

УДК 551.582

## ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ В ЛЕСАХ ТОМСКОГО РЕГИОНА: КЛИМАТИЧЕСКИЙ ФАКТОР И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РИСКИ

Л.И. Кижнер, Н.К. Барашкова, О.В. Носырева



Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

На основе оценки климатической изменчивости комплекса метеорологических величин, определяющих потенциальную возможность возникновения пожара, выявлено определенное влияние климатического фактора на наблюдающееся учащение лесных пожаров в регионе. Оцениваются экономические показатели степени адаптации лесного комплекса к современным климатическим условиям.

**Ключевые слова:** показатель пожарной опасности, климатические изменения, высокая пожарная опасность, адаптация, средние потери

### Введение

В последние годы в России, как и во многих частях земного шара, остро встала проблема возникновения пожаров на больших территориях. Эти стихийные явления стали возникать не только в теплые полугодия, но и в течение всего года. Причин такого проявления стихийных бедствий, очевидно, несколько, но есть и сторонники влияния климатического фактора. Одним из основных факторов возникновения пожаров являются условия погоды. Мониторинг, в том числе и прогноз, условий, благоприятствующих возникновению пожаров по территории нашей страны, обеспечивает Гидрометеорологическая служба России. Эти условия изучены достаточно подробно и называются пожарной опасностью (ПО). Выявлено, что ПО тесно связана с режимом выпадения осадков, и она тем выше, чем продолжительней период отсутствия осадков.

Опасной пожарной стихией являются лесные пожары, ежегодно причиняющие огромный ущерб экологического (в том числе биоразнообразию и местам обитания ценных и редких видов животных и растений), социального (угрозы жизни населению) и экономического характера [AghaKouchak et al., 2020]. Лесные пожары негативно влияют и на изменения климата, увеличивая содержание CO<sub>2</sub> в атмосфере за счет потерь углерода, накопленного в биомассе и почве [Всемирный..., 2021].

Возникновение пожаров происходит вследствие антропогенного (человеческого) и естественного факторов [Hansen et al., 2011; Littell et al., 2016; Abatzoglou et al., 2018]. На пожары, возникшие по вине человека, приходится примерно 60 % общей площади их утраты. Исследования (например, [Владимирова и др., 2017]) подтверждают, что промышленные рубки, строительство дорог и другой инфраструктуры в первозданных лесах приводят к росту

числа пожаров. При этом Россия входит в тройку мировых лидеров по скорости и площади утраты первозданных лесов наряду с Бразилией и Канадой [Всемирный..., 2021].

В XXI в. количество лесных пожаров существенно выросло. Рост обусловлен, с одной стороны, расширением хозяйственной деятельности человека, с другой – изменением естественных условий, способствующих увеличению ПО [Morgan et al., 2001; Flannigan et al., 2013; Ponomarev et al., 2016; Gorbatenko et al., 2020].

Территория Томской области находится в таежной зоне Западной Сибири, лесная отрасль является одной из ведущих в хозяйственном комплексе. За период 2012–2019 гг. от пожаров погибло более 20 тыс. га лесных насаждений [Томская..., 2019; Томская..., 2020]. Наиболее сильные пожары здесь отмечались в 2012–2014, 2016–2018 гг. В аномальное жаркое и сухое лето 2012 г. было зарегистрировано 518 лесных пожаров на общей площади 102120,3 га. Шлейфы дыма, дешифрируемые на спутниковых снимках, распространялись по территории области и соседних регионов. В Томске вертикальная и горизонтальная видимость составила 80–100 м, наблюдалась мгла и сильный запах дыма [Поляков и др., 2014].

Согласно Второму оценочному докладу Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, в южной части Сибири к концу XXI в. пожароопасный сезон будет на 20–50 дней длиннее, что существенно увеличит количество возгораний [Второй..., 2014].

В этой связи представляет значительный научный и практический интерес климатическая оценка тенденций в условиях благоприятных возникновению пожаров на конкретных территориях.

Целью настоящей работы является оценка для станции Томск климатических изменений метеорологических факторов, влияющих на потенциальную

возможность возникновения пожара, и экономическая трактовка происходящих событий.

### Метеорологические факторы пожарной опасности

Высокая ПО обуславливается синоптическими процессами (длительное господство антициклона над огромными территориями), сезоном года, характером растительности, а также метеорологическими условиями: температурой и влажностью воздуха, режимом осадков и ветра. Последняя характеристика оказывает влияние на скорость испарения и распространение уже возникшего пламени.

Для оценки ПО разработаны специальные показатели (индексы), в которых учитывается, в первую очередь, температурно-влажностный режим временного периода. Заметим, что ПО – это комплекс благоприятных условий погоды, который не всегда приводит к возникновению пожара, поэтому часто добавляют определение «потенциальная» пожарная опасность (ППО). Усугубление ситуации может произойти как вследствие человеческого фактора, так и при возникновении дополнительных естественных причин (например, сухие грозы).

В показателях, характеризующих ПО, используются три первые вышеуказанные метеорологические величины, а для оценки ППО применяют комплексные характеристики, включающие эти величины. За рубежом используется индекс FFI (forest fire index – индекс лесных пожаров [Gerstengarbe et al., 1999]. Он рассчитывается в течение вегетационного периода. В числителе суммируется количество дней, когда максимальная температура была выше 25 °С, а в знаменателе суточное количество осадков за этот период.

В России в службе лесного хозяйства для характеристики пожароопасности обычно используется комплексный показатель пожарной опасности в лесу (КП), а метеорологическая опасность возгорания леса определяется ежедневно и подразделяется по классам горимости леса [ГОСТ..., 1099; Шерстюков, Шерстюков, 2007].

В нашем исследовании используется показатель КП, определяемый по формуле В.Г. Нестерова:

$$КП = \sum_{i=1}^n (T - Td)T, \quad (1)$$

где  $T$  – температура в срок наблюдений, когда обычно отмечается ее максимум, °С;  $Td$  – температура точки росы в этот же срок;  $n$  – число сухих дней без осадков (в том числе и дней с осадками менее 2,5 мм). Пожароопасность тем выше, чем больше величина КП.

### Материал и методы исследования

Для достижения поставленной цели были рассмотрены условия на станции Томск в бездождные

периоды (БДП) в пожароопасные сезоны (апрель–сентябрь) с 1924 по 2015 г. БДП и их характеристики – начало и конец, длительность периода без выпадения осадков, температура воздуха (средняя и максимальная), минимальная относительная влажность воздуха и скорость ветра (средняя и максимальная) определены по Специализированному массиву данных, представленному на сайте ФБГУ «СибНИГМИ», г. Новосибирск (<http://sibnigmi.ru/cgi-bin/inst/index.pl?5&81>).

Всего выявлено 3 003 БДП с общим количеством сухих дней 9 426. Для каждого периода по максимальной температуре и минимальной влажности определен индекс КП, который при такой методике расчета, соответственно, может быть незначительно превышен. Рассчитаны следующие показатели, характеризующие структуру БДП и ПО:

1) непрерывная продолжительность бездождных периодов (ПБДП) по грациям от 1 до 13 дней с шагом в один день, а далее – через три дня;

2) ежегодное число дней ( $S_i$ ) со значениями КП, характеризующими разную пожарную опасность:  $S_1$  – отсутствие опасности ( $300 \geq КП > 0$ );  $S_2$  – малая ( $1\ 000 \geq КП > 300$ );  $S_3$  – средняя ( $4\ 000 \geq КП > 1\ 000$ );  $S_4$  – высокая ( $10\ 000 \geq КП > 4\ 000$ );  $S_5$  – чрезвычайная ( $КП > 10\ 000$ ). Величина КП, равная 1 000 и более, является критической, так как именно в этих условиях велика опасность возгорания леса, особенно, при наличии источника огня (по вине человека или молнии) [Шерстюков, Шерстюков, 2007];

3) суммарное значение КП (обозначено как  $\sum КП$ ), полученное за пожароопасный сезон каждого года. При этом суммировались только значения  $КП > 1\ 000$ , т.е. имеющие или превышающие критерий «средней пожароопасности». Этот показатель указывает на степень пожароопасности сезона;

4) максимальная за каждый год величина  $КП_{\max}$  (характеризует интенсивность возникающих пожароопасных ситуаций);

5) годовое число дней ( $N$ ) с  $КП > 1000$  (рассчитывалось как сумма  $S_3, S_4$  и  $S_5$ ).

Климатические тенденции характеристик 1 и 2 рассчитывались для двух климатических периодов: 1955–1984 гг. (условно принят за период без интенсивных климатических изменений) и 1985–2015 гг. (когда эти изменения стали проявляться в мировом масштабе); характеристики 3 и 5 – в целом за весь исследуемый период, начиная с 1924 г. Сравнительный анализ условий двух климатических периодов проведен с помощью стандартных статистических программ.

### Обсуждение результатов

1. *Непрерывная продолжительность бездождных периодов.*

Наиболее часто (до 80 %) отмечаются периоды длительностью 1–2, 3–4 дня (табл. 1).

Различие в повторяемости разных градаций ПБДП в климатических периодах составляет не более 2 %. Можно отметить лишь, что в последний период наибольшая продолжительность бездождного периода составила 23 дня (2012 г.), а в предыдущий период – 21 день (1955, 1962 гг.).

2. Число дней с разной пожарной опасностью леса ( $S_i$ ).

В обоих климатических периодах преобладают градации средней ( $\approx 45\%$ ) и малой ( $\approx 27\text{--}29\%$ ) опасности, а также отсутствие условий для горения леса. В 1/10 длительности пожароопасных сезонов отмечалась высокая опасность. Градация «чрезвычайная пожарная опасность» не регистрировалась.

Климатические изменения заключаются в незначительном увеличении в последние годы условий для повторяемости высокой пожарной опасности леса и, соответственно, уменьшения малой пожарной опасности.

3. Ежегодная сумма индексов горимости, превышающих значение 1 000 ед.

Минимальные значения этой характеристики составили 5 650 (1930 г.), максимальные – 32 190 (1953 г.), среднее за период – 16 760 (рис. 2).

Другими словами, период от начала наблюдений до 1955 г. можно характеризовать как более контрастный по условиям пожароопасности. В рассматриваемом втором климатическом периоде на терри-

тории Томской области в засушливый и жаркий 2012 г. значение  $\sum КП$  составило 29 540, т.е. не достигло уровня 1953 г. Это подтверждается и значениями гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК), являющегося характеристикой уровня влагообеспеченности территории, которые характеризуют лето 2012 г. как сезон с засухой средней интенсивности [Поляков и др., 2014].

Обнаружено статистически достоверное увеличение характеристики к настоящему времени, рост  $\sum КП$  составляет примерно 6 % за каждые 10 лет, что указывает на определенное влияние климатического фактора на наблюдаемое увеличение ПО в последние годы.

4. Максимальная за каждый год величина  $КП_{max}$ .

Данная характеристика статистически значимо возрастает за последние 30 лет, что указывает на формирование более интенсивных условий горимости леса. Увеличение составляет примерно 10 % за десятилетие (рис. 3).

5. Годовое число дней со значениями  $КП > 1 000$  (N).

Величина N изменяется за период исследований от 18 (10 % от всего числа дней с ПО, 1930 г.) до 100 (55 %, 1953 г.) при среднем значении 53 (30 %). Это означает, что наиболее вероятна ситуация, при которой в 30 % дней теплого полугодия пожарная опасность является средней и выше, во влажный год эта цифра составляет 10 %, в сухой – 55 %. Отмечается статистически значимое увеличение (более 5 % в десятилетие) этой величины (рис. 4).

Повторяемость продолжительности бездождных периодов по градациям, %

Таблица 1

Repeatability of the duration of periods without rain by gradations, %

Table 1

Период, годы	Непрерывная продолжительность, дни							
	1–2	3–4	5–6	7–8	9–10	11–12	13–15	$\geq 16$
1955–1984	58,6	19,6	10,1	4,7	3,5	1,8	1,3	0,3
1985–2015	56,7	20,6	10,1	5,6	2,9	2,0	1,3	0,8

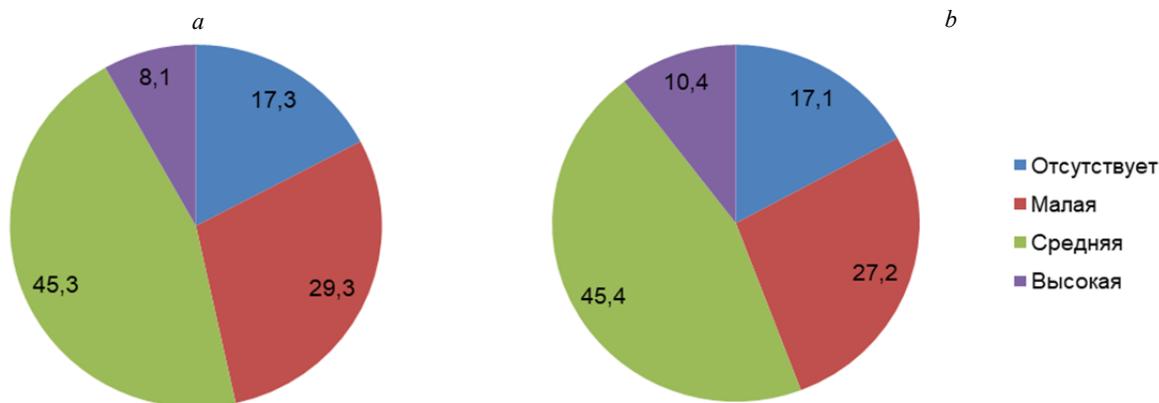
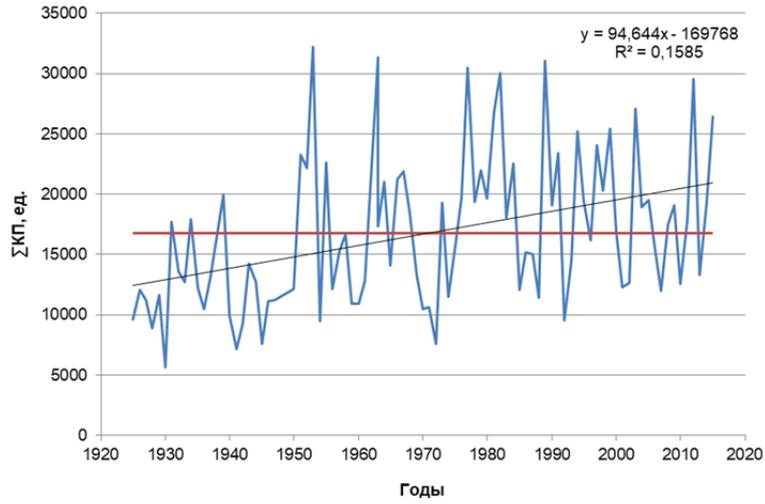


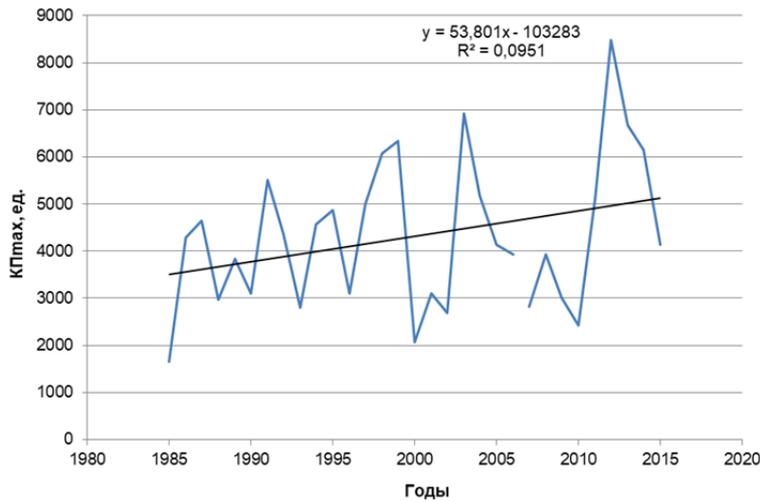
Рис. 1. Распределение числа дней (%) с различной пожарной опасностью по климатическим периодам: 1955–1984 гг. (а); 1985–2015 гг. (б)

Fig. 1. Distribution of the number of days (%) with different fire hazard by climatic periods: 1955–1984 (a); 1985–2015 (b)



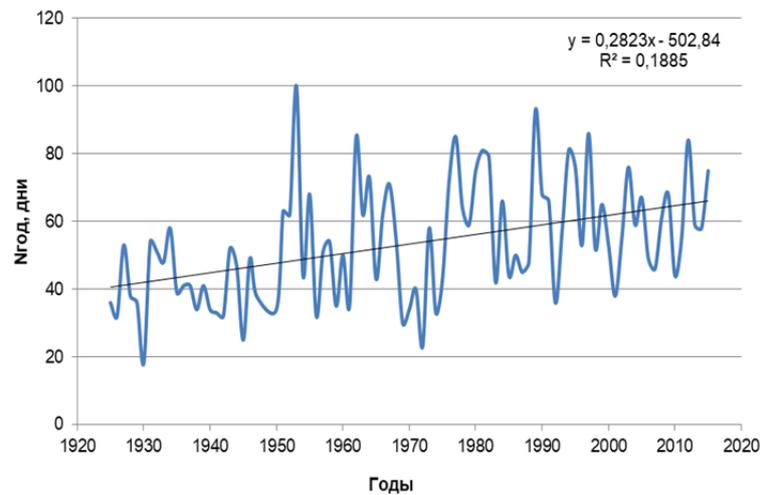
**Рис. 2. Многолетние изменения  $\Sigma КП = S3 + S4 + S5$**   
 Горизонтальная линия – среднее многолетнее значение

**Fig. 2. Long-term changes of complex indicator  $\Sigma CI = S3 + S4 + S5$**   
 Horizontal line – average long-term value



**Рис. 3. Значения  $КП_{max}$**

**Fig. 3. The values  $CI_{max}$**



**Рис. 4. Динамика значений N**

**Fig. 4. Dynamics of values N**

Таким образом, рассмотренные показатели указывают на статистически значимое увеличение природной опасности пожаров по метеорологическим условиям.

### Адаптация лесного комплекса региона к метеорологическим условиям с высокой пожарной опасностью

В настоящее время в России и других странах определены основополагающие подходы к оценкам потерь от опасных условий погоды в зависимости от стратегии потребителя, особенностей хозяйственного объекта, а также качества предоставляемой метеорологической информации (они обобщены, например, в монографии [Хандожко, 2005]). Кроме того, активно разрабатываются механизмы адаптации секторов экономики к наблюдаемым и прогнозируемым изменениям климата. Адаптация потребителя отражает не только потребность в метеорологической, в том числе и прогностической, информации, но и его готовность приспосабливаться к ней, минимизируя возможные потери [Хандожко и др., 2001]. Другими словами, адаптация – это способ учета и подстройки к ожидаемым погодным или климатическим условиям.

Для экономических расчетов в метеорологии часто используется матрица соответствия (сопряженности) между прогнозами и фактической погодой, а также стоимостная матрица (чаще – матрица потерь от опасных погодных условий). Матрицы соответствия включают число случаев различных сочетаний прогностической и фактической информации (они могут быть выражены также в долях от 1 или процентах), в том числе общее число прогнозов за период. Стоимостная матрица, или матрица потерь, учитывает, соответственно, стоимость (С) защитных мероприятий для уменьшения потерь от неблагоприятных метеорологических условий. Дополнительно рассматриваются реальные потери (L) и рассчитывается коэффициент непредотвращенных потерь ( $\epsilon$ ), который изменяется от 0 до 1. Если  $\epsilon = 0$ , меры защиты кардинальны, т.е. потери по условиям предотвращаются полностью; если  $\epsilon$  изменяется от 0 до 1, то меры защиты таковы, что прямые потери предотвращаются частично. Матрица потерь – это выраженные в денежном выражении последствия действий потребителя (принимать или не принимать защитные меры при наличии или отсутствии опасного явления).

Характеризовать степень адаптации можно с помощью различных соотношений, полученных на основе величин С, L,  $\epsilon$ .

В данной работе используется показатель адаптации G [Хандожко, 2005]:

$$G = L(1-\epsilon) / (C+L(1+\epsilon)). \quad (2)$$

Он представляет собой отношение предотвращенных потерь (числитель) к общим издержкам (знаменатель). Интегральная величина  $G^*$  определяется с учетом матрицы соответствия

$$G^* = n11L(1-\epsilon) / (n01C+L(n12+n11\epsilon)). \quad (3)$$

В формуле (3)  $n11$  – число случаев оправдавшихся прогнозов наличия явления (пожара в данном случае);  $n12$  – число неоправдавшихся прогнозов отсутствия явления (ошибки риска);  $n01$  – общее число прогнозов наличия явления за период;  $n11\epsilon L$  – непредотвращенные потери;  $n12L$  – прямые потери, обусловленные прогностическими ошибками риска;  $n01C$  – затраты на меры защиты от пожаров. Видно, что  $G^*$  зависит от экономических характеристик, а также от качества прогнозов погоды (в виде элементов  $n11$ ,  $n12$  и  $n01$ ).

Формула (2) отражает степень адаптации на основе экономических характеристик производства, а формула (3) дает оценку степени адаптации, достигнутой с использованием прогностической метеорологической информации за определенный период. При  $G^* > 1$  предотвращенные потери больше общих потерь, включая производственные ( $n01 \cdot C$ ) и природные ( $L \cdot (n12 + n11\epsilon)$ ). Чем больше показатель отличается от 1, тем адаптация более успешна, производство более рентабельно и лучше приспособлено к «капризам» погоды.

На основе изложенной методики была проведена экономическая оценка возможной адаптации лесного хозяйства к выявленным климатическим изменениям комплексного показателя пожарной опасности. В качестве основной характеристики использовано число дней с высокой пожарной опасностью. В табл. 2 приведены экономические показатели, необходимые для расчетов. К сожалению, в научной литературе их значения отсутствуют, поэтому в работе были рассчитаны по косвенным характеристикам, взятым из разных источников.

Показатель адаптации зависит от специфики производства и экономических показателей. Прогностическая информация представлена в матрицах сопряженности (табл. 3), данные приводятся в долях от 1. Построение матриц осуществлялось с учетом следующих положений:

1) высокая пожарная опасность приводит к возникновению пожара, ее повторяемость в первый климатический период равна 8 % (или 0,08), а во второй – 10,4 % (0,104) (см. рис. 1);

2) оправдываемость прогностической информации составляет 95 % (0,95), что соответствует приблизительно средней величине оправдываемости прогнозов чрезвычайной пожарной опасности (100 %) и прогнозов гроз как источников пожаров (83 %). (Предупрежденность различных опасных явлений, являющаяся характеристикой качества прогнозов, указана в Архиве [Всероссийский..., 2021]).

Дадим расшифровку обозначений и величин на примере первого климатического периода (табл. 3):

– Буквы «Ф» и «П» отражают, соответственно, фактическое наличие опасного явления (в данном случае пожар) и прогноз опасного явления;

– природная повторяемость пожаров составляет 0,08 (первая строка, третий столбец);

– вероятность отсутствия пожаров составляет 0,92 (вторая строка, третий столбец);

– оправдываемость прогнозов гроз составила 0,95 (оправдавшиеся прогнозы – сумма вероятностей главной диагонали);

– вероятность неоправдавшихся прогнозов отсутствия пожаров (0,010) – это вероятность ошибок риска;

– вероятность неоправдавшихся прогнозов наличия пожаров (0,040) – вероятность ошибок перестраховки. Последние две цифры взяты произвольно, но они отражают тот факт, что в реальных прогнозах ошибки перестраховки наблюдаются чаще, чем ошибки риска.

Принцип построения матрицы за второй климатический период аналогичен, при этом учтено, что вероятность пожара равна 0,104, а оправдываемость прогнозов – 0,951.

С использованием экономических показателей (табл. 2) и метеорологической информации (табл. 3) был рассчитан показатель адаптации  $G^*$  как функции от величин  $C/L$  и  $\epsilon$ .

Жирным курсивом выделены области успешной адаптации ( $G^* > 1$ ) для организаций лесной отрасли с разными экономическими характеристиками. Видно, что, чем меньше отношение затрат к убыткам ( $C/L$ ) и коэффициент непредотвращенных потерь ( $\epsilon$ ), тем в большей степени отрасль приспосабливается к высокой степени пожароопасности. Здесь заложен следующий механизм подстройки под критические

условия погоды: с одной стороны, нужно стремиться уменьшать стоимость мер защиты по предупреждению пожаров и уменьшать величину  $\epsilon$ , с другой – при определенной климатической повторяемости пожаров улучшать качество прогнозов погоды за счет уменьшения ошибок риска. Таким образом, технически оснащенные хозяйства и выбирающие оптимальную стратегию лучше подготовлены к неблагоприятным условиям и меньше подвержены их влиянию. Таблица 4 может быть использована в хозяйствах лесного комплекса для выбора способов управления и защиты с целью достижения эффективной адаптации в условиях высокой пожароопасности леса.

Приведем результаты расчета средних байесовских потерь на один прогноз [Хандожко и др., 2001] с двумя различными начальными значениями  $C/L$  и  $\epsilon$  (табл. 5) с учетом климатической изменчивости повторяемости высокой горимости леса (8 и 10,4 % соответственно). Расчеты выполнены на основе матрицы сопряженности (табл. 3) и матрицы потерь (табл. 5) с использованием вышеприведенных значений  $C$ ,  $L$ . В таблице приведены используемые нами обозначения, а числовые значения (в скобках) соответствуют одному из вариантов расчета ( $C/L = 0,1$  и  $\epsilon = 0,2$ ). Средние потери рассчитываются путем умножения элементов матрицы потерь на соответствующие элементы матрицы сопряженности.

Приведенная матрица отражает потери при различных сочетаниях «прогноз – погода – решение потребителя» в случае полного доверия прогнозу (это означает, что хозяйственник предпринимает меры защиты или их игнорирует, полностью ориентируясь на прогноз наличия или отсутствия высокой горимости леса).

Рассчитанные средние потери при разных экономических показателях приводятся в табл. 6.

Таблица 2

## Экономические показатели, используемые в лесной отрасли Томской области

Table 2

## Economic indicators used in the forest industry of the Tomsk region

Показатель	Обоснование выбора
$L$ – средняя стоимость сгоревшего леса на корню. $L = 360$ тыс. руб./сут	Расчеты за 4 года (с 2015 по 2019 г.) показали, что в среднем при пожарах сгорает лес на корню в объеме 44,3 тыс. м <sup>3</sup> за календарный год [Статистический..., 2020]. Рыночная стоимость леса (лиственница, осина, тополь) составляет от 100 до 4 000 руб./м <sup>3</sup> [Торговая..., 2021]. В расчетах принята стоимость 1 500 руб./м <sup>3</sup> . Итого, средняя ежегодная стоимость сгоревшего леса составляет 66 млн руб. Если рассчитывать за 1 сут пожароопасного периода (апрель–сентябрь – 180 дней), то суточные убытки от сгоревшего леса составляют примерно 360 тыс. руб. Необходимо также иметь в виду, что стоимость сгоревшего леса определяется не только ценой древесины – она намного выше, если учитывать его экологическое, социальное значение и др.
$C$ – стоимость противопожарных мероприятий. В начальном варианте $C = 0,1 * L = 36$ тыс. руб./сут	Стоимость средств предупреждения и тушения лесных пожаров (лесопожарные трактора, вездеходы, катера, бортовые, вахтовые автомобили, пожарные емкости), содержание базы авиационной охраны лесов, затраты на пожарно-химические станции, реконструкцию и эксплуатацию пожарных наблюдательных пунктов, аренду воздушных судов для тушения пожара, наземное патрулирование, спутниковый дистанционный мониторинг, беспилотные летательные аппараты и др. [Лесной..., 2008]
$\epsilon$ – изменяется от 0 до 0,4	При обслуживании лесного комплекса меры защиты не являются кардинальными. Как правило, и при выполнении противопожарных мероприятий наблюдаются убытки, величина которых может меняться

Таблица 3

## Матрицы сопряженности прогностической и фактической информации о пожарах

Table 3

## Conjugate matrix of prognostic and factual information on fires

Наличие пожара (Ф)	Период 1955–1984 гг.			Наличие пожара (Ф)	Период 1985–2015 гг.		
	Прогноз пожаров (П)		Сумма по факту наличия (отсутствия) пожара		Прогноз пожаров (П)		Сумма по факту наличия (отсутствия) пожара
	Ожидается (П)	Не ожидается (-П)			Ожидается (П)	Не ожидается (-П)	
Пожар был (Ф)	0,07	0,01	0,08	Пожар был (Ф)	0,095	0,009	0,104
Пожара не было (-Ф)	0,04	0,88	0,92	Пожара не было (-Ф)	0,04	0,856	0,896
Сумма по прогнозам	0,11	0,89	1	Сумма по прогнозам	0,135	0,865	1

Таблица 4

## Значения показателя адаптации G\*

Table 4

## Adaptation indicator values G\*

ε	Период 1955–1984 гг.					ε	Период 1985–2015 гг.				
	C/L, C = 36 тыс. руб./сут						C/L, C=36 тыс. руб./сут				
	Величина постоянная						Величина постоянная				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0	3,33	2,19	1,63	1,3	1,08	0	4,22	2,64	1,92	1,51	1,24
0,1	2,25	1,62	1,26	1,03	0,88	0,1	2,67	1,88	1,45	1,18	0,99
0,2	1,6	1,22	0,98	0,82	0,71	0,2	1,83	1,38	1,15	0,96	0,83
0,3	1,17	0,92	0,77	0,65	0,57	0,3	1,3	1,03	0,85	0,79	0,63
0,4	0,86	0,7	0,59	0,51	0,45	0,4	0,94	0,77	0,65	0,56	0,5
0,5	0,76	0,52	0,45	0,39	0,35	0,5	0,68	0,57	0,49	0,43	0,38

Таблица 5

## Матрица потерь при некардинальных мерах защиты, тыс. руб./прогноз

Table 5

## Matrix of losses in case of non-cardinal protection measures, thousand rubles/forecast

Ф <sub>i</sub> фактическое наличие или отсутствие пожара	Решение потребителя в соответствии с прогнозом погоды	
	d (П) принимаются меры защиты	d (-П) меры защиты игнорируются
Пожар был	C + εL (108,0)	L (360,0)
Пожара не было	C (36,0)	0

Таблица 6

## Средние потери (тыс. руб./прогноз) при разных характеристиках адаптации с учетом изменения повторяемости высокой горимости леса

Table 6

## Average losses (thousand rubles/forecast) at different characteristics of adaptation, taking into account changes in the frequency of high wildfire occurrence in forest

Период 1955–1984 гг.		Период 1985–2015 гг.	
C/L = 0,1 ε 0,2	C/L = 0,2 ε 0,3	C/L = 0,1 ε 0,2	C/L = 0,2 ε 0,3
12,6	17,6	14,9	21,8

Наблюдается увеличение повторяемости высокой горимости леса на 2,4 % во втором периоде относительно первого при одном и том же качестве прогноза (см. табл. 3), но разных (реальных) значениях C/L и ε, приведенных в табл. 6. При этом средние потери возрастают на 18 % (первый и третий столбцы) и 24 % (второй и четвертый столбцы таблицы).

## Заключение

Анализ индекса пожарной опасности выявил увеличение пожароопасности лесов в Томске в последние 90 лет. Несмотря на отсутствие существенных изменений в значениях ПБДП, отмечается статистически значимое увеличение числа дней с метеорологическими условиями повышенной пожарной опасности.

гическими условиями, создающими предпосылки для возникновения лесных пожаров.

Значимо возросла за теплое полугодие сумма индексов горимости, превышающих значение 1 000 ед. Увеличилось, хотя и незначительно (на 2,3 %, что составляет примерно 8 дней за 30 лет), число дней с высокой пожарной опасностью леса и на столько же уменьшилось число дней с малой пожарной опасностью. Предварительные расчеты, выполненные для станции Напас, расположенной в таежной зоне на севере Томской области, дают аналогичную картину.

Представленные количественные показатели пожароопасного сезона подтверждают определенное влияние климатического фактора на учащение лесных пожаров в регионе. В неблагоприятные пожароопасные сезоны важную роль играют техническая составляющая (оборудование и технические средства) и технологическая оснащенность (способы ра-

боты, регламент действий) организаций лесного хозяйства.

При существующей природной повторяемости пожаров в регионе необходимыми условиями улучшения экономических показателей, согласно рассчитанных  $G^*$ , являются уменьшение затрат на лесозащитные мероприятия и, соответственно, уменьшение коэффициента непредотвращенных потерь.

В условиях доверия к прогностической информации особенно актуальным является улучшение ее качества. Рост повторяемости высокой пожарной опасности на единицы процентов приводит к увеличению средних потерь на порядок. По расчетам, фактическое увеличение повторяемости высокой горимости леса на 2,4 % приводит к росту потерь от 12 до 16 млн руб. за пожароопасный сезон.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-45-700010 р\_а).*

#### ЛИТЕРАТУРА

- Владимирова Н., Крылов А., Милаковский Б., Пуреховский А.** Влияние дорог и рубок на гибель от пожаров лесов юга Дальнего Востока России // Устойчивое лесопользование. 2017. № 2 (50). С. 5–9. URL: <https://wwf.ru/upload/iblock/36c/02.pdf> (дата обращения: 15.04.2021).
- Всемирный фонд дикой природы WWF.** Лесные пожары. URL: <https://wwf.ru/about/positions/lesnye-pozhary/> (дата обращения: 15.04.2021).
- Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных.** Специализированные массивы. Неблагоприятные условия погоды, нанесение экономических потерь. URL: <http://www.meteo.ru> (дата обращения: 15.04.2021).
- Второй** оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.В. Ясюкевич, В.А. Говоркова. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2016/od2/od2full.pdf> (дата обращения: 15.04.2021).
- ГОСТ Р 22.1.09-99.** Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования. М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. 12 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-22-1-09-99> (дата обращения: 15.04.2021).
- Лесной план Томской области.** Основные положения / Администрация ТО. Томск, 2008. 65 с.
- Поляков Д.В., Барашкова Н.К., Кузевская И.В.** Погодно-климатическая характеристика аномального лета 2012 г. на территории Томской области // Метеорология и гидрология. 2014. № 1. С. 38–47.
- Статистический ежегодник 2020** : стат. сб. Томск, 2020. 107 с.
- Томская область в цифрах. 2019** : краткий стат. сб. Томск : Томскстат, 2019. 236 с.
- Томская область в цифрах. 2020** : краткий стат. сб. Томск : Томскстат, 2020. 236 с.
- Торговая система лесной промышленности Lesprom.** Предложения о продаже леса на корню. URL: [https://www.lesprom.com/ru/trade/%D0%9B%D0%B5%D1%81\\_%D0%BD%D0%B0\\_%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%BD%D1%8E\\_4/](https://www.lesprom.com/ru/trade/%D0%9B%D0%B5%D1%81_%D0%BD%D0%B0_%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%BD%D1%8E_4/) (дата обращения: 15.04.2021).
- Хандожко Л.А.** Экономическая метеорология. СПб.: Гидрометеиздат, 2005. 492 с.
- Хандожко Л.А., Коршунов А.А., Шаймарданов М.З.** Адаптация потребителя (производственного объекта) к ожидаемым условиям погоды: методическая основа и практическая реализация // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2001. Вып. 168. С. 41–53.
- Шерстюков Б.Г., Шерстюков А.Б.** Лесные пожары на территории России при потеплении климата в XXI веке. ВНИИГМИ-МЦД, 2007. 313 с.
- Abatzoglou J.T., Williams A.P., Boschetti L., Zubkova M., Kolden C.A.** Global patterns of interannual climate–fire relationships // Global Change Biology. V. 24, is. 11. 2018. P. 5164–5175
- AghaKouchak A., Chiang F., Huning L.S., Love C.A., Mallakpour I., Mazdiyasi O., Moftakhari H., Papalexioi S.M., Ragnano E., Sadegh M.** Climate Extremes and Compound Hazards in a Warming World // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2020. V. 48. P. 519–548
- Flannigan M., Cantin A.S., de Groot W.J., Wotton M., Newbery A., Gowman L.M.** Global wildland fire season severity in the 21st century // Forest Ecology and Management. 2013. V. 294. P. 54–61. doi: 10.1016/j.foreco.2012.10.022.
- Gerstengarbe F.W., Werner P.C., Lindner M., Bruschek G.** Estimation of Future Forest Fire Development in the State of Brandenburg Background // International forest fire news. 1999. № 21. P. 91–93.
- Gorbatenko V.P., Volkova M.A., Nosyreva O.V., Zhuravlev G.G., Kuzhevskaja I.V.** Influence of Climatic Conditions on Western Siberian Forest Fires. Chapter 12 // Predicting, Monitoring, and Assessing Forest Fire Dangers and Risks. USA : IGI Global, 2020. P. 269–293. URL: <https://www.igi-global.com/book/predicting-monitoring-assessing-forest-fire/234504>
- Hansen J., Sato M., Kharecha P., Schuckmann K.** Earth's energy imbalance and implications // Atmospheric Chemistry and Physics. 2011. V. 11. P. 13421–13449. doi: 10.5194/acp-11-13421-2011.

Littell J.S., Peterson D.L., Riley K.L., Liu Y., Luce C.H. A review of the relationships between drought and forest fire in the United States // *Global Change Biology*. 2016. V. 22, is. 7. P. 2353–2369.

Morgan P., Hardy C.C., Swetnam T.W., Rollins M.G., Long D.G. Mapping fire regimes across time and space: Understanding coarse and fine-scale fire patterns // *International Journal of Wildland Fire*. 2001. V. 10 (4). P. 329–342.

Ponomarev E.I., Kharuk V.I., Ranson K.J. Wildfires Dynamics in Siberian Larch Forests // *Forests*. 2016. № 7 (6). P. 125. doi: 10.3390/f7060125.

#### Авторы:

**Кижнер Любовь Ильинична**, кандидат географических наук, доцент, кафедра метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: kdm@mail.tsu.ru

**Барашкова Надежда Константиновна**, кандидат географических наук, доцент, кафедра метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: nkbar@sibmail.com

**Носырева Ольга Владимировна**, кандидат географических наук, доцент, кафедры метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: ov\_nosyreva@mail.ru

*Geosphere Research*, 2021, 2, 110–119. DOI: 10.17223/25421379/19/10

L.I. Kizhner, N.K. Barashkova, O.V. Nosyreva

*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

### FIRE HAZARD IN FORESTS OF THE TOMSK REGION: CLIMATIC FACTOR AND ECONOMIC RISKS

Dangerous fire elements are forest fires, which annually cause enormous damage of a social and economic nature. The territory of the Tomsk region is located in the taiga zone of Western Siberia; the forestry industry is one of the leading in the economic complex. For the period 2012–2019 here more than 20 thousand hectares of forest plantations died from fires. In this regard, the climatic assessment of trends in conditions favorable to the occurrence of fires in specific territories is of considerable scientific and practical interest.

The purpose of this work is to assess climatic changes in meteorological factors for the Tomsk station affecting the potential for a fire, and an economic interpretation of the events taking place.

To assess the fire hazard, special indicators (indices) have been developed, which take into account, first of all, the temperature and humidity conditions of the time period. In our study, the CI indicator (complex indicator) is used. The fire hazard is the higher, the higher the CI value.

The economic indicators of the degree of adaptation of the forest complex to modern climatic conditions are estimated.

The conditions at Tomsk station during rainless periods during fire hazardous seasons (April – September) from 1924 to 2015 were considered. Determined rainless periods and their characteristics - the beginning and end, the duration of the period without precipitation, air temperature (average and maximum), minimum relative humidity and wind speed (average and maximum).

Analysis of the fire hazard index revealed an increase in the fire hazard of forests in Tomsk over the past 90 years. There is a statistically significant increase in the number of days with meteorological conditions that create preconditions for the occurrence of forest fires.

During the warm half of the year, the sum of the flammability indices increased significantly. The number of days with a high forest fire hazard has increased and the number of days with a low fire hazard has decreased. The presented quantitative indicators of the fire hazardous season confirm a certain influence of the climatic factor on the frequency of forest fires in the region.

In unfavorable fire-hazardous seasons, an important role is played by the technical component (equipment and technical means) and technological equipment (methods of work, rules of procedure) of forestry organizations.

With the existing natural recurrence of fires in the region, the necessary conditions for improving economic indicators are a decrease in the cost of forest protection measures and a decrease in the coefficient of unforeseen losses.

**Keywords:** *fire hazard indicator, climatic changes, high fire hazard, adaptation, average losses*

#### References

Vladimirova N., Krylov A., Milakovskiy B., Purekhovskiy A. *Vliyanie dorog i rubok na gibel' ot pozharov lesov yuga Dal'nego Vostoka Rossii* [Impact of roads and felling on deaths of forest from fire in the south of the Russian Far East] // *Sustainable Forestry*. 2017. No 2 (50). pp. 5–9. URL: <https://wwf.ru/upload/iblock/36c/02.pdf> (Date of accessed 15.04.2021). In Russian

*Vsemirnyy Fond dikoy prirody WWF. Lesnye pozhary*. [WWF – Russia Position on Forest Fires]. URL: <https://wwf.ru/about/positions/lesnye-pozhary/> (Date of accessed 15.04.2021). In Russian

*Vserossiskii nauchno-issledovatel'skii institut gidrometeorologicheskoi informazii – Mirovoi zentr dannich. Spezialisirovannye massivi. Neblagopriyatnye usloviya pogody, nanesшие ekonomicheskie poteri* [All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center. Specialized arrays. Unfavorable weather conditions causing economic losses] URL: <http://www.meteo.ru> (Date of accessed 15.04.2021). In Russian

*Vtoroi ozenozhni dolad Rosgidrometa ob izmeneniach klimata I ich posledstviach na territorii Rossiiskoi Federazii. Technicheskoe resume* [Second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation]. Moscow. 2014. 1009 p. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2016/od2/od2full.pdf> (Date of accessed 15.02.2019). In Russian

*GOST R 22.1.09-99. Bezopasnost' v chrezvychaynykh situatsiyakh. Monitoring i prognozirovaniye lesnykh pozharov. Obshcheye trebovaniya* [GOST R 22.1.09-99. Safety in emergencies. Monitoring and forecasting forest fires. General requirements]. Moscow: ИПК Издатel'stvo standartov, 1999. 12 p. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-22-1-09-99> (Date of accessed 15.04.2021). In Russian

- Lesnoy plan Tomskoy oblasti. Osnovnyye polozeniya* [Forest plan of the Tomsk region. Basic Provisions] / Tomsk Region Administration. Tomsk, 2008. 65 p. In Russian
- Polyakov D.V., Barashkova N.K., Kuzhevskaya I.V. *Pogodno-klimaticheskaya kharakteristika anomal'nogo leta 2012 g. na territorii Tomskoy oblasti* [Weather and climatic characteristics of the abnormal summer 2012 in the Tomsk region] // *Meteorology and Hydrology*. 2014. No 1. pp. 38–47. In Russian
- Statisticheskii yezhegodnik 2020. Statisticheskii sbornik* [Statistical Yearbook 2020. Statistical Digest]. Tomsk, 2020. 107 p. In Russian
- Tomskaya oblast' v tsifrakh. 2019: Kratkiy statisticheskii sbornik* [Tomsk region in figures. 2019: Brief statistical collection] / Tomsk : Tomskstat, 2019. 236 p. In Russian
- Tomskaya oblast' v tsifrakh. 2020: Kratkiy statisticheskii sbornik* [Tomsk region in figures. 2020: Brief statistical collection] / Tomsk : Tomskstat, 2020. 236 p. In Russian
- Torgovaya sistema lesnoy promyshlennosti Lesprom. Predlozheniya o prodazhe lesa na kornyu* [Trading system of timber industry Lesprom. Proposals for the sale of standing timber]. URL: [https://www.lesprom.com/ru/trade/%D0%9B%D0%B5%D1%81\\_%D0%BD%D0%B0\\_%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%BD%D1%8E\\_4/](https://www.lesprom.com/ru/trade/%D0%9B%D0%B5%D1%81_%D0%BD%D0%B0_%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%BD%D1%8E_4/) (Date of accessed 15.04.2021). In Russian
- Khandozhko L.A. *Ekonomicheskaya meteorologiya* [Economic meteorology]. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 2005. 492 p. In Russian
- Khandozhko L.A., Korshunov A.A., Shaymardanov M.Z. *Adaptatsiya potrebitelya (proizvodstvennogo obyekt) k ozhidayemym usloviyam pogody: metodicheskaya osnova i prakticheskaya realizatsiya* [Adaptation of the consumer (production facility) to the expected weather conditions: methodological basis and practical implementation] // *Trudy VNIIGMI-MTSD*. 2001. V. 168. pp. 41–53. In Russian
- Sherstyukov B.G., Sherstyukov A.B. *Lesnyye pozhary na territorii Rossii pri poteplenii klimata v 21 veke* [Forest fires in Russia during climate warming in the 21st century]. VNIIGMI-MTSD, 2007. 313 p. In Russian
- Abatzoglou J.T., Williams A. P., Boschetti L., Zubkova M., Kolden C.A. Global patterns of interannual climate–fire relationships // *Global Change Biology*. 2018. V. 24, Iss. 11. pp. 5164–5175
- AghaKouchak A., Chiang F., Huning L.S., Love C.A., Mallakpour I., Mazdiyasn O., Moftakhari H., Papalexioiu S.M., Ragno E., Sadegh M. Climate Extremes and Compound Hazards in a Warming World // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2020. V. 48. pp. 519–548
- Flannigan M., Cantin A.S., de Groot W.J., Wotton M., Newbery A., Gowman L.M. Global wildland fire season severity in the 21st century // *Forest Ecology and Management*. 2013. V. 294. pp. 54–61. doi:10.1016/j.foreco.2012.10.022
- Gerstengarbe F.W., Werner P.C., Lindner M., Bruschek G. Estimation of Future Forest Fire Development in the State of Brandenburg Background // *International forest fire news*. 1999. No 21. pp. 91–93
- Gorbatenko V.P., Volkova M.A., Nosyreva O.V., Zhuravlev G.G., Kuzhevskaya I.V. Influence of Climatic Conditions on Western Siberian Forest Fires. Chapter 12. / *Predicting, Monitoring, and Assessing Forest Fire Dangers and Risks*. USA: IGI Global, 2020. pp.269–293. URL: <https://www.igi-global.com/book/predicting-monitoring-assessing-forest-fire/234504/> (Date of accessed 15.04.2021)
- Hansen J., Sato M., Kharecha P., Schuckmann K. Earth's energy imbalance and implications // *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011. V. 11. pp. 13421–13449. doi:10.5194/acp-11-13421-2011
- Littell J.S., Peterson D.L., Riley K.L., Liu Y., Luce C.H. A review of the relationships between drought and forest fire in the United States // *Global Change Biology*. 2016. V. 22, Iss. 7. pp. 2353–2369
- Morgan P., Hardy C.C., Swetnam T.W., Rollins M.G., Long D.G. Mapping fire regimes across time and space: Understanding coarse and fine-scale fire patterns // *International Journal of Wildland Fire*. 2001. V. 10 (4), pp. 329–342
- Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Ranson K. J. Wildfires Dynamics in Siberian Larch Forests // *Forests*. 2016. 7 (6), 125. doi: 10.3390/f7060125

**Author's:**

**Kizhner Lubov I.**, Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor, Department of Meteorology and Climatology, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: kdm@mail.tsu.ru

**Barashkova Nadezhda K.**, Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor, Department of Meteorology and Climatology, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: nkbar@sibmail.com

**Nosyreva Olga V.**, Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor, Department of Meteorology and Climatology, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: ov\_nosyreva@mail.ru