского месторождения гари занимают 24 % площади [Корниенко, 2009], что значительно превышает средние значения как для региона, так и для России в целом. На возникновение пожаров влияет и неосторожное обращение с огнем коренного населения. По данным этнографов, среди тундровых ненцев распространена практика поджигать летом сухой напочвенный покров для спасения оленей от гнуса. По сравнению с таежными народами (ханты, манси), ненцы заметно меньше обеспокоены пожарной безопасностью; рассказы, что неосторожность кого-то из соседей приводила к возгоранию тундры, довольно обычны [Адаев, 2018].

Цель настоящей работы – оценить площадь распространения и частоту возникновения природных пожаров в лесотундре Западной Сибири на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО). Здесь расположены крупнейшие газовые месторождения, включая лидирующие по объемам добычи в России Уренгойское и Заполярное. Интенсивное антропогенное воздействие приводит к частому возникновению пожаров: относительная площадь гарей в лесотундре ЯНАО больше, чем в тундровой и таежной зонах [Московченко и др., 2019]. Зона лесотундры, являющаяся экотонном между тундрой и тайгой, в условиях нестабильности климата характеризуется неустойчивым состоянием биогеоценозов и биотопов. Поэтому экологические последствия пожаров здесь весьма опасны. В Западной Сибири наблюдается распространение лиственницы на север из лесотундры в тундру [Харук и др., 2005], происходит опускание кровли мерзлоты, обусловленное общим потеплением климата [Украинцева и др., 2011], проявляется положительный темпера-

турный тренд мерзлых пород [Дроздов и др., 2010]. Одним из важных проявлений послепожарной динамики ландшафтов криолитозоны является изменение термического режима верхней толщи грунтов. На гарях вследствие уменьшения альбедо и утраты теплоизолирующей функции растительности возрастает летняя температура почвы, увеличивается мощность сезонно-талого слоя, активизируются процессы термоэрозии и термокарста [Тарабукина, Савинов 1990; Chambers et al., 2005; Tsuyuzaki et al., 2018].

РАЙОН И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лесотундры Западной Сибири протягиваются неровной полосой шириной 120–180 км приблизительно на широте полярного круга. Северная граница лесотундры проходит по изотерме вегетационного периода +11–12 °С [Матвеева, 1998]. Растительность представлена редкостойными лесами и редколесьями, плоскобугристыми болотами, кустарниковыми тундрами. Основные зональные черты растительного покрова отражают низкорослые (Va–Vб) елово-лиственничные (*Larix sibirica*) и лиственнично-еловые (*Picea obovata*) редколесья с высотой древостоя 6–10 м и полнотой 0,1–0,2. Изредка встречаются березовые криволесья (*Betula pubescens*). В южной части лесотундры таксационные показатели древостоев увеличиваются, появляется сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*). В покрове лесов и редколесий на дренированных участках, сложенных песчаными породами, преобладают кустистые лишайники, на слабодренированных участках формируется кустарничково-лишайниково-сфагновый покров. На плоских слабодренируемых водоразделах развиты ерниковые и ивняковые кустарничково-зеленомошные и кустарничково-лишайниковые тундры, чередующиеся с комплексными плоскобугристыми и полигональными болотами [Ильина и др., 1985].

В лесотундровой области Западной Сибири выделяются пять ландшафтных провинций: Урало-Обская, Нижнеобская, Салехардская, Надым-Пурская северная и Нижнетазовская [Атлас..., 2004] (рис. 1).

Провинции различаются по климатическим, геоморфологическим и геоботаническим показателям. Протянувшаяся узкой полосой

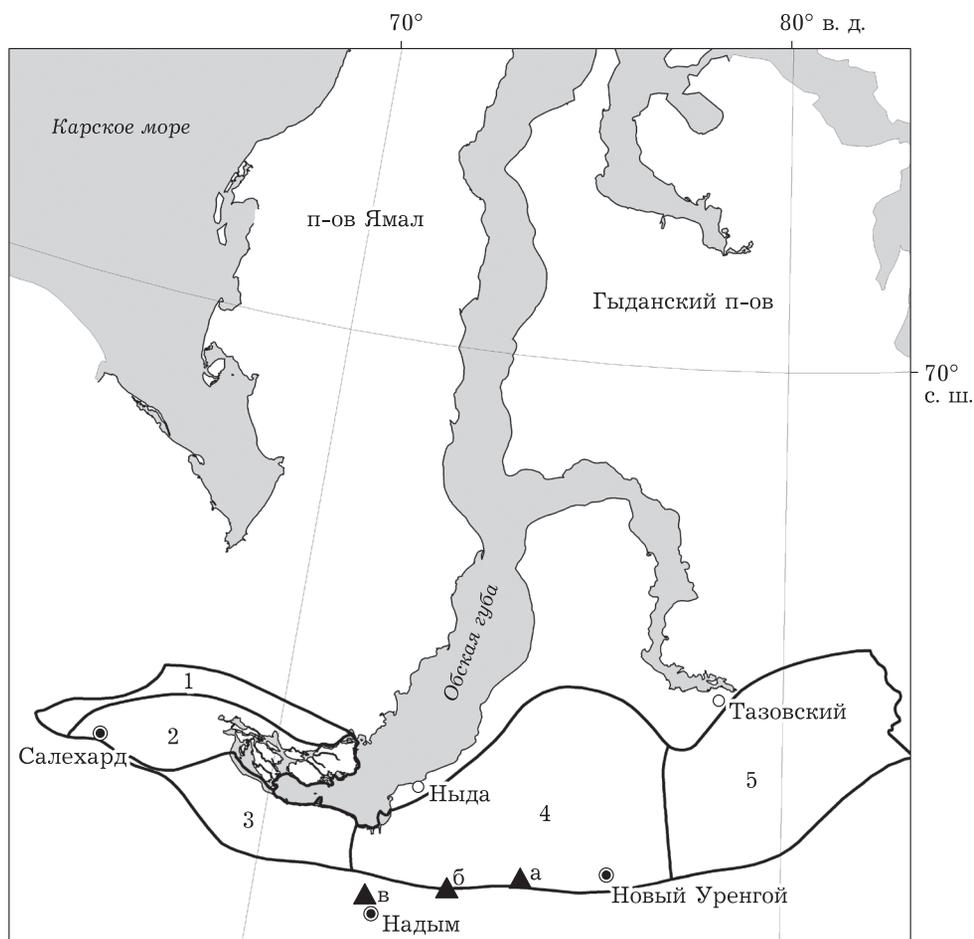


Рис. 1. Район исследований.

Ландшафтные провинции лесотундр Западной Сибири: 1 – Урало-Обская; 2 – Нижнеобская; 3 – Салехардская; 4 – Надым-Пурская северная; 5 – Нижнетазовская. а-в – участки дендрохронологических исследований

между горами полярного Урала и поймой Оби Урало-Обская провинция характеризуется господством кустарничково-мохово-травяных с ивой и карликовой березой тундр в сочетании с осоково-гипновыми болотами. В Нижнеобской провинции преобладают ландшафты поймы и надпойменных террас р. Оби. Наибольшее участие лесов и редколесий в структуре растительного покрова наблюдается в Салехардской и Надым-Пурской провинциях. В Нижнетазовской провинции доминируют тундровые сообщества.

Определение горимости проведено с использованием данных дистанционного зондирования (ДДЗ) мультиспектральных космоснимков спутников Landsat трех поколений (Landsat 5, 7, 8), находящихся в открытом доступе на сайте геологической службы США (www.usgs.gov). Методика, основанная на ис-

пользовании данных Landsat с пространственным разрешением 30 м, является наиболее точной при оценке площади пожаров [Барталев и др., 2012] и получила повсеместное распространение. Для определения площади гарей выбраны снимки, сделанные за период 1985–2018 гг., с облачностью менее 20 %, без технических помех, с географической привязкой. Для картирования гарей составлены мозаики из снимков для каждого года наблюдений. Снимки наложены друг на друга в порядке убывания степени покрытия облаками, которые могут закрыть пожар и тем самым повлиять на дальнейшие расчеты. Всего обработано 33 мозаики из 463 снимков. Мозаики обрабатывали с применением свободно распространяемого программного продукта QGIS с надстройкой Semi-Automatic Classification Plugin, позволяющего выполнять большой спектр ма-

нипуляций, в том числе подсчет спектральных индексов.

Для выделения и картирования пожаров использовали два индекса: нормализованный индекс гарей (NBR – Normalized Burned Ratio), основанный на отражении излучения в ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном диапазонах:

$$NBR = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}, \quad (1)$$

где NIR – отражение в ближнем инфракрасном диапазоне; SWIR – отражение в коротковолновом инфракрасном диапазоне [García, Caselles, 1991; Key, Benson, 1999], и разностный индекс гарей (dNBR – differenced NBR), рассчитанный как разница NBR предыдущего и последующего года наблюдений:

$$dNBR = \text{prefireNBR} - \text{postfireNBR}. \quad (2)$$

На горях и горельниках индекс NBR принимает самые низкие значения, что позволяет достаточно точно определить их на космоснимках. Индексы NBR и dNBR нашли повсеместное применение в картографировании природных пожаров [Howard, Lacasse, 2004; Odion, Hanson, 2006; Miller, Thode, 2007; Allen, Sorbel, 2008; Godwin, Kobziar, 2011; Soverel et al., 2011; Kolden, Abatzoglou, 2012]. Однако слабые воздействия пожаров невозможно достоверно отделить от изменений, связанных с качеством снимков, сезонными вариациями метеопараметров и соответствующей фенологической асинхронностью. Существует большая вероятность ошибочного отнесения пикселей наиболее сухих участков к категории “слабо нарушенных” пожарами [Key, Benson, 2005]. Поэтому нами при картировании выделены участки со значением $dNBR > 0,27$, являющимся границей между категориями “низкой” и “средне-низкой” поврежденности пожарами [Key, Benson, 1999; Potić et al., 2017]. Данный метод позволяет выявить все крупные гари, на него не влияют сезонные изменения растительности. Вместе с тем такое решение приводит к тому, что в краевых частях гарей, где воздействие огня на ландшафты было слабым, возникает много ошибок в классификации. С целью устранения этого недостатка использовалась предусмотренная программным средством QGIS процедура “отсеивания”, заключающаяся в уда-

лении растровых полигонов площадью меньше порогового значения (в данном исследовании использовалось значение 50 пикселей) и замене их значением наибольшего соседнего полигона. Применение этого инструмента позволило удалить возникшие в результате ошибок маленькие полигоны, классифицированные как пожары (“шум”), а также заполнить возникшие в результате установки высокого порогового значения пустоты в полигонах пожаров.

С помощью описанной методики составлены погодичные карты гарей за период 1985–2018 гг. и определены площади участков, нарушенных пожарами. В июле–августе 2018 г. выполнена верификация дешифрирования космоснимков путем натурного обследования. Затем проведен анализ зависимости горимости от ландшафтных, геоботанических, климатических факторов. Была вычислена площадь гарей в разных ландшафтных провинциях. Для оценки горимости разных фитоценозов проведено сопоставление с картой растительного покрова Западно-Сибирской равнины [Ильина и др., 1976] с использованием ГИС-методов. Путем наложения карты пожаров на карту растительности для каждого типа сообществ вычислен процент площади, нарушенной пожарами (горимость фитоценозов), определены наиболее горимые сообщества. Также подсчитан процент площади, занятой каждым типом сообществ в лесотундре, чтобы определить, как широко распространены пожароопасные типы растительности.

Для оценки зависимости частоты возникновения пожаров от метеоусловий текущего года использовались данные близлежащих метеостанций (Салехард, Надым, Ныда, Тазовский), полученные из открытых источников [www.meteo.ru]. Определена корреляционная зависимость площади пожаров от таких показателей, как сумма положительных температур, сумма летних осадков, средняя и максимальная летняя температуры. Поскольку значения погодичной площади гарей не соответствуют закону нормального распределения, проведено вычисление коэффициентов ранговой корреляции Спирмена. Подсчеты выполнены в программном комплексе Anaconda. Используются библиотеки языка программирования Python: Pandas – для работы с наборами данных, SciPy – для расчета статистических показателей. Тренды горимости оценивались

непараметрическим тестом Манна – Кендалла в программной оболочке MAKESENS (Finnish Meteorological Institute), который используется при анализе рядов наблюдений без сезонной цикличности [Salmi et al., 2002].

Использование космоснимков позволило охватить относительно небольшой (33-летний) промежуток времени. Поэтому периодичность возникновения пожаров также проанализирована дендрохронологическими методами. Дендрохронологические образцы отобраны в августе 2018 г. на 3 участках (см. рис. 1) в листовенничных редколесьях, сосново-лиственничных и листовеннично-сосновых редкостойных лесах, поврежденных сильными низовыми пожарами разной давности. Все обследованные участки относятся к лишайниково-кустарничковой группе типов леса. При отборе образцов придерживались известных правил [Шиятов и др., 2000] с учетом задач работы, предполагавшей фиксацию аномалий древесно-кольцевых хронологий (ДКХ), возникающих под воздействием пожаров. На каждом участке для анализа из 5–10 деревьев разного возраста, обычно главной породы – листовенницы или сосны, отобраны керны с помощью бурава Пресслера на высоте 0,3–0,5 м, по двум противоположным радиусам. После зачистки и контрастирования мелом поперечной поверхности кернов измеряли ширину колец под микроскопом, полученные с отдельных радиусов ДКХ проверены перекрестной датировкой, обобщенные ДКХ для участков составлены отдельно по взятым видам деревьев [Methods., 1990; Шиятов и др., 2000].

Нами использован метод индикации пожаров, основанный на статистическом анализе дендрохронологических параметров. Исходили из того, что пожар оказывает влияние на ширину кольца выживших деревьев. При достаточном сильных пожарах это сначала проявляется в ее уменьшении, затем в увеличении, связанном с использованием выжившим деревом возникших после пожара пространственных и питательных ресурсов роста. Конкретные изменения радиального прироста после пожара зависят от целого ряда факторов и происходят очень неравномерно как по периметру отдельного дерева, так и у разных деревьев, составляющих древостой. Это приводит к резкому увеличению показателей вариации ширины кольца w и дендрохроноло-

гического коэффициента чувствительности k [Арефьев, 1997].

Расчет дендрохронологического показателя пожаров F проводили по следующему алгоритму. Исходные ряды ширины колец по каждому радиусу преобразовывали в ряды соотношений ширины смежных колец:

$$k_t = (w_t - w_{t-1}) / (w_t + w_{t-1}), \quad (3)$$

где k – центрированный коэффициент чувствительности; w – ширина кольца в год t . После обобщения индивидуальных рядов чувствительности k средней арифметической проводили кумуляцию обобщенных рядов K с формированием ряда кумулят C и с дальнейшим восстановлением рядов относительной ширины колец Wc , не содержащих искажений, вызываемых концевыми эффектами:

$$Wc_t = 10^{Ct}. \quad (4)$$

Далее проводили калибровку ряда Wc в ряд абсолютной ширины колец W' (по сумме ширины колец самого длинного индивидуально-го ряда W_{\max}):

$$W'_t = Wc_t \cdot (\Sigma W_{\max} / \Sigma Wc). \quad (5)$$

Коэффициент вариации чувствительности Vk в год t рассчитывали по формуле

$$Vk_t = Sk_t / (K_t + 1), \quad (6)$$

где Sk – стандартное отклонение коэффициента чувствительности.

Параметр Vk характеризует нарушение устойчивости древостоя, возникающее в силу различных причин (пожары, вредители или болезни, погодные-климатические и гидрологические аномалии, рубки и проч.), независимо от их специфики. То есть Vk является неспецифическим показателем нарушения устойчивости древостоя, подобно тому как, например, в медицине повышенная температура тела является неспецифическим показателем патологии. Однако пожары обычно оказывают наиболее сильное и системное влияние на дендрохронологические параметры. Для отделения фактора воздействия пожаров вводили фильтр в виде суммы коэффициентов чувствительности двух смежных лет:

$$F_t = 10 \cdot (Vkt \cdot (K_t + K_{t+1}))^2. \quad (7)$$

При значениях F_t , на порядок превышающих фоновые, можно с большой вероятностью судить о пожаре в год t . Биологические патогены, способные создавать аналогич-



Рис. 2. Распределение гарей по ландшафтным провинциям (обозначения провинций см. рис. 1)

ную картину [Арефьев, 1997], для предтундровых лесов нехарактерны. Предложенный дендрохронологический метод датировки пожаров позволил установить сроки их возникновения на различных участках ЯНАО в период с 1850 по 2018 г. Все расчеты проведены в пакете EXCEL.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Площадь и географическое распространение пожаров. В результате обработки космоснимков выявлено, что площадь гарей и горельников, возникших в результате пожаров в лесотундре Западной Сибири в 1985–2018 гг., составила 8855 км², а суммарная площадь территорий, подвергшихся воздействию пожаров (с учетом возникновения повторных пожаров на старых гарях), – 8939,5 км², что составляет 10,5 % общей площади лесотундры Западной Сибири.

Распространение пожаров по ландшафтными провинциями сильно варьирует (рис. 2). Основная площадь гарей в лесотундре ЯНАО (5550 км², или 62,7 %) сосредоточена в Надым-Пурской ландшафтной провинции (табл. 1).

Наименьшую площадь гари занимают в Урало-Обской и Нижнеобской ландшафтных провинциях, что связано с повышенным

увлажнением почв в обском долинно-речном комплексе, разреженностью растительного покрова и малым запасом горючих материалов в тундрах, примыкающих к долине Оби и горам Полярного Урала. Горимость максимальна в Салехардской и Надым-Пурской провинциях, где доля гарей составляет 17,1 и 16,7 % соответственно. Наибольшее распространение имеют пожары в западной и центральной частях Надым-Пурской провинции, где они приурочены к крупным газовым месторождениям – Уренгойскому, Самбургскому и Медвежьему. В Нижнетазовской провинции доля земель, нарушенных пожарами, почти вдвое меньше, чем в среднем по территории зоны лесотундры. Пожары в Нижнетазовской провинции происходили на разобщенных участках, что связано с чередованием дренированных, покрытых лесными сообществами территорий и обширных болотных комплексов. Общая площадь нарушенных пожарами земель здесь меньше, чем в Салехардской и Надым-Пурской провинциях (см. рис. 2).

Частота пожаров и их интенсивность сильно варьирует от года к году. Площадь гарей изменяется от нуля до 2–3 тыс. км² (до 3,6 % от площади лесотундры) (рис. 3). Значительная погодичная вариабельность площади пожаров в зависимости от метеоусловий текущего года свойственна лесному покрову России: лесов, погибших от пожаров за год, изменяется на порядок, от 0,57·10⁶ до 6,67·10⁶ га [Бартаев и др., 2017].

Горимость разных типов растительных сообществ. Карта растительности Западно-Сибирской равнины вследствие мелкого масштаба в большинстве случаев использует в качестве единицы картографирования мезокомбинации растительных сообществ [Ильина и др., 1985], что затрудняет точную иденти-

Т а б л и ц а 1
Распространение пожаров по ландшафтными провинциями лесотундры Западной Сибири

Показатель	Вся лесотундра	Ландшафтные провинции				
		1	2	3	4	5
Площадь гарей, км ²	8855,0	13,0	136,7	1506,9	5550,2	1646,3
%	100	0,1	1,5	17,0	62,7	18,6
Суммарная площадь гарей с повторными пожарами, км ²	8939,5	13,1	137,3	1527,3	5597,5	1663,1
Горимость фитоценозов за период 1985–2018 гг., %	10,5	0,25	1,3	17,1	16,7	6,3

П р и м е ч а н и е. Ландшафтные провинции: 1 – Урало-Обская; 2 – Нижнеобская; 3 – Салехардская; 4 – Надым-Пурская северная; 5 – Нижнетазовская.

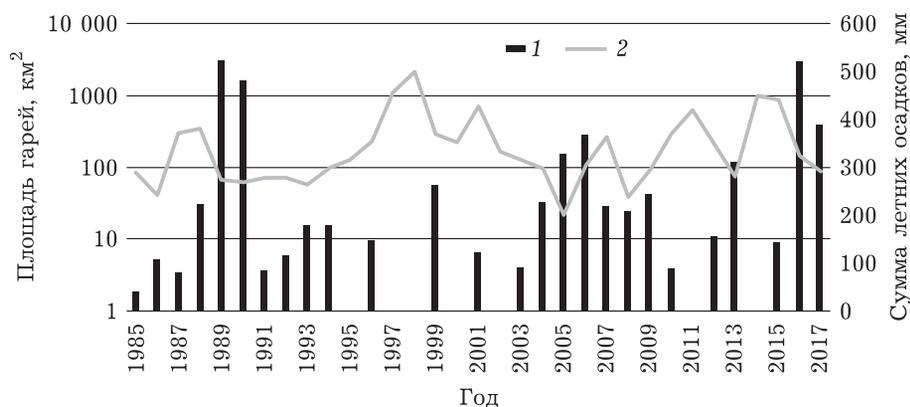


Рис. 3. Погодичная динамика площади пожаров в лесотундре на территории ЯНАО. 1 – площадь пожаров, км²; 2 – сумма осадков летнего периода (метеостанция пос. Тазовский)

фикацию фитоценозов, наиболее подверженных пожарам. По результатам ГИС-анализа максимальная площадь пожаров (2317 км²) отмечена для участков с сочетанием ерниковых и ивняково-ерниковых кустарничково-лишайниково-моховых тундр, лишайничных лишайниково-кустарничковых редколесий и плоскобугристых травяно-мохово-лишайниковых болот (табл. 2).

Следующими по занимаемой площади идут лишайничные кустарничково-мохово-лишай-

никовые редколесья в сочетании с лишайниковыми тундрами. В процентном выражении наиболее повреждаемыми пожарами являются лишайничные и елово-лишайничные лишайниковые редколесья, широко распространенные в южной части лесотундры (23,1 %). Неожиданно выявлена значительная доля (20,1 %) поврежденных огнем комплексных болот с господством на положительных формах мезорельефа кустарничково-мохово-лишайниковых сообществ. Повышенная горимость

Т а б л и ц а 2
Площадь различных типов растительных сообществ, нарушенных пожарами в 1985–2018 гг.

Тип растительных сообществ и их мезокомбинации [Ильина и др., 1985]	Общая площадь, км ²	Площадь гарей, км ² %
1. Ерниковые и ивняково-ерниковые кустарничково-лишайниково-моховые тундры в сочетании с лишайничными лишайниково-кустарничковыми редколесьями и плоскобугристыми травяно-мохово-лишайниковыми болотами	15071	2317,3 15,4
2. Лишайничные кустарничково-мохово-лишайниковые редколесья в сочетании с лишайниковыми тундрами	8097	982,2 12,1
3. Ерnikово-сфагново-лишайниковые на буграх, осоково-сфагновые и пушицево-сфагновые в мочажинах плоскобугристые комплексные болота	5912	739,7 12,5
4. Лишайнично-березовые, елово-березово-лишайничные кустарничково-мохово-лишайниковые редколесья	2968	551 18,6
5. Ерниковые и ивняково-ерниковые кустарничково-моховые тундры	7277	516,8 7,1
6. Осоково-сфагновые, осоково-гипновые на полигонах, кустарничково-мохово-лишайниковые на валиках комплексные болота	2288	458,8 20,1
7. Елово-лишайничные ерnikово-лишайниково-зеленомошные редколесья	3884	457,5 11,8
8. Лишайничные и елово-лишайничные лишайниковые редколесья	1907	441,2 23,1
9. Багульниково-ерnikово-лишайниковые на буграх, осоково-сфагновые в мочажинах плоскобугристые болота	3801	364,7 9,6
10. Ерниковые, ивняково-ерниковые мохово-лишайниковые тундры	3492	338,2 9,7

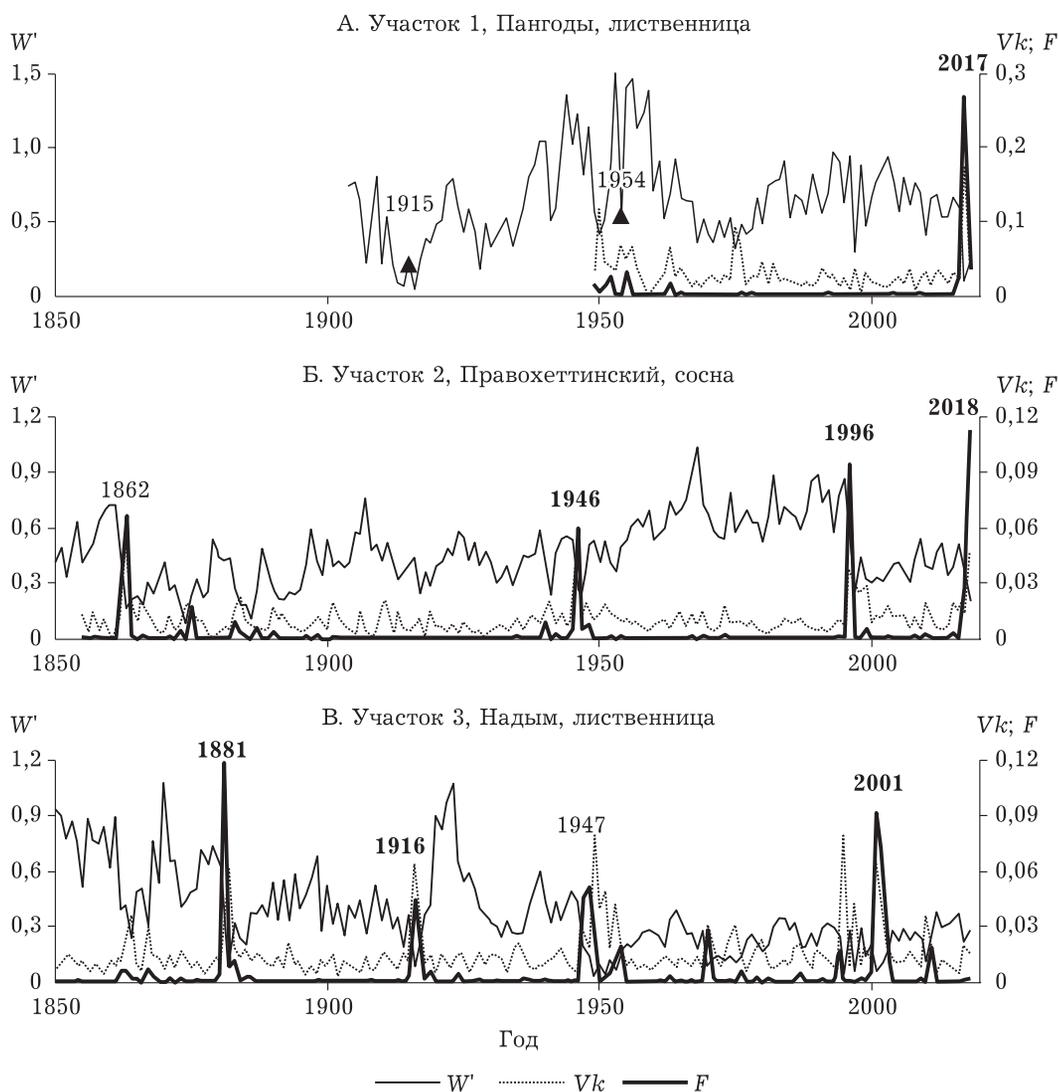


Рис. 4. Датировка пожаров по хронологиям ширины годичных колец W' (полужирные линии), вариации чувствительности Vk (пунктирные линии) и индикатору пожаров F (жирные линии).

Даты пожаров, обозначенные обычным шрифтом, установлены по показателю F , полужирным шрифтом – подтверждены документально по ожогам ствола. Номера участков соответствуют рис. 1. Треугольниками выделены даты пожаров, установленные только по пожарным шрамам на единичных деревьях

болот в таежной зоне Сибири ранее отмечена при анализе пожаров, проведенном с использованием данных спутникового радиометра сверхвысокого разрешения за период 1995–2002 гг. [Soja et al., 2006]. Таким образом, пересыхающие в период продолжительной засухи торфяники также относятся к природным объектам повышенной пожарной опасности.

Дендрохронологическая датировка пожаров. Результаты датирования пожаров с использованием дендрохронологических методов представлены на рис. 4. О дате пожаров судили по дендрохронологическому показателю пожаров F с учетом величины дальней-

шего радиального прироста. Расчетные даты пожаров, проверенные данными учета лесного фонда, космоснимков Landsat и наличием пожарных подсушин, выделены на графике жирным шрифтом.

Все известные по документальным источникам, космическим снимкам, а также по традиционной датировке ожоговых шрамов сроки пожаров на обследованных участках совпадают с датами, установленными расчетом дендрохронологического показателя F . Пожары отмечены в 2018, 2016, 2001, 1996, 1954, 1946 (1947), 1915 (1916), 1881, 1862 годах.

ОБСУЖДЕНИЕ

Подсчеты показали, что за один год воздействию пожаров в среднем подвергается 271 км² (0,32 % площади лесотундры). Учитывая, что в России средняя площадь распространения природных пожаров за год составляет 80000–90000 км² [Швиденко, Щепаченко, 2013], т. е. 0,47–0,52 % территории, горимость в лесотундре ЯНАО примерно на треть меньше среднероссийских показателей. В таежных районах Сибири доля поврежденных за год пожарами земель многократно выше и составляет в Эвенкии 1,46 %, Приангарье – 1,65 %, Якутии – 2,23 % [Пономарев и др., 2018]. Относительно слабая горимость в лесотундре ЯНАО связана с общей переувлажненностью территории и небольшим, по сравнению с тайгой, запасом горючих материалов в редкостойных лесах и редколесьях. Известно, что одно из главных условий распространения пожара – наличие горючих материалов, количество которых возрастает с ростом фитомассы. В таежной зоне как фитомасса преобладающих ценозов, так и мортмасса существенно больше, чем в тундровой. По данным Н. А. Базилевич [1993], фитомасса ивняково-ерниковых кустарничково-моховых тундр Ямала составляет 23,2 т/га, в то время как в лесотундровых лиственничных редколесьях Западной Сибири – 35 т/га, в северотаежных лиственничниках – 90 т/га. Поэтому в районах, где соседствует тундровая и бореальная растительность, пожары чаще возникают в лесах. К примеру, на Аляске наиболее частые пожары отмечаются в хвойных лесах [Kolden, Abatzoglou, 2012].

Анализ распределения пожаров по типам растительных сообществ показал, что наиболее часто пожары возникают в сообществах с доминированием в составе напочвенного покрова лишайников (лиственничные лишайниковые редколесья, багульниково-ернико-

во-лишайниковые плоскобугристые болота). Очевидно, главное значение имеет неспособность лишайников к регулированию водного баланса, что приводит к их практически полному высыханию в засушливые периоды. Наилучшие условия для высушивания напочвенного покрова при наличии достаточной биомассы в лесотундрах Западной Сибири создаются в светлохвойных редкостойных лесах, представленных лиственничниками лишайниковыми.

Существует множество исследований, посвященных выявлению условий, благоприятствующих пожарам [Kolden, Abatzoglou, 2012; Валендик и др., 2014; Chang et al., 2016]. Установлено, что крупные пожары обычно возникают после продолжительных засух, когда горючие материалы (отмершая древесина, опад мхов и лишайников, напочвенная подстилка и торф) высыхают на больших территориях. Сильные ветры способствуют быстрому их распространению. Как показало сопоставление площади пожаров с климатическими показателями, в годы с максимальной горимостью сумма осадков, выпавших летом, была низкой. Отмечена положительная достоверная корреляция площади пожаров с показателями температурного режима – со средней температурой летнего периода (T), максимальной температурой (T_{\max}), суммой $t > 0$, и отрицательная – с суммой летних осадков (табл. 3). Таким образом, наиболее часто пожары возникают в периоды, когда из-за малого количества осадков и высоких температур воздуха происходит интенсивное высушивание поверхностных горючих материалов – опада, мхов и лишайников, торфяного слоя. К примеру, катастрофический пожар, возникший в июле 2016 г. в 60–80 км к северо-западу от г. Новый Уренгой и охвативший площадь более 600 км², обусловлен продолжительным засушливым периодом, когда сум-

Т а б л и ц а 3

Значения коэффициентов ранговой корреляции Спирмена между площадью пожаров и метеопозаказателями

Метеостанция	$t_{\text{ср. годовая}}$	t_{max}	t_{min}	Сумма $t > 0$	$T_{\text{ср. летняя}}$	Сумма осадков летнего периода
Тазовский	0,19	0,41	-0,24	0,29	0,27	-0,49
Салехард	0,14	0,53	-0,18	0,45	0,50	-0,30
Надым	0,24	0,45	-0,05	0,31	0,44	-0,36
Ньда	0,23	0,58	-0,06	0,38	0,38	-0,42

П р и м е ч а н и е. Выделены статистически значимые значения при $p < 0,05$.

ма осадков за июль, по данным метеостанции Надым, была менее 11 мм, а величина комплексного показателя пожарной опасности (индекс Нестерова) в конце месяца превысила 7000, что соответствует категории “высокой опасности”.

Метеорологические условия, приводящие к возникновению лесных и тундровых пожаров, повторяются во времени. В лесотундре ЯНАО максимальная площадь пожаров отмечена в 1990, 1991, 2016 и 2017 гг. (см. рис. 3). Умеренное распространение пожаров наблюдалось в период 2005–2009 гг. Слабо проявлялись пожары в 1995, 1997–1998, 2000–2003, 2011 и 2014 гг. В предшествующих исследованиях [Soja et al., 2006] также отмечалась относительно небольшая (0,149 % территории) горимость в лесотундре Сибири за период 2000–2002 гг. В 2010 г., когда из-за аномальной жары наблюдалась катастрофическая ситуация с пожарами в таежной зоне [Швиденко и др., 2011; Бондур, 2011], в лесотундре из-за достаточного количества осадков количество пожаров было незначительным.

В различных обобщающих работах отмечен рост числа и площади лесных пожаров в России [Швиденко и др., 2011; Барталев и др., 2017]. Значимый тренд возрастания горимости выявлен для лиственничников центральной Сибири [Харук, Пономарев, 2017]. Однако в целом для России, хотя тренд увеличения площадей сгоревших лесов России наблюдается, статистически значимого подтверждения он не имеет [Швиденко и др., 2011]. Проведенная нами обработка рядов данных с использованием теста Манна – Кендалла не выявила

Т а б л и ц а 4
Результаты теста Манна – Кендалла

Район	Test Z
Вся лесотундра	1,08
Ландшафтные провинции	
Урало-Обская	0,16
Нижнеобская	1,43
Салехардская	2,11
Надым-Пурская северная	-0,39
Нижнетазовская	1,30

П р и м е ч а н и е. Выделена статистически значимая величина при $p < 0,05$.

значимых трендов роста площади гарей как для всей зоны лесотундры Западной Сибири, так и для отдельных ландшафтных районов, за исключением положительного тренда в Салехардской провинции (табл. 4).

Таким образом, по данным анализа ДДЗ в лесотундре Западной Сибири выявить тенденцию к увеличению площади природных пожаров за период 1985–2018 гг. не удалось. Вероятно, отсутствие трендов связано с недостаточным промежутком времени, охваченным исследованиями (1985–2018 гг.), и значительным варьированием площади пожаров.

Одним из последствий роста температур воздуха, характерного для северных районов Западной Сибири, может быть уменьшение межпожарного интервала. Обработка космоснимков показала, что площадь пожаров была максимальной в 1989–1990 и в 2017 гг. Период высокой пожарной активности в лесотундре Западной Сибири в масштабе всей зоны повторился через 27 лет. По данным дендрохронологических исследований, охвативших период 1850–2018 гг., периодичность пожаров на локальных участках изменялась от 15 до 60 лет (см. рис. 4). Средняя периодичность пожаров составляет около 30 лет, что достаточно близко к межпожарному интервалу последних трех десятилетий, выявленному по космоснимкам.

Нужно отметить, что в предшествующих исследованиях повторяемость пожаров в сходных ландшафтных и лесорастительных условиях оценивалась более длительными сроками. Так, по данным дендрохронологической датировки, в северных редкостойных лесах величина межпожарного интервала оценена в 80–100 лет [Shvidenko, Nilsson, 2000]. Методика, основанная на использовании радиометрических спутниковых снимков, дала еще более длительный интервал – 227–556 лет [Soja et al., 2006]. Однако для светлохвойных лесов таежной зоны данные существенно меньше: периодичность пожаров оценена в 15–70 лет [Shvidenko, Nilsson; 2000] и 17–133 года [Soja et al., 2006]. Таким образом, длительность межпожарного интервала в лесотундре Западной Сибири имеет сходные значения, выявленные для более южных светлохвойных лесов. Вероятно, небольшой интервал обусловлен двумя причинами: интенсивным антропогенным воздействием и относительно

быстрым накоплением горючих растительных материалов в ходе восстановительных сукцессий, протеканию которых способствует послепожарное поступление в почву зольных элементов и улучшение теплового режима мерзлотных почв.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пожары играют значительную роль в динамике ландшафтов зоны лесотундры Западной Сибири, так как только в последние 33 года воздействию пожаров подверглись 10,5 % ее территории. Крупные пожары возникают в основном на территории Надым-Пурской, Салехардской, Нижнетазовской ландшафтных провинций. Наиболее крупные пожары приурочены к месторождениям углеводородов, что свидетельствует об их антропогенном происхождении. На территории Обского долинно-речного комплекса возникают только небольшие пожары. Наибольшие площади были охвачены пожарами в 1990, 1991 и 2017 гг. Средняя площадь фитоценозов, подвергшихся воздействию пожаров, составляет 271 км² в год, что примерно на одну треть меньше среднероссийских показателей.

Возникновение пожаров в большинстве случаев происходит в кустарниковых лишайниково-моховых тундрах, редколесьях с кустарничково-лишайниковым покровом, на плоскобугристых мохово-лишайниковых болотах. Геоботаническим индикатором повышенной пожароопасности является доминирование в структуре растительного покрова синузид эпигейных кустистых лишайников. Наибольшая степень повреждения (23 %) выявлена в листовенничных и елово-лиственничных лишайниковых редколесьях, широко распространенных в южной части лесотундры. Динамика крупных пожаров в значительной степени зависит от метеоусловий. Крупные пожары возникают при высоких летних температурах, высоких максимальных температурах, больших значениях суммы положительных температур и малом количестве осадков, выпавших в летний период, т. е. когда лето жаркое и сухое.

По данным дендроиндикационных исследований, величина межпожарного интервала в редкостойных листовенничниках изменялась от 15 до 60 лет (в среднем составила около 30 лет). Статистическая обработка рядов дан-

ных не выявила тренда к возрастанию горимости из-за значительного погодичного варьирования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-45-890002/18, и по программе проекта фундаментальных исследований СО РАН VI.52.1. проект АААА-А17-117050400146-1.

ЛИТЕРАТУРА

- Адаев В. Н. Дым над тайгой и тундрой: огонь в культуре северных народов Западной Сибири как средство преобразования среды обитания // Вестн. археологии, антропологии и этнографии. 2018. № 2 (41). С. 138–147.
- Арефьев С. П. Оценка устойчивости кедровых лесов Западно-Сибирской равнины // Экология. 1997. № 3. С. 149–157 [Aref'ev S. P. Assessment of the stability of the Siberian stone pine forests in the Western Siberian plain // Russian Journal of Ecology. 1997. Vol. 28, N 3. P. 149–157].
- Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа. Омск: ФГУП Омск. картограф. фабрика, 2004. 301 с.
- Базилевич Н. И. Биологическая продуктивность экосистем северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
- Барталев С. А., Егоров В. А., Ефремов В. Ю., Лупян Е. А., Стыценко Ф. В., Флитман Е. В. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения Modis и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 2. С. 9–26.
- Барталев С. А., Стыценко Ф. В., Хвостиков С. А., Лупян Е. А. Методология мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых наблюдений // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 6. С. 176–193.
- Бондур В. Г. Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // Исследование Земли из космоса. 2011. № 3. С. 3–13 [Bondur V. G. Satellite monitoring of wildfires during the anomalous heat wave of 2010 in Russia // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2011. Vol. 47, N 9. P. 1039–1048].
- Валендик Э. Н., Кисилыхов Е. К., Рыжкова В. А., Пономарев Е. И., Данилова И. В. Крупные пожары в таежных ландшафтах Центральной Сибири // География и природ. ресурсы. 2014. № 1. С. 52–59 [Valendik E. N., Kisilyakhov E. K., Ryzhkova V. A., Ponomarev E. I., Danilova I. V. Conflagration fires in taiga landscapes of central Siberia // Geography and Natural Resources. 2014. Vol. 35, N 1. P. 41–47].
- Дроздов Д. С., Украинцева Н. Г., Царев А. М., Чекрыгина С. Н. Изменения температурного поля мерзлых пород и состояния геосистем на территории Уренгойского месторождения за последние 35 лет (1974–2008) // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV, № 1. С. 22–31.
- Ильина И. С., Лапшина Е. И., Лавренко Н. Н., Мельцер Л. И., Романова Е. А., Богоявленский Б. А., Махно В. Д. Растительность Западно-Сибирской равнины. Карта масштаба 1 : 1500000. М.: ГУГиК, 1976.

- Ильина И. С., Лапшина Н. Н., Лавренко Н. Н., Мельцер Л. И., Романова Е. А., Богоявленский Б. А., Махно В. Д. Растительный покров Западно-Сибирской равнины. Новосибирск: Наука, 1985. 250 с.
- Корниенко С. Г. Оценка влияния разработки Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения на состояние территории лесотундры по данным ИСЗ Landsat // Исследование Земли из космоса. 2009. № 4. С. 78–87.
- Московченко Д. В., Московченко М. Д., Тигеев А. А. Оценка площади природных пожаров Ямало-Ненецкого автономного округа с помощью данных дистанционного зондирования // Науч. вестн. ЯНАО. 2019. Вып. 2 (103). С. 41–46.
- Матвеева Н. В. Зональность в растительном покрове Арктики. СПб.: БИН РАН, 1998. 220 с.
- Павлов А. В., Малкова Г. В. Динамика криолитозоны России в условиях современных изменений климата XX–XXI веков // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 5. С. 44–51.
- Пономарев Е. И., Скоробогатова А. С., Пономарева Т. В. Горимость лесов Сибири и межсезонные вариации уровня тепло- и влагообеспеченности // Метеорология и гидрология. 2018. № 7. С. 45–55 [Ponomarev E. I., Ponomareva T. V., Skorobogatova A. S. Wildfire occurrence in Siberia and seasonal variations in heat and moisture supply // Russian Meteorology and Hydrology. 2018. Vol. 43, N 7. P. 456–463].
- Пономарев Е. И., Харук В. И. Горимость лесов Алтае-Саянского региона в условиях наблюдаемых изменений климата // Сиб. экол. журн. 2016. Т. 23, № 1. С. 38–46. [Ponomarev E. I., Kharuk V. I. Wildfire occurrence in forests of the Altai–Sayan region under current climate changes // Contemporary Problems of Ecology. 2016. Vol. 9, N 1. P. 29–36].
- Рубцов А. В., Сухинин А. И., Ваганов Е. А. Системный анализ погодной пожарной опасности при прогнозировании крупных пожаров в лесах Сибири // Исследование Земли из космоса. 2010. № 3. С. 62–70.
- Тарабукина В. Г., Савинов Д. Д. Влияние пожаров на мерзлотные почвы. Новосибирск: Наука, 1990. 120 с.
- Украинцева Н. Г., Дроздов Д. С., Попов К. А., Гравис А. Г., Матышак Г. В. Ландшафтная индикация локальной изменчивости свойств многолетнемерзлых пород (Уренгойское месторождение, Западная Сибирь) // Криосфера Земли. 2011. Т. XV, № 4. С. 37–40.
- Харук В. И., Им С. Т., Рэнсон К. Дж., Сан Г. Космоснимки высокого разрешения в анализе временной динамики экотона лесотундры // Исследование Земли из космоса. 2005. № 6. С. 46–55.
- Харук В. И., Пономарев Е. И. Пространственно-временная горимость лиственничников Центральной Сибири // Экология. 2017. № 6. С. 413–419 [Kharuk V. I., Ponomarev E. I. Spatiotemporal characteristics of wildfire frequency and relative area burned in larch-dominated forests of Central Siberia // Russian Journal of Ecology. 2017. Vol. 48, N 6. P. 507–512].
- Швиденко А. З., Щепашенко Д. Г., Ваганов Е. А., Сухинин А. И., Максютов Ш. Ш., МкКаллум И., Лакида И. П. Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет // Докл. РАН. 2011. Т. 441, № 4. С. 544–548 [Shvidenko A. Z., Shchepashchenko D. G., McCallum I., Lakida I. P., Vaganov E. A., Sukhinin A. I., Maksyutov Sh. Sh. Impact of wildfire in Russia between 1998–2010 on ecosystems and the global carbon budget // Doklady Earth Sciences. 2011. Vol. 441, N 2. P. 1678–1682].
- Швиденко А. З., Щепашенко Д. Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61 [Shvidenko A. Z., Shchepashchenko D. G. Climate change and wildfires in Russia // Contemporary Problems of Ecology. Vol. 6, N 7. 2013. P. 683–692].
- Шиятов С. Г., Ваганов Е. А., Кирдянов А. В., Круглов В. Б., Мазепа В. С., Наурызбаев М. М., Хантемиров Р. М. Методы дендрохронологии. Ч. I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации. Красноярск: Изд-во КрасГУ, 2000. 80 с.
- Allen J. L., Sorbel B. Assessing the differenced Normalized Burn Ratio's ability to map burn severity in the boreal forest and tundra ecosystems of Alaska's national parks // Int. J. Wildland Fire. 2008. N 17. P. 463–475.
- Bret-Harte M. S., Mack M. C., Shaver G. R., Huebner D. C., Johnston M., Mojica C. A., Pizano C., Reiskind J. A. The response of Arctic vegetation and soils following an unusually severe tundra fire // Philosophical Transactions of The Royal Society B. Biol. Sci. 2013. Vol. 368: 20120490. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2012.0490>
- Chambers S. D., Beringer J., Randerson J. T., Chapin F. S. Fire effects on net radiation and energy partitioning: Contrasting responses of tundra and boreal forest ecosystems // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2005. Vol. 110. ND 9.
- Chang Y., Zhu Z., Fen Y., Li Y., Bu R., Hu Y. The spatial variation in forest burn severity in Heilongjiang Province, China // Natural Hazards. 2016. Vol. 81. P. 981–1001.
- García M. J. L., Caselles V. Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data // Geocarto International. 1991. Vol. 6 (1). P. 31–37.
- Godwin D. R., Kobziar L. N. Fire comparison of burn severities of consecutive large-scale fires in Florida sand pine scrub using satellite imagery analysis // Fire Ecol. 2011. Vol. 7 (2). P. 99–113.
- Howard S. M., Lacasse J. M. An evaluation of gap-filled Landsat SLC-Off imagery for wildland fire burn severity mapping // Photogramm. and Remote Sens. 2004. N 70. P. 877–880.
- Key C. H., Benson N. C. Measuring and remote sensing of burn severity / Eds. L. F. Neuenschwander, K. C. Ryan // Proc. Joint Fire Science Conf. and Workshop, Vol. II, Boise, ID, 15–17 June 1999. University of Idaho and International Association of Wildland Fire. 1999. 284 p.
- Key C. H., Benson N. C. Landscape assessment: ground measure of severity, the Composite Burn Index// FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. General Technical Report / Ed D. C. Lutes. Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2005.
- Kolden C. A., Abatzoglou J. T. Wildfire consumption and interannual impacts by land cover in Alaskan boreal forest // Fire Ecol. 2012. Vol. 8 (1). P. 98–114.
- Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences / Ed. E. R. Cook, L. A. Kairiukstis. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publ., 1990. 364 p.
- Miller J. D., Thode A. E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR) // Remote Sensing of Environment. 2007. Vol. 109. P. 66–80.

- Odion D. C., Hanson C. T. Fire severity in conifer forests of the Sierra Nevada, California // *Ecosystems*. 2006. N 9. P. 1177–1189.
- Potić I. M., Čurčić N. B., Potić M. M., Radovanović M. M., Tretiakova T. N. Remote sensing role in environmental stress analysis: East Serbia wildfires case study (2007–2017) // *J. Geogr. Inst. Cvijic*. 2017. Vol. 67 (3). P. 249–264.
- Salmi T., Määttä A., Anttila P., Ruoho-Airola T., Amnell T. Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates – the Excel template application MAKES-ENS // *Publications on air quality*. No. 31. Report code FMI-AQ-31 Finnish Meteorological Institute. Helsinki, 2002. 35 p.
- Shvidenko A. Z., Nilsson S. Extent, distribution, and ecological role of fire in Russian forests // *Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest* / Eds. E. S. Kasischke, B. J. Stocks. N. Y.: Springer-Verlag, 2000. P. 132–150.
- Soja A. J., Shugart H. H., Sukhinin A., Conard S., Stackhouse Jr. P. W. Satellite-derived mean fire return intervals as indicators of change in Siberia (1995–2002) // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2006. N 11. P. 75–96.
- Soverel N. O., Coops N. C., Perrakis D. D. B., Daniels L. D., Gergel S. E. The transferability of a dNBR-derived model to predict burn severity across 10 wildland fires in western Canada // *J. Wildland Fire*. 2011. N 20. P. 518–531.
- Syphard A. D., Keeley J. E., Pfaff A. H., Ferschweiler K. Human presence diminishes the importance of climate in driving fire activity across the United States // *PNAS*. 2017. Vol. 114. P. 13750–13755.
- Tsuyuzaki S., Iwahana G., Saito K. Tundra fire alters vegetation patterns more than the resultant thermokarst // *Polar Biol*. 2018. N 41. P. 753–761.

Spatio-temporal analysis of wildfires in the forest-tundra of Western Siberia

D. V. MOSKOVCHENKO^{1, 2}, S. P. AREF'EV^{1, 2}, M. D. MOSKOVCHENKO², A. A. YURTAEV²

¹*Tyumen Scientific Center of SB RAS
625026, Tyumen, Malygin str., 86
E-mail: ipos@ipdn.ru*

²*Tyumen State University
625003, Tyumen, Volodarsky str., 6*

Climate change of recent decades significantly increases the threat of the occurrence and distribution of wildfire in the Northwest Siberia. However, little is known about the spatial and temporal patterns of fires and their relationship with climate and vegetation in this area. As a result of the processing of Landsat satellite images for the period 1985–2017, it was determined that 10.5 % of the Western Siberia forest tundra was exposed to fires. Maximum relative area of burned forests (23 %) was found in larch and spruce–larch lichen woodlands. Geobotanical indicator of increased fire hazard is the dominance of sinusias of epigenic lichens in the vegetation cover. It is shown that the majority of heavily burned areas were distributed in the central part of the forest tundra within largest gas fields. Our results showed a positive significant correlation between square of burnt areas and summer temperature regime (average and maximum summer temperatures) and negative correlation between burned areas and the amount of summer precipitation. Dendrochronological analysis showed that the frequency of fires varied from 15 to 60 years (an average of about 30 years).

Key words: Western Siberia, forest-tundra, natural fires, space images, dendrochronology.