

УДК 551.583

## КЛИМАТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ НЕОБХОДИМОСТИ ПРЕВЕНТИВНОЙ АДАПТАЦИИ

© 2022 г. А. С. Гинзбург<sup>а, \*</sup>, Г. А. Александров<sup>а</sup>, А. В. Чернокульский<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

\*e-mail: gin@ifaran.ru

Поступила в редакцию 29.06.2022 г.

После доработки 25.07.2022 г.

Принята к публикации 11.08.2022 г.

В связи с наблюдаемыми и прогнозируемыми изменениями климата существует необходимость в создании научно-обоснованных методов и критериев оценки потребности в превентивной адаптации к последствиям изменений климата и связанным с ними рискам. И хотя природа, население и экономика всегда реагируют на изменяющиеся условия и адаптируются к ним, в том числе к изменению климата, скорость и эффективность такой реактивной адаптации может быть недостаточной. В связи с этим, планирование адаптационных мероприятий и внедрение превентивной адаптации становится критически важным для устойчивого развития экономики, повышения качества жизни людей, сохранения экосистем. В данной работе предложен подход по выявлению количественных показателей климатического воздействия, превышение которых указывает на возникновение потребности в превентивной адаптации. Данный подход может применяться для разработки и реализации планов адаптации отраслей экономики и субъектов Российской Федерации к изменению климата.

**Ключевые слова:** изменение климата, воздействие, подверженность, уязвимость, пороговые значения, превентивная и реактивная адаптация, количественные показатели, климатический риск

**DOI:** 10.31857/S0002351522060062

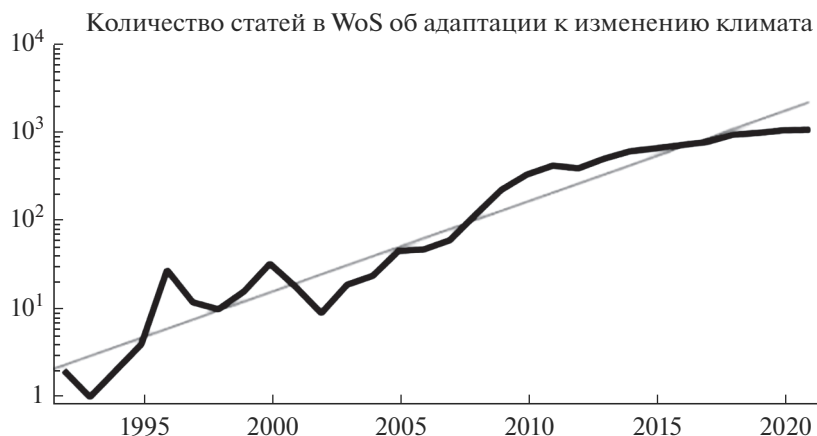
### ВВЕДЕНИЕ

Глобальное изменение климата проявляется в росте глобальной и региональной приповерхностной температуры воздуха, росте уровня океана и накоплении тепла в океане, сокращении площади морских льдов, покровного оледенения и горных ледников, изменении циркуляционных режимов и режима осадков, увеличении частоты и интенсивности опасных неблагоприятных погодных явлений, уменьшении несущей способности многолетнемерзлых пород и т.д. [1]. Эти изменения оказывают воздействие на природные системы, на продолжительность и качество жизни людей, на различные сферы экономики [2]. Совокупность климатических воздействий диктует необходимость принятия мер по адаптации к изменениям климата, призванных повысить устойчивость отраслей экономики и отдельных регионов к происходящим климатическим изменениям, снизить подверженность этим изменениям и чувствительность к ним [3, 4].

Согласно [5], адаптация к изменению климата является процессом приспособления к существующему или ожидаемому клима-

ту и его воздействиям. При этом в антропогенных системах целью адаптации является уменьшение ущерба или использование благоприятных возможностей, а в естественных системах вмешательство человека может способствовать приспособлению к ожидаемому климату и его воздействиям.

Можно выделить два основных типа адаптации: реактивная (автономная) адаптация, как реакция того или иного субъекта на произошедшее или происходящее климатическое воздействие, и превентивная адаптация, которая характеризуется систематическим плановым подходом и относится не к субъекту адаптации (тому, кто адаптируется сам), а к объекту адаптации (который необходимо адаптировать). Превентивная адаптация может основываться не только на данных наблюдений, но также и на данных прогнозов о климатическом воздействии, то есть, по сути, быть упреждающей адаптацией [5–12], при которой меры принимаются до того, как ущерб был нанесен. И хотя в идеальном случае плановая адаптация должна носить упреждающий характер, в реальности это не так. Например, утвержденные отраслевые и



**Рис. 1.** Динамика числа научных публикаций, посвященных вопросам адаптации к изменению климата и индексируемых в информационной библиографической системе Web of Science.

региональные планы адаптации в РФ, а также планы адаптации в ряде других стран [9] в значительной мере носят реактивный характер.

Адаптация направлена на снижение подверженности объекта адаптации воздействию климатического фактора (предотвращение воздействия), повышение вероятности сохранения режима нормального функционирования объекта адаптации в тех, когда он подвергается воздействию (сопротивление воздействию, снижение уязвимости), сокращение время восстановления нормального функционирования объекта адаптации (компенсация воздействия), которое было нарушено в результате воздействия. В рамках разработки планов адаптации предлагаются различные показатели (метрики) климатического воздействия, подверженности и уязвимости, эффективности адаптационных мер [6–8].

В последнее время отмечается существенный прогресс в области планирования, финансирования и внедрения планов адаптации. По состоянию на 2021 год в 154 странах принят первый национальный план адаптации, в 72 странах – второй и в 25 – третий. Каждый год в мире инициируется более 300 проектов по адаптации [9]. Растет число научных публикаций, посвященных вопросам адаптации к изменению климата (рис. 1). Интересно отметить, что за последние 30 лет число публикаций росло с разной скоростью и эта скорость была максимальной в районе 2010 года – в период подготовки Пятого оценочного доклада [10], где теоретические подходы по исследованию и оценке адаптации прописаны наиболее полно. В последние годы обсуждение проблем адаптации перешло преимущественно в практическую плоскость, однако многие научно-методические вопросы по-прежнему актуальны [11–13].

Несмотря на очевидную важность адаптации к изменению климата, подавляющая часть финансовых ресурсов в области борьбы с изменением климата в большинстве направляется на реализацию стратегии низкоуглеродного развития стран (свыше 90%) и менее 10% – на реализацию мероприятий по адаптации к изменениям климата [14]. Недостаточное на наш взгляд внимание к финансированию адаптации связано, в частности, с недостатком научного обоснования необходимости адаптационных мероприятий. Поэтому одной из важных тем научных исследований становится анализ эффективности национальных планов климатической адаптации [15–17], определение количественных показателей, с помощью которых можно выявить период появления потребности в проведении адаптационных мероприятий [18–21]. Методология этих исследований оперирует такими понятиями как климатический фактор, пороговый уровень климатического фактора, воздействие климатического фактора, подверженность объекта адаптации воздействию климатического фактора, уязвимость этого объекта к воздействию климатического фактора.

В данной работе предложен подход, позволяющий определить необходимость возникновения потребности в превентивной (плановой) адаптации.

#### НЕКОТОРЫЕ СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТАЦИИ

Необходимо отметить, что до настоящего времени при составлении планов адаптации различные страны, их регионы и отрасли экономики широко используют преимущественно возмож-

ный финансовый ущерб и возникающие проблемы здоровья населения при воздействии климатических факторов. Аналогично, при оценке потенциальной эффективности реализации этих планов в первую очередь учитывается предотвращенные финансовые потери и сохраненное здоровье населения.

В частности, в [22] справедливо утверждается, что в отличие от проектов по смягчению последствий изменения климата, где эффективность проекта может быть измерена с помощью показателя “сокращение выбросов в тоннах эквивалента  $\text{CO}_2$ ”, для оценки эффективности проектов по адаптации не существует общепринятых показателей. Предложены две метрики оценки эффективности адаптационных мероприятий с запоминающимися названиями: Saved Wealth (SW) и Saved Health (SH) — т.е. спасенное благосостояние и спасенное здоровье [22].

Показатель сохраненного здоровья, SH, основан на концепции сэкономленных лет жизни с поправкой на инвалидность (Disability Adjusted Life Years Saved — DALYs), разработанной Всемирным банком [23] и широко используемой Всемирной организацией здравоохранения [24]. Предотвращенный ущерб описывается количеством лет, которые были бы потеряны из-за случаев утраты трудоспособности и преждевременной смерти, наступивших в результате воздействий тех иных климатических факторов

$$DALYs = NL + \sum_i I_i DW_i D_i, \quad (1)$$

где  $N$  — число смертельных случаев,  $L$  — средняя продолжительность жизни,  $DW_i$  — весовой коэффициент, отражающий тяжесть  $i$ -го типа заболеваний или травм и варьирующий от 0 (отличное здоровье) до 1 (летальный исход),  $D_i$  — средняя длительность утраты трудоспособности при заболевании или травмы  $i$ -го типа,  $I_i$  — число заболеваний или травм  $i$ -го типа.

Экономический ущерб, который может быть предотвращен в результате осуществления тех или иных адаптационных мер оценивается с учетом длительности периода применения и коэффициента дисконтирования:

$$SW = \sum_i MDP_i (1 - r)^i DS_i p_i, \quad (2)$$

где  $MDP_i$  — максимальный ущерб, который может быть нанесен в  $i$ -й год периода действия принимаемых адаптационных мер аномальными климатическими ситуациями,  $DS_i$  — ожидаемая в  $i$ -м году относительная интенсивность (от 0 до 1) негативного воздействия, оказываемая аномальными климатическими ситуациями,  $p_i$  — вероятность воз-

никновения в  $i$ -й год аномальных климатических ситуаций,  $r$  — ставка рефинансирования для финансирования адаптационных мероприятий.

Согласно Методическим рекомендациям по оценке климатических рисков Минэкономразвития РФ [8] потенциальный ущерб,  $\Sigma Y$ , наносимый хозяйственной деятельности в результате превышения пороговых значений климатических факторов определяется как сумма балансовой стоимости оборудования и инфраструктуры, которые могут пострадать от воздействия климатических факторов, суммарных затрат, связанных с восстановлением работоспособности оборудования и инфраструктуры, утраченной в результате воздействия климатических факторов, а также дохода, недополученного в период приостановки производственной деятельности, и дополнительные траты. При этом потенциальная экономическая уязвимость хозяйственной деятельности к воздействию климатических факторов, ПЭУ, определяется соотношением между объемом незастрахованной части потенциального ущерба к имеющимся финансовым резервам

$$\text{ПЭУ} = (\Sigma Y - C) / (P + B), \quad (3)$$

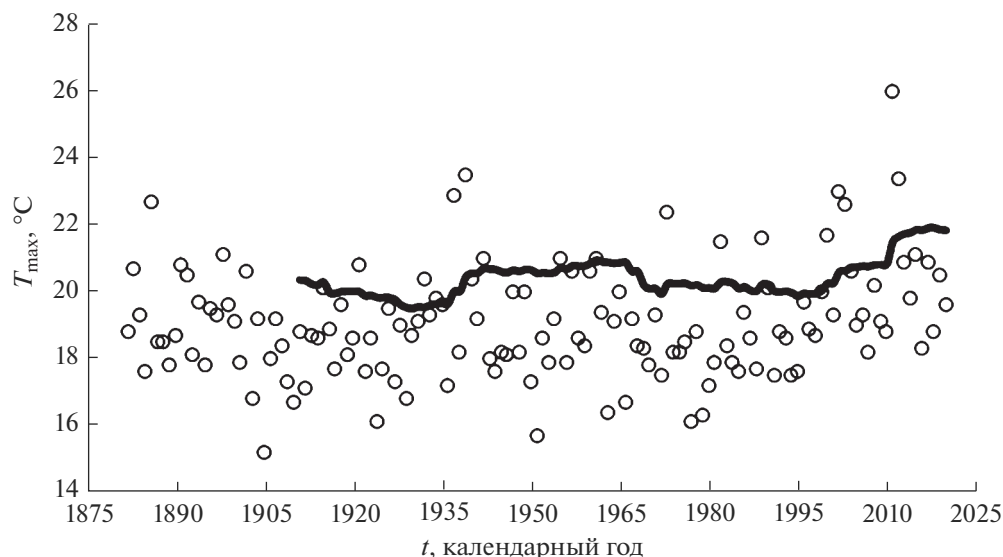
где  $C$  — застрахованный ущерб,  $P$  — размер имеющихся ресурсов,  $B$  — сумма годовой выручки. Влияние климатического воздействия на здоровье населения в методике [8] прямо не оценивается.

Приведенные выше показатели, также и ряд других аналогичных показателей учитывают пороговые значения климатических воздействий и оценивают влияние адаптационных мероприятий на экономику и здоровье населения. При этом явно недостаточно внимания уделяется количественным показателям климатических факторов, характеризующим возникновение потребности в плановых адаптационных мероприятиях.

## МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ НЕОБХОДИМОСТИ АДАПТАЦИИ

Потребность в адаптации возникает в тех регионах и для тех объектов, где изменение климата сопряжено с реализацией климатических рисков — как острых (экстремальных), связанных с учащением и/или усилением опасных погодных явлений, так и хронических (систематических), обусловленных постепенным изменением фоновых климатических условий.

Разработка количественного показателя, характеризующего необходимость и эффективность адаптационных мероприятий, начинается с определения климатического фактора и его порогового уровня, то есть значения, при котором с вы-



**Рис. 2.** Максимальная среднемесячная температура воздуха в Москве ( $T_{\max}$ ). Сплошной линией показаны значения порогового уровня  $T_{\max}$ , соответствующего значению стандартизованного индекса этого климатического фактора равного 1, вычисленного по 30-летним скользящим средним и среднеквадратичным отклонениям за период  $[t - 29, t]$ .

сокой вероятностью происходит нарушение нормального функционирования объекта адаптации (например, нарушается функционирование объектов инфраструктуры, производственных процессов, создается угроза здоровью населения). Такими факторами, например, являются приземная температура воздуха в теплое время года, количество атмосферных осадков в теплое время года, сила ветра, глубина сезонного промерзания грунта, высота штормового нагона [18]. Аномальные значения этих факторов, выходящие за определенные пороговые значения, оказывают существенное прямое или косвенное воздействие на отрасли экономики, здоровье и качество жизни населения, состояние природных экосистем.

Так, при выходе температуры воздуха за привычные для данной местности пределы, наблюдается рост производственного травматизма из-за ослабления психомоторных функций (остроты зрения, быстроты реакции, координации движений и т.д.) под воздействием теплового стресса [25]. Аномально низкое количество осадков в теплое время года является одной из причин дефицита влаги в почве, что оказывает неблагоприятное воздействие на сельскохозяйственные культуры и лесные насаждения [26, 27]. Выпадение аномально большого слоя атмосферных осадков на обширной территории является причиной опасных наводнений [28]. Воздействие ураганного ветра, во многих случаях, носит комплексный характер [29, 30], т.е. нормальная работа отраслевых объектов нарушается из-за разрушения инфраструктуры, ко-

торая уязвима к прямым воздействиям сильного ветра, и эффекта “домино” (нарушение работы одного предприятия ведет к нарушению работы другого предприятия).

Важно отметить, что пороговые значения различны для разных объектов промышленности, транспорта, городской и дорожной инфраструктуры, сельского и лесного хозяйства и населения. Более того, эти значения могут быть различны для разных климатических зон. В связи с этим, в качестве метрики может выступать отклонение климатического фактора от климатической нормы на определенную величину, которое может быть выражено в относительных единицах. Например, для количественной характеристики аномальных величин атмосферных осадков за выбранный период рекомендуется применять стандартизованный индекс осадков ( $SPI$ ), который, по сути, представляет отклонение количества осадков от средней величин, поделенное на среднеквадратичное отклонение [31, 32].

Вводя по аналогии с  $SPI$  стандартизованный индекс температуры —  $STI$ , можно получить, например пороговые значения  $T_{\max}$ , летнего сезона (июнь, июль, август) соответствующего отклонению  $T_{\max}$  от среднего значения за последние 30 лет на величину среднеквадратичного отклонения за прошедший тридцатилетний период, что соответствует  $STI = 1$ . На рис. 2 представлена динамика порогового уровня среднемесячной температуры (сплошная кривая) в летнее время

(июнь, июль, август) в Москве, соответствующего значению  $STI$  равному 1. Этот рисунок показывает, что пороговые значения температуры, определенные по среднеквадратичному отклонению за предшествующий данному моменту периоду, преодолеваются относительно редко, однако в последние десятилетия наблюдается достаточно четкая динамика изменения пороговых значений температуры, что указывает на растущую потребность в плановой адаптации к таким изменениям.

Обобщая индексы SPI и STI на другие климатические факторы, в частности, на длительность и интенсивность волн тепла, можно сказать, что во многих случаях потребность в адаптации возникает тогда, когда значение порогового уровня некоторого климатического фактора, соответствующего значению стандартизованного индекса этого фактора равному  $-1$  (или  $1$ ), становится меньше (или больше) уровня этого фактора, которой принимался в качестве расчетного при проектировании тех или иных объектов адаптации. Это позволяет наглядно охарактеризовать аномальность таких значений в ретроспективе и возможность того, что они станут менее аномальными в перспективе.

В целом, потребность в превентивной адаптации возникает там, где изменение климата сопряжено с устойчивым повышением повторяемости климатических условий, при которых с высокой вероятностью происходит нарушение нормального функционирования объектов инфраструктуры, производственных процессов, или создается угроза здоровью населения. Например, расчетные значения климатических параметров для различных типов инфраструктурных объектов, которые указываются в соответствующих нормативных документах (строительных правилах, санитарных нормах и др.) должны периодически пересматриваться в условиях изменяющегося климата для того, чтобы вводимые в строй объекты были адаптированы к климатическим условиям, ожидаемым на период их эксплуатации.

### ОБЩИЙ ВИД ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОТРЕБНОСТИ В АДАПТАЦИИ

Как уже отмечалось, в последние годы в России активизировалась работа по созданию количественных показателей адаптации (см. [33–35]) предложена статистическая модель формирования климатической угрозы — иными словами возникновения насущной потребности в адаптации. Возникновение климатической угрозы описывается набором метеорологических переменных, характеризующих тот или иной календарный год

[34]. Климатическая угроза возникает, когда для значительного числа последовательных лет эти переменные одновременно выходят за пределы своих безопасных диапазонов.

В данной работе для характеристики потребности в плановой адаптации предложен общий вид показателя  $I(k, d, t)$ , который характеризует потребность (или ее отсутствие) в адаптации рассматриваемого ( $k$ -го) объекта к воздействию аномально высоких или аномально низких значений конкретного климатического фактора (драйвера) —  $d$  в момент времени  $t$ , соответственно  $f_h(k, d, t)$  (4) или  $f_l(k, d, t)$  (5)

$$I(k, d, t) = \theta(f(d, t) - f_h(k, d, t)), \quad (4)$$

$$I(k, d, t) = \theta(f_l(k, d, t) - f(d, t)), \quad (5)$$

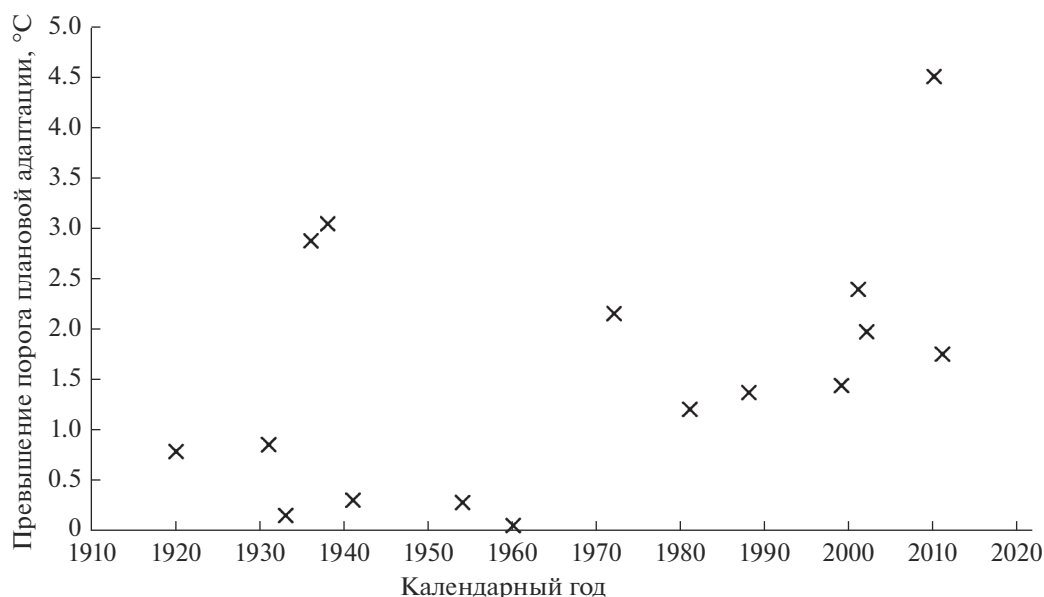
$f(d, t)$  — текущее значение конкретного климатического фактора  $d$  (температура, осадки, ветер и т.д.) в рассматриваемый момент времени для выбранного региона или ячейки географической сетки;  $f_h(k, d, t) = \mu(k, d, t) + \sigma(k, d, t)$  — верхнее пороговое значение климатического фактора  $d$  для  $k$ -го объекта адаптации, определяемое как сумма среднего значения этого фактора за предшествующие 30 лет  $\mu$  и его среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  за период времени  $(t - 29, t)$ ; аналогично  $f_l(k, d, t) = \mu(k, d, t) - \sigma(k, d, t)$  — нижнее пороговое значение выбранного климатического фактора для  $k$ -го объекта адаптации.

Функция  $\theta$  определяет степень потребности в адаптации в конкретный момент времени конкретного объекта к изменению конкретного климатического фактора.

$$\theta(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}. \quad (6)$$

Определенные таким образом значение показателя  $I(k, d, t)$  для каждого объекта в каждый момент времени равно 0 или 1 и указывает на потребность адаптации в настоящее время к изменению конкретного климатического фактора или на отсутствие такой потребности.

Понятно, что оценка значения показателя  $I$  требует наличия полного набора метеорологических данных за прошедшие десятилетия, а в идеале — знания уязвимости конкретных объектов экономики, населения и природных экосистем к существенным отклонениям различных климатических факторов от нормы. Такие сведения, особенно это касается уязвимости, зачастую являются труднодоступными. Кроме того, в некотором регионе или в ячейке географической сетки как правило находится множество



**Рис. 3.** Превышение порогового значения, характеризующего потребность в превентивной адаптации к максимальной среднемесячной температуре воздуха в Москве: разность между значением  $T_{\max}$  в этот календарный год и пороговым уровнем, характеризующим потребность в превентивной адаптации, на данный календарный год.

потенциальных объектов адаптации, уязвимость которых может быть принципиально различной.

Рассмотрим пример, когда в некотором субъекте РФ имеются, скажем,  $N$  территорий с различными климатическими условиями. При этом для субъекта в целом суммарная потребность в адаптации, например к аномально высокой температуре  $T_{\max}$ , даже для набора одинаковых объектов может отличаться от 0 или 1, поскольку функция  $\theta(x)$  на этих территориях может быть различна.

Тогда значение показателя  $I$  для субъекта в целом определяется следующим образом

$$I(t) = \frac{1}{N} \sum_n (\theta(f(n,t) - f_h(t))). \quad (7)$$

В данном случае  $f(n,t)$  — текущая температура воздуха на  $n$ -ой территории региона, а  $f_h(t)$  — пороговое значения высокой температуры для данного типа объектов адаптации. Допустим, у нас в регионе пять территорий с разными климатическими условиями и на каждой территории находятся аналогичные промышленные предприятия. При этом на двух территориях наблюдается либо прогнозируется превышение пороговых значений высокой температуры, а на трех — нет, тогда  $I(t)$  в настоящее время для этого региона равна 0.4.

Аналогично можно оценить показатель  $I(t)$  для набора различных объектов, расположенных в одинаковых климатических условиях. Пусть у

нас есть  $M$  различных объектов, тогда потребность к адаптации этого набора объектов к аномально высокой температуре будет равна

$$I(t) = \frac{1}{M} \sum_n (\theta(f(t) - f_h(m,t))). \quad (8)$$

В этом случае  $f(t)$  — текущая температура воздуха на данной территории региона, а  $f_h(m,t)$  — пороговое значения высокой температуры для различных типов объектов адаптации. Как и в предыдущем примере, если на трех из пяти объектах пороговые значения не превышаются, то общая потребность этого набора объектов к адаптации равна 0.4. С использованием такого подхода на рис. 3 показаны значения превышения порогового значения максимальной среднемесячной температуры воздуха в Московском регионе.

Может быть также установлено пороговое значение показателя  $I_{\text{crit}}$ , превышение которого ( $I(t_{\text{crit}}) > I_{\text{crit}}$ ) в момент  $t_{\text{crit}}$  сигнализирует о необходимости проведения адаптационных мероприятий. Стоит отметить, что в качестве климатических данных для установления момента  $t_{\text{crit}}$  целесообразно использовать данные климатического моделирования (например, [33]) позволяющие определить наступление этого момента заранее. При этом стоит учитывать время, необходимое на проведение мероприятий превентивной адаптации ( $t_{\text{impl}}$ ). Таким образом, время начала внедрения плановой адаптации ( $t_{\text{adapt}}$ ) может опреде-

ляться как  $t_{\text{adapt}} = t_{\text{crit}} - t_{\text{impl}}$ . Например, если параметр  $I$  для того или иного региона (отрасли) превысил критическое значение в 2030 году, а продолжительность внедрения превентивной адаптации составляет 3 года, то это внедрение должно начаться в 2027 году.

## ДИСКУССИЯ И ВЫВОДЫ

Как справедливо отмечено в [10] люди всегда адаптировались к изменяющимся условиям: личным, общественным, экономическим и климатическим (“Humans have always adapted to changing conditions: personal, social, economic, and climatic”). Однако быстрые темпы изменения климата в настоящее время требуют учитывать эти изменения при принятии решений (планировании адаптации) на всех уровнях: от домохозяйств до международного сообщества. Это одна из ключевых проблем устойчивого развития человечества в современных условиях.

Можно выделить ряд принципиально важных вопросов в области адаптации, основные из которых приведены ниже в редакции авторов данной статьи:

- Что и с какой степенью точности и достоверности нужно знать о будущих климатических условиях, чтобы принимать решения об адаптации?
- Заключается ли адаптация только в минимизации ущерба?
- Сводится ли адаптация только к спланированным действиям, направленным конкретно на адаптацию к изменению климата?
- Чем адаптация человеческих систем (здоровье, инфраструктура, экономика) отличается от адаптации в природных системах?
- Можно ли отличить адаптацию к изменению климата от обычных процессов развития и планирования и нужно ли это делать?
- Адекватно ли человечество адаптировано к нынешним климатическим условиям или существует “дефицит адаптации”?
- Существует ли угроза “неадекватной адаптации” (“maladaptation”) и насколько велика опасность того, что планы адаптации пойдут не так и ситуация ухудшится, а не улучшится?
- Как оценивать эффективность тех или иных методов адаптации?
- Возможна ли синергия мер по адаптации к изменению климата и мер по смягчению антропогенного воздействия на климатическую систему?

Несмотря на сложность ответа на все эти вопросы, в России, как и в большинстве стран и регионов мира, в последние годы резко возрастает понимание необходимости адаптации к уже наблюдаемым и прогнозируемым изменениям климата. Подготовленные на современной научной основе и утвержденные Приказом Минэкономразвития РФ № 267 в 2021 году “Методические рекомендации по оценке климатических рисков” [8], в частности, предполагают:

- а) регулярную актуализацию используемых методических подходов;
- б) учет природно-климатической, социально-экономической и технологической специфики климатических рисков для различных отраслей экономики и регионов России;
- в) учет превентивной (упреждающей) и посткризисной адаптации, а также адаптации к прямым и косвенным последствиям изменений климата для населения, окружающей среды, инфраструктуры и экономики;
- г) мониторинг и прогнозирование уровня климатических рисков в региональном и отраслевом разрезах.

Планирование и реализация адаптационных мероприятий, а также оценка их эффективности, требует четких формулировок понятий, целей и задач в области адаптации к уже наблюдаемым и прогнозируемым изменениям климата в глобальном и региональном масштабах. В том числе, требуется научно-обоснованное определение момента возникновения необходимости превентивной адаптации.

Предложенный в данной статье подход может использоваться для определения момента возникновения необходимости превентивной адаптации и для отраслей экономики. Например, используя показатель  $STI$  можно оценить момент возникновения необходимости оборудования административных зданий и медицинских учреждений системами охлаждения воздуха. Поскольку на значительной части территории РФ среднемесячная среднесуточная  $T_{\text{max}}$  редко превышает  $18^\circ\text{C}$  [36], то в настоящее время такая необходимость отсутствует. Однако, при тенденции к росту порогового значения  $T_{\text{max}}$ , соответствующего значению  $STI$  равному 1 и появляется перспектива превышения порогового значения, при котором возможно ослабление психомоторных функций персонала под воздействием теплового стресса, и оборудование административных зданий и медицинских учреждений системами охлаждения воздуха становится необходимым.



Процент населения РФ, подверженный воздействию значений  $T_{\max}$ , превышающих  $18^{\circ}\text{C}$ , можно оценить по климатическим данным [37] и данным о распределении плотности населения [38]. Рост этого показателя характеризует потребность в адаптации и, в частности, предполагает пропорциональное увеличение площади административных зданий и медицинских учреждений, оборудованных системами охлаждения воздуха. Однако, оценить рост защищенности населения от воздействия этого климатического фактора намного сложнее, так как уровень защищенности определяется не только увеличением площади помещений, оборудованных системами охлаждения воздуха. Там, где население регулярно подвергается воздействию значений  $T_{\max}$ , превышающих  $18^{\circ}\text{C}$ , оно могло уже автономно адаптироваться к воздействию этого климатического фактора [39–40]. Поэтому более точным показателем потребности в плановой адаптации является процент населения РФ, подверженный воздействию значений  $T_{\max}$ , превышающих пороговый уровень, соответствующий значению стандартизованного индекса этого климатического фактора равному 1, при условии, что этот пороговый уровень превышает  $18^{\circ}\text{C}$ .

Прямым показателем эффективности реактивной и превентивной адаптации к воздействию высокой температуры воздуха в летнее время года является процент населения, пострадавшего от теплового стресса. Для расчета этого показателя необходимы либо данные медицинской статистики, либо данные социологических опросов. Так как такие данные, в отличие от климатической информации, недоступны, об эффективности реактивной адаптации можно судить только на основании результатов отдельных научных исследований, преимущественно посвященных воздействию изменений климата на здоровье населения [41, 42] и на функционирование объектов энергетики (см., например, [43–45]). Принимая во внимание данные этих исследований и отсутствие в настоящее время статистических данных о проценте населения, пострадавшего от теплового стресса, можно сделать вывод, что в настоящее время не остается ничего другого, кроме как применять показатели адаптации, основывающиеся на климатических данных.

В целом, помимо показателей климатического воздействия имеет смысл отслеживать также показатели подверженности тому или иному воздействию. Например, подверженность населения волнам жары может характеризоваться процентом населения, экспонированного воздействию необычно высокой для данного региона темпера-

туры воздуха наиболее теплой пятидневки года (табл. 1).

Поскольку тепловому стрессу подвержены не только люди, но и растения, в набор показателей необходимости адаптации целесообразно включать процент площади земель сельскохозяйственного назначения, подвергнувшихся воздействию необычно высоким для данного региона значениям средней температуры воздуха с мая по июль, превышающей пороговое значение равное  $20^{\circ}\text{C}$ , процент площади зерновых, подвергнувшихся воздействию необычно высокой для данного региона средней температуры воздуха с мая по июль, превышающей пороговое значение равное  $20^{\circ}\text{C}$ , а также процент площади зерновых, подвергнувшихся воздействию необычно высокой среднемесячной температуры воздуха в июне. Для оценки необходимости адаптации сельскохозяйственного производства и лесоводства к воздействию низкого количества атмосферных осадков в летнее время года можно оценивать такие показатели как процент площади земель сельскохозяйственного назначения, подвергнувшихся воздействию необычно низких значений количества атмосферных осадков, выпавших с мая по июль и процент площади земель лесного фонда, подвергнувшихся воздействию необычно низких значений количества атмосферных осадков, выпавших с мая по июль.

Информация, необходимая для отслеживания предлагаемых показателей, находится в открытом доступе и представлена в виде, позволяющем проводить необходимые расчеты, а именно, в виде цифровых данных о значениях температуры воздуха [37], количества атмосферных осадков [46, 47], плотности населения [38], площади лесных [48] и сельскохозяйственных земель [49, 50]. Таким образом, эти показатели уже сейчас можно отслеживать и для страны в целом, и на уровне субъектов РФ. Общедоступные климатические данные позволяют отслеживать ряд других показателей, характеризующих динамику климатических факторов, оказывающих воздействие на население и на отрасли экономики. Часть из них перечислена в табл. 1.

Если для климатических факторов присутствуют данные в хорошем разрешении, то данные для подверженности (и тем более уязвимости), которые можно было бы использовать для ретроспективного анализа воздействия климатических факторов в масштабе страны, или на уровне субъектов РФ, отсутствуют. Такие, например, как данные об урожайности зерновых во Франции [55], которые недавно были сведены в общедоступную базу данных, охватывающих период с



**Таблица 1.** Примеры показателей, характеризующих динамику климатических факторов, оказывающих воздействие на население и на отрасли экономики

| Климатический фактор (воздействие)                                                                                 | Показатель, учитывающий подверженность                                                                          | Область применения                   | Ссылки   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------|
| Превышение максимальной дневной температурой воздуха регионального порогового значения в течение трех и более дней | Процент населения, подвергающегося воздействию этого фактора хотя бы один раз в год                             | Здравоохранение                      | [41, 51] |
| Превышение максимальной дневной температурой воздуха ее среднегодовое значение более чем на 5°C                    | Число дней в году, средневзвешенное по численности населения, подвергающегося этому воздействию                 | Здравоохранение                      | [39]     |
| Превышение максимальной дневной температурой воздуха порогового значения равного 32°C в период с 1 мая по 15 июня  | Процент площади зерновых культур, подвергающихся воздействию этого фактора хотя бы один раз в год               | Сельское хозяйство                   | [51, 52] |
| Превышение максимальной дневной температурой воздуха порогового значения равного 26°C                              | Число дней в году, средневзвешенное по длине дорожной сети, подвергающейся этому воздействию                    | Транспорт                            | [51]     |
| Превышение минимальной ночной температурой воздуха порогового значения равного 20°C                                | Число дней в году, средневзвешенное по численности населения, подвергающегося этому воздействию                 | Здравоохранение, городское хозяйство | [53]     |
| Превышение суточным слоем осадков пороговой величины равной 20 мм                                                  | Число дней в году, средневзвешенное по численности населения крупных городов, подвергающегося этому воздействию | Городское хозяйство                  | [53]     |
| Длительность периода высокой вероятности лесных пожаров                                                            | Число дней в году, средневзвешенное по площади лесных насаждений, подвергающихся воздействию этого фактора      | Лесное хозяйство                     | [54]     |

1900 по 2018 год. Таким образом, существует потребность проведения проблемно-ориентированных исследований, аналогичных [56], нацеленных на создание цифровой платформы для ретроспективного анализа воздействия климатических факторов в масштабе страны и субъектов РФ, включая не только данные об изменении климатических факторов за последние 50–60 лет, но и данные об их воздействии на население и отрасли экономики за последние 10–20 лет. Это позволит постепенно заменить предлагаемые в данной работе показатели адаптации на показатели, предлагаемые Минэкономразвития [8] и Международной программой действий по изменению климата (IPAC) [6], использовать которые в данный момент затруднительно ввиду отсутствия всей необходимой информации. Также представляется целесообразным разработать цифровую платформу для сбора, первичной обработки, систематизации и анализа данных, необходимых для мониторинга адаптации субъектов РФ и отраслей экономики к изменению климата. Отсутствие такой цифровой платформы является сдерживающим

фактором для формирования эффективной системы мер, нацеленных на предотвращение неблагоприятных последствий изменения климата. Однако, из этого не следует, что в настоящее время нет никакой возможности для оценки климатической адаптации.

Результаты проведенного нами исследования показали, что общедоступная климатическая информация, дополненная информацией о распределении населения, сельскохозяйственных земель и лесопокрытых территорий, позволяет уже сейчас отслеживать динамику ряда показателей климатической адаптации, например, позволяют отследить момент необходимости проведения плановой адаптации.

Эти показатели могут быть использованы при составлении планов адаптации и оценки эффективности их реализации как для регионов и отраслей экономики России, так и для отдельных муниципальных образований, объектов промышленности, городской инфраструктуры, сельского и лесного хозяйства.

Авторы благодарят двух анонимных рецензентов за конструктивные замечания, позволившие существенно улучшить текст статьи и привести используемую в статье терминологию к международным стандартам.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Masson-Delmotte V. et al.* Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, 2021 (In press). [<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>].
2. *Pörtner, H.-O. et al.* Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability// Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — Cambridge University Press. 2022 (In press). [<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>].
3. *Катцов В.М., Порфирьев Б.Н.* Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу. М.: Д'Арт: Главная геофизическая обсерватория, 2011. 252 с.
4. Изменения климата и экономика России: тенденции, сценарии, прогнозы // Ред. Б.Н. Порфирьев, В.И. Данилов-Данильян — М: Научный консультант, 2022. 514 с.
5. МГЭИК, 2014 г.: Изменение климата, 2014 г.: Воздействия, адаптация и уязвимость. Глоссарий. Ред. Дж. Агард и Л. Шиппер // Cambridge University Press. С. 195–222. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5\\_WGII\\_glossary\\_RU.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_WGII_glossary_RU.pdf).
6. OECD, 2021a. International Programme for Action on Climate (IPAC). <https://www.oecd.org/climate-action/ipac>
7. OECD, 2021b. The Annual Climate Action Monitor: Helping Countries Advance Towards Net Zero, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/5bcb405c-en>
8. Министерство экономического развития Российской Федерации, 2021. Об утверждении методических рекомендаций и показателей по вопросам адаптации к изменениям климата // Приказ Минэкономразвития России № 267 от 13 мая 2021 г. [https://www.economy.gov.ru/material/file/b3cc582c24e7367170b5605f1199c6a9/267\\_13052021.pdf](https://www.economy.gov.ru/material/file/b3cc582c24e7367170b5605f1199c6a9/267_13052021.pdf).
9. UNEP. Adaptation gap report 2021. Nairobi: UNEP. 2021.
10. МГЭИК, 2014 г.: Изменение климата, 2014 г.: Воздействия, адаптация и уязвимость. Резюме, часто задаваемые вопросы и перекрестные вставки по главам. Вклад Рабочей группы II в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата (К.Б. Филд, В.Р. Баррос, Д.Дж. Доккен, К.Дж. Мак, М.Д. Мастрандреа, Т.Е. Билир, М. Чаттерджи, К.Л. Эби, Й.О. Эстрада, Р.К. Дженова, Б. Джирма, Е.С. Киссел, А.Н. Леви, С. Маккракен, П.Р. Мастрандреа и Л.Л. Уайт). Всемирная Метеорологическая Организация, Женева, Швейцария, 222 с.
11. *Липка О.Н., Романовская А.А., Семенов С.М.* Прикладные аспекты адаптации к изменениям климата в России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. № 1. С. 65–90.
12. ГОСТ Р ИСО 14090-2019. Национальный стандарт Российской Федерации “Адаптация к изменениям климата. Принципы, требования и руководящие указания”. 2019. <https://docs.cntd.ru/document/1200167738>
13. *Extance A.* How AI technology can tame the scientific literature // Nature. 2018. V. 561. № 7722. P. 273–274.
14. Global Landscape of Climate Finance 2021 report / Climate Policy Initiative. 2021. URL: <https://www.climatepolicyinitiative.org/publication/global-landscape-of-climate-finance-2021>.
15. *Berrang-Ford L. et al.* Tracking global climate change adaptation among governments // Nat. Clim. Change. 2019. V. 9. № 6. P. 440–449.
16. *Woodruff S.C., Regan P.* Quality of national adaptation plans and opportunities for improvement // Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change. 2019. V. 24. № 1. P. 53–71.
17. *Woodruff S.C., Stults M.* Numerous strategies but limited implementation guidance in US local adaptation plans // Nat. Clim. Change. 2016. V. 6. № 8. P. 796–802.
18. *Boutang J. et al.* Climate Change Adaptation: Operational Taxonomy and Metrics // Sustainability. 2020. V. 12. № 18. P. 7631.
19. *Owen G.* What makes climate change adaptation effective? A systematic review of the literature // Glob. Environ. Change. 2020. V. 62. P. 102071.
20. *Ford J.D., King D.* A framework for examining adaptation readiness // Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change. 2015. V. 20. № 4. P. 505–526.
21. *Biesbroek R. et al.* Data, concepts and methods for large- n comparative climate change adaptation policy research: A systematic literature review // WIREs Clim. Change. 2018. V. 9. № 6. C. e548.
22. *Stadelmann M. et al.* Universal Metrics to Compare the Effectiveness of Climate Change Adaptation Projects // Handbook of Climate Change Adaptation / ed. Leal Filho W. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. P. 2143–2160.
23. World Bank, World Development Report 1993: Investing in health // Oxford University Press, Oxford. 1993. 12 с.
24. WHO, Global Burden of Disease // World Health Organization. 2010. Geneva. 146 с.
25. *Varghese B.M. et al.* Are workers at risk of occupational injuries due to heat exposure? A comprehensive literature review // Saf. Sci. 2018. V. 110. P. 380–392.
26. *Kharuk V.I. et al.* Climate-induced mortality of spruce stands in Belarus // Environ. Res. Lett. 2015. V. 10. № 12.
27. *Leng G., Hall J.* Crop yield sensitivity of global major agricultural countries to droughts and the projected

- changes in the future // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 654. P. 811–821.
28. *Dottori F. et al.* Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming // *Nat. Clim. Change.* 2018. V. 8. № 9. P. 781–786.
  29. *Misuri A. et al.* Lessons learnt from the impact of hurricane Harvey on the chemical and process industry // *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2019. V. 190. P. 106521.
  30. *Weinkle J. et al.* Normalized hurricane damage in the continental United States 1900–2017 // *Nat. Sustain.* 2018. V. 1. № 12. P. 808–813.
  31. *ВМО.* Руководство для пользователей стандартизированного индекса осадков. Женева: Всемирная Метеорологическая Организация, 2012. 20 с.
  32. *Черенкова Е.А., Золотокрылин А.Н.* О сравнимости некоторых количественных показателей засухи // *Фундаментальная и прикладная климатология.* 2016. № 2. С. 79–94.
  33. *Катцов В.М., Хлебникова Е.И., Школьник И.М., Рудакова Ю.Л.* Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата как основа разработки адаптационных программ в экономике Российской Федерации // *Метеорология и гидрология,* 2020. № 5. с. 46–58.
  34. *Семенов С.М., Попов И.О., Ясюкевич В.В.* Статистическая модель для оценки формирования климатических угроз по данным мониторинга климата. *Метеорология и гидрология.* 2020. № 5. С. 59–65.
  35. *Романовская А.А.* Оценка приоритетности территориальных единиц России с целью адаптации к климатическим угрозам // *Метеорология и гидрология.* 2022. № 2. С. 53–61.
  36. Максимальная температура воздуха // *Национальный атлас России.* Т. 2. С. 162–163.
  37. *Slivinski L.C. et al.* An Evaluation of the Performance of the Twentieth Century Reanalysis Version 3 // *J. Clim.* 2021. V. 34. № 4. P. 1417–1438.
  38. *Leyk S. et al.* The spatial allocation of population: a review of large-scale gridded population data products and their fitness for use // *Earth Syst. Sci. Data.* 2019. V. 11. № 3. P. 1385–1409.
  39. *Tong S., Wang X.Y., Barnett A.G.* Assessment of Heat-Related Health Impacts in Brisbane, Australia: Comparison of Different Heatwave Definitions // *PLoS ONE* / ed. Zimmer J. 2010. V. 5. № 8. P. e12155.
  40. *Nairn J., Fawcett R.* The Excess Heat Factor: A Metric for Heatwave Intensity and Its Use in Classifying Heatwave Severity // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2014. V. 12. № 1. P. 227–253.
  41. *Ревич Б.А. и др.* Волны жары в южных городах европейской части России как фактор риска преждевременной смертности населения // *Проблемы прогнозирования.* 2015. № 2. С. 56–67.
  42. *Ревич Б.А., Малеев В.В., Смирнова М.Д.* Изменение климата и здоровье: оценки, индикаторы, прогнозы. М.: ИМП РАН, 2019. 196 с.
  43. *Belova I.N., Ginzburg A.S., Krivenok L.A.* Heating seasons length and degree days trends in Russian cities during last half century // *Energy Procedia.* 2018. V. 149. P. 373–379.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.201>
  44. *Клименко В.В., Гинзбург А.С., Федотова Е.В., Терешин А.Г.* Волны тепла – новая опасность для энергосистемы России // *Докл. Российской академии наук. Физика, технические науки.* 2020. Т. 494. С. 82–88.
  45. *Александров Г.Г.* Климатически обусловленный минимум потребности в энергии для отопления в городах центра европейской части России // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2020. Т. 56. № 6. С. 700–705.
  46. *Schamm K. et al.* Global gridded precipitation over land: a description of the new GPCC First Guess Daily product // *Earth Syst. Sci. Data.* 2014. V. 6. № 1. P. 49–60.
  47. *Sun Q. et al.* A Review of Global Precipitation Data Sets: Data Sources, Estimation, and Intercomparisons // *Rev. Geophys.* 2018. V. 56. № 1. P. 79–107.
  48. *Sexton J.O. et al.* Global, 30-m resolution continuous fields of tree cover: Landsat-based rescaling of MODIS vegetation continuous fields with lidar-based estimates of error // *Int. J. Digit. Earth.* 2013. V. 6. № 5. P. 427–448.
  49. *Schepaschenko D. et al.* A new hybrid land cover dataset for Russia: a methodology for integrating statistics, remote sensing and in situ information // *J. Land Use Sci.* 2011. V. 6. № 4. P. 245–259.
  50. *Buchhorn M. et al.* Copernicus Global Land Cover Layers—Collection 2 // *Remote Sens.* 2020. V. 12. № 6. P. 1044.
  51. *Arnell N.W. et al.* Changing climate risk in the UK: A multi-sectoral analysis using policy-relevant indicators // *Clim. Risk Manag.* 2021. V. 31. P. 100265.
  52. *Bizikova L. et al.* An indicator set to track resilience to climate change in agriculture: A policy-maker's perspective // *Land Use Policy.* 2019. V. 82. P. 444–456.
  53. *Scholze N., Riach N., Glaser R.* Assessing climate change in the trinational upper Rhine Region: How can we operationalize vulnerability using an indicator-based, meso-scale approach? // *Sustain. Switz.* 2020. V. 12. № 16. C. 6323.
  54. *Lorente M. et al.* Tracking Forest changes: Canadian Forest Service indicators of climate change // *Clim. Change.* 2020. V. 163. № 4. P. 1839–1853.
  55. *Schauberger B. et al.* French crop yield, area and production data for ten staple crops from 1900 to 2018 at county resolution // *Sci. Data.* 2022. V. 9. № 1. P. 38.
  56. *Гордов Е.П., Гордова Ю.Е., Окладников И.Г., Рязанова А.А., Титов А.Г.* Веб-гис платформа “климат” для исследования климатических процессов и откликов на них: потенциал и перспективы // *Оптика атмосферы и океана.* 2022. Т. 35. № 2 (397). С. 132–135.

## Climatic Criteria for the Preventive Adaptation Need

A. S. Ginzburg<sup>1</sup>, \*, G. A. Alexandrov<sup>1</sup>, and A. V. Chernokulsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky 3, Moscow, 119017 Russia*

*\*e-mail: gin@ifaran.ru*

In the light of observed and predicted climate changes, there is a need for developing science-based methods and criteria to assess the need for planned adaptation to the consequences of climate change and associated risks. The nature, the population, and the economy always respond to changing conditions, including climate change, and adapt to them. However, the speed and effectiveness of reactive adaptation may not be sufficient. Due to this reason, the planning of adaptation measures and implementation of preventive adaptation become critical for sustainable development of the economy, improving the quality of life of people, and preserving ecosystems. This paper proposes an approach to identify quantitative indicators of climate impact that show the need for preventive adaptation when exceeding threshold values. The proposed approach can also be applied to the sectors of the economy and the subjects of the Russian Federation.

**Keywords:** climate change, impact, exposure, vulnerability, thresholds, preventive and reactive adaptation, quantitative indicators, climate risk