

ISSN 2410-8758



Фундаментальная и прикладная климатология том 9 № 2 / 2023 г.

Фундаментальная и прикладная климатология

Fundamental and
Applied Climatology

ТОМ 9 № 2

2023

Federal Service
for Hydrometeorology
and Environmental
Monitoring (Roshydromet)

ISSN 2410-8758

FUNDAMENTAL AND APPLIED
CLIMATOLOGY

Volume 9 № 2

Moscow 2023

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ
КЛИМАТОЛОГИЯ**

Том 9 № 2 2023 год

Научный редактор: М.Ю. Бардин

Выпускающий редактор: В.А. Гинзбург

Технические редакторы:

Л.В. Кудрявцева, И.М. Брускина

Корректор: Л.В.Цибизова

Верстка: Л.А. Прохорова

Формат: 160 x 260

Печать цифровая

Бумага офсетная

Печатных листов:

Тираж 150 экз.

Заказ №

Свидетельство о регистрации СМИ:

ПИ № ФС77-74294 Подписано в печать

Отпечатано в типографии

Федеральная служба
по гидрометеорологии и мониторингу
окружающей среды
(Росгидромет)

ISSN 2410-8758

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ
КЛИМАТОЛОГИЯ**

Том 9 № 2

Москва 2023

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ КЛИМАТОЛОГИЯ

Научный журнал (4 выпуска в год), публикующий оригинальные и обзорные статьи о процессах и явлениях регионального и глобального масштабов по следующей тематике: формирование климата Земли, естественные и антропогенные факторы изменения климатической системы, выявление и атрибуция трендов ее состояния и соответствующих рисков для природных и социально-экономических систем, вопросы митигации и адаптации. Публикуются также статьи о результатах мониторинга климатической системы и о значительных событиях в научном мире. Издается по решению Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Статьи представляются и публикуются на русском или английском языках. Возможна также публикация переводов статей, опубликованных ранее или же в текущем номере.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: С.М. Семенов (главный редактор), К.Н. Анахаев, М.Ю. Бардин (заместитель главного редактора), Р.В. Бекряев, Е.М. Володин, А.В. Елисеев, А.Н. Золотокрылин, А.Л. Иванов, В.М. Катцов (заместитель главного редактора), А.В. Кислов, А.В. Клепиков, А.Г. Костяной, В.Н. Крупчатников, С.А. Лавров, В.Ф. Логинов, Г.В. Нестеров, Л.А. Прохорова (ответственный секретарь), Э.Я. Ранькова, В.А. Семенов, А.М. Стерин, С.Н. Степаненко, Е.И. Хлебникова.

Адрес для первичного представления материалов для публикации: РФ, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б, ИГКЭ, Семенову С.М.; semenov@igce.ru.
Международный стандартный номер сериального периодического издания ISSN 2410-8758.

Подписной индекс по каталогу Роспечати – 58364.

Свидетельство о регистрации журнала в форме печатного СМИ:

ПИ № ФС77-74294 от 9 ноября 2018 г.

веб-страница: <https://fa-climatology.ru>.

FUNDAMENTAL AND APPLIED CLIMATOLOGY

A quarterly scientific journal publishing original and review papers on events and processes of regional and global scales on the following topics: Earth's climate forming processes, natural and anthropogenic factors of changes in the climate system, detection and attribution of its trends and associated risks for natural and socio-economic systems, mitigation and adaptation issues. Articles presenting the results of climate system monitoring and significant events in the scientific world are also invited. The journal is published according to the decision of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring.

Articles are submitted and published in Russian or English. The publication of translations of articles published in the previous or current issues is also possible.

EDITORIAL BOARD: S.M. Semenov (Editor-in-Chief), K.N. Anakhaev, M.Yu. Bardin (Deputy Editor-in-Chief), R.V. Bekryaev, E.M. Volodin, A.V. Eliseev, A.N. Zolotokrylin, A.L. Ivanov, V.M. Kattsov (Deputy Editor-in-Chief), A.V. Kislov, A.V. Klepikov, A.G. Kostianoy, V.N. Krupchatnikov, S.A. Lavrov, V.F. Loginov, E.S. Nesterov, L.A. Prokhorova (Executive Secretary), E.Ya. Rankova, V.A. Semenov, A.M. Sterin, S.N. Stepanenko, E.I. Khlebnikova.

Primary submission of manuscripts: Semenov S.M., IGCE, Glebovskaya str, 20B, 107258, Moscow, Russian Federation; e-mail: semenov@igce.ru

International standard serial number of the periodical ISSN 2410-8758.

Subscription index in the Rospechat catalogue – 58364.

Certificate of registration of the journal in the form of printed media:

ПИ № ФС77-74294 of 09.11.2018.

web-page: <https://fa-climatology.ru>.

СОДЕРЖАНИЕ

СОБЫТИЯ И ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ

Роману Менделевичу Вильфанду 75 лет.....131

ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБЗОРЫ

Корнева И.А., Рыбак О.О., Сатылканов Р.А.

Климатические проекции для Центрального и Внутреннего
Тянь-Шаня на основе данных CORDEX.....133

Башмаков И.А.

Перспективы декарбонизации цементной
промышленности России.....165

**Липка О.Н., Богданович А.Ю., Андреева А.П.,
Караваева А.С., Крыленко С.В., Седова А.М.**

Оценка климатообусловленных рисков для территории
Ханты-Мансийского автономного округа – Югры.....178

ДИСКУССИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Анисимов О.А., Гайда И.В., Му А.

Адаптация к изменению климата как путь снижения рисков
для бизнеса.....224

CONTENTS

EVENTS AND COMMEMORATIVE DATES

In celebration of the 75th birthday of R.M. Vilfand.....131

STUDIES AND REVIEWS

Korneva I.A., Rybak O.O., Satylkanov R.A.

Climate projections for Central and Inner Tian Shan based
on the CORDEX data.....133

Bashmakov I.A.

Russian cement industry decarbonization perspectives.....165

**Lipka O.N., Bogdanovich A.Yu., Andreeva A.P.,
Karavaeva A.S., Krylenko S.V., Sedova A.M.**

Assessment of climatic risks for the territory
of Khanty-Mansiysk autonomous okrug – Yugra.....178

DISCUSSION AREA

Anisimov O.A., Gayda I.V., Moe A.

Adaptation to climate change as a factor of lowering business risks.....224

СОБЫТИЯ И ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ

Роману Менделевичу Вильфанду 75 лет



13 июня 2023 года исполнилось 75 лет научному руководителю Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации Роману Менделевичу Вильфанду.

Окончив географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Роман Менделевич сразу пришел в Гидрометцентр, где посвятил себя научной работе в области метеорологического прогнозирования. Это стало его призванием. В 1978 году он защитил кандидатскую диссертацию, а в 2006 году стал доктором наук.

В Гидрометцентре Роман Менделевич проработал более полувека. Долгие годы был его директором и с честью нес эту огромную административную и психологическую ношу. Теперь, отойдя несколько в сторону от различных технических, организационных и хозяйственных вопросов, он полностью посвятил себя своему основному делу – научно-организационной и научной работе.

Будучи научным руководителем Гидрометцентра, он определяет научную политику своего родного института, а, являясь председателем проблемного научного совета Росгидромета и научным организатором направления 1 «Методы, модели и технологии гидрометеорологических расчетов и прогнозов» Плана научно-исследовательских, технологических работ

НИУ Росгидромета, – в целом во многом политику Росгидромета в области метеорологических моделей и прогнозов.

Однако Роман Менделевич не оставляет и собственно исследовательскую работу. Упомянем, прежде всего, выполненные при его участии в последние годы разработки технологии прогноза внутрисезонной изменчивости температурного режима в Северной Евразии на основе статистической коррекции ансамблей долгосрочных гидродинамических прогнозов модели ПЛАВ Гидрометцентра России. Получили широкую известность также результаты в области месячного и сезонного прогнозирования приземной температуры воздуха по Арктическому региону на основе статистической интерпретации ансамблевых прогнозов ПЛАВ в поддержку создаваемого Евразийского арктического и антарктического климатического центра (ЕААКЦ) ВМО. Отметим также методики оценки полезной заблаговременности базовых среднесрочных прогнозов погоды.

Конечно, научно-организационные дела и сейчас «не отпускают» Р.М. Вильфанда. Он входит в состав множества экспертных органов – коллегий и советов – Росгидромета, Минсельхоза России, МЧС России, Минприроды России.

Роман Менделевич очень тонко чувствует ситуацию с научными кадрами в стране и уделяет много времени и сил педагогической работе. Он читает курс лекций по методам долгосрочных прогнозов погоды в МГУ им. М.В. Ломоносова, возглавляет базовую кафедру обработки и анализа данных в гидрометеорологии в Институте информационных технологий Российского технологического университета, возглавляет диссертационный совет ФГБУ «Гидрометцентр России» 26.1.002.01 по защите диссертаций по специальности 1.6.18. Науки об атмосфере и климате, активно работает по этому направлению в диссертационном совете в МГУ им. М.В. Ломоносова.

Многогранная деятельность Р.М. Вильфанда и его достижения отмечены государственными наградами – почетным званием «Заслуженный метеоролог Российской Федерации» и орденом Почета.

Сердечно поздравляем Романа Менделевича с юбилеем. Желаем крепкого здоровья, дальнейших достижений в науке и плодотворной деятельности на благо отечественной гидрометеорологической службы.

*Коллектив ФГБУ «ИГКЭ»,
редколлегия научного журнала
«Фундаментальная и прикладная климатология»*

Климатические проекции для центрального и внутреннего Тянь-Шаня на основе данных CORDEX

И.А. Корнева^{1),2)}, О.О. Рыбак^{2),3),4)}, Р.А. Сатылканов^{5),6)}*

¹⁾Институт географии РАН,
Россия, 109017, г. Москва, Старомонетный пер., 29

²⁾Институт природно-технических систем,
Россия, 299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

³⁾Институт водных проблем РАН,
Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, 3

⁴⁾ФИЦ «Субтропический научный центр РАН»,
Россия 354002, г. Сочи, ул. Яна Фабрициуса, 2/28

⁵⁾ Тянь-Шанский Высокогорный научный центр при Институте водных проблем и гидроэнергетики НАН КР,
Кыргызстан, 722000, Кызыл-Суу, ул. Пионерская, 9

⁶⁾ Научно-исследовательский центр экологии и окружающей среды Центральной Азии,
Кыргызстан, 720040, Бишкек, бульвар Эркиндик

*Адрес для переписки: comissa@mail.ru

Реферат. Климатические изменения в Средней Азии обуславливают сокращение масштабов горного оледенения Тянь-Шаня. Последнее является важнейшим источником стабильного поступления воды в гидрологическую систему этого засушливого региона. Ускоренное таяние ледников создает дополнительные риски для устойчивого развития и региональной водной, энергетической и продовольственной безопасности. В фокусе настоящего исследования находится Центральный и Внутренний Тянь-Шань. Эта территория характеризуется высокой степенью оледенения. На ней находятся истоки одной из важнейших водных артерий Кыргызстана – р. Нарын.

Для физически обоснованного прогнозирования эволюции горного оледенения на долгосрочную перспективу и вызванных им изменений в речном стоке необходимо исходить из модельных проекций регионального климата. Пространственное разрешение в первые десятки километров обеспечивают мезомасштабные (региональные) климатические модели (РКМ), которые используются в связке с моделями общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО): первые генерируют климатические изменения на долгосрочную перспективу в планетарном масштабе с разрешением первые сотни километров и обеспечивают граничные условия для РКМ, областью решения которых является пространственно-ограниченный регион. В настоящей работе для целей построения региональных климатических проекций были использованы материалы проекта CORDEX, которые включают варианты прогностических расчетов на трех различных связках МОЦАО-РКМ для обширного

Центральноазиатского региона, к которому относятся Центральный и Внутренний Тянь-Шань. Исходные поля имеют пространственное разрешение около 25 км и разрешение по времени 1 сутки. Исторический период охватывает 1977-2005 гг., прогностический (для климатических сценариев – «умеренного» RCP2.6 и «экстремального» RCP8.5) – 2006-2100 гг.

Систематические ошибки в модельных климатических полях исключаются различными процедурами коррекции. В статье приводится обзор этих процедур и обосновывается выбор оптимальных для целей исследования. Скорректированные поля подвергаются дальнейшей регионализации до пространственного масштаба 1 км. Для проведения этой процедуры используются данные наблюдений на сетевых метеостанциях и автоматических метеостанциях, установленных на ледниках региона.

Было установлено, что в соответствии со сценарием RCP2.6 величина положительной аномалии приземной температуры воздуха в среднем за летний период к концу XXI века не превышает 1.5°C, а по сценарию RCP8.5 достигает 5.5°C относительно исторического периода. В годовом ходе аномалий максимум прогнозируется в осенние и зимние месяцы, минимум – в апреле. В рамках обоих сценариев прогнозируется рост количества осадков, который не превышает 50% в сценарии RCP8.5 в конце столетия в период максимального роста (весной).

Полученные прогностические поля предназначены для использования в гидрологическом и гляциологическом моделировании.

Ключевые слова. Тянь-Шань, горное оледенение, климатические проекции, глобальная климатическая модель, региональная климатическая модель, статистическая коррекция, регионализация.

Climate projections for Central and Inner Tian Shan based on CORDEX data

I.A. Korneva^{1),2)}, O.O. Rybak^{2),3),4)}, R.A. Satylkanov^{5),6)}*

¹⁾ Institute of Geography RAS,
29, Staromonetnyi, 109017, Moscow, Russian Federation

²⁾ Institute of Natural and Technical Systems,
28, Lenina str., 299011, Sevastopol, Russian Federation

³⁾ Water Problems Institute RAS,
3, Gubkina str., 119333, Moscow, Russian Federation

⁴⁾ Subtropical Scientific Center RAS,
2/28, Ya. Fabriziusa str., 354002, Sochi, Russian Federation

⁵⁾ Tien Shan High Mountains Scientific Center at the Institute of Water Problems and Hydropower of the National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic,
9, Pionerskaya str., 722000, Kyzyl Suu, Kyrgyzstan

⁶⁾ Scientific Research Center of Ecology and Environment of the Central Asia,
Erkindik blvd, 720040, Bishkek, Kyrgyzstan

*Correspondence address: comissa@mail.ru

Abstract. Climatic changes in Central Asia cause reduction in the mountain glaciation extent in the Tien Shan. The latter is the most important source of stable water contribution to the hydrological system of this arid region. Accelerated melting of glaciers creates additional risks for sustainable development and regional water, energy and food security. In the focus of our study is the Central and Inner Tien Shan. This area is highly glaciated and upper reaches of the river Naryn, one of the most important waterways of Kyrgyzstan, are located here.

For a physically based long-term prediction of the evolution of mountain glaciation and induced changes in river runoff, it is necessary to start with model projections of the regional climate. Spatial resolution of the first tens of kilometers is provided by mesoscale (regional) climate models (RCMs), which, however, are not intended for long-term forecasts on a time scale of decades. The solution is to use a combination of AOGCMs (Atmospheric and Oceanic General Circulation Models) and RCMs: the former generate long-term climate changes on the planet as a whole with a resolution of a few hundreds of kilometers and provide boundary conditions for the latter, whose operational area is a spatially limited region. In this study, for the purposes of constructing regional climate projections, materials of the CORDEX project were used, which include climate projections simulated by three different AOGCM-RCM pairs for the vast Central Asian region, which includes the Central and Inner Tien Shan. The initial fields have a spatial resolution of about 25 km and a temporal resolution of 1 day. The historical period covers 1977-2005, the prognostic period – 2006-2100 (for two climate scenarios – "moderate" RCP2.6 and "extreme" RCP8.5).

Systematic errors in model climatic fields are eliminated by various correction procedures. In the paper, we provide an overview of these procedures and justify the choice of the optimal ones for the purposes of the research. The corrected fields are further downscaled to a spatial resolution of 1 km. To carry out this procedure, we used observational data from the regular weather stations and automatic weather stations installed directly on the glaciers.

Our analysis revealed that in accordance with the RCP2.6 scenario, the value of the positive anomaly of surface summer air temperature by the end of the 21st century does not exceed 1.5°C, and according to the RCP8.5 scenario, it reaches 5.5°C relative to the historical period. During the year, the maximum of anomalies is predicted in the autumn and winter months, the minimum – in April. Both scenarios predict an increase in precipitation that does not exceed 50% in the RCP8.5 scenario at the end of the century during the period of maximum growth (spring). The resulting prognostic fields can be used in hydrological and glaciological modeling.

Keywords. Tian-Shan, mountain glaciers, climate projections, general circulation model, regional climate model, bias correction, downscaling.

Введение

Одним из ключевых последствий современного потепления климата является масштабное сокращение оледенения Земного шара. Наиболее интенсивной

деградации подвержены горные ледники: за последние два десятилетия скорость их сокращения удвоилась и составила 267 ± 16 Гт/год (Hugonnet et al., 2021). По оценкам (Zemp et al., 2019) повышение уровня мирового океана за счет таяния горных ледников за период 1967-2016 гг. составило 27 ± 22 мм в.э. По данным (Hock et al., 2019), в соответствии с климатическим сценарием RCP8.5, масса всех горных ледников мира к 2100 г. относительно 2015 г. сократится в среднем по оценкам шести глобальных гляциологических моделей на $41 \pm 13\%$.

Ледники Центральной Азии являются критически важным источником пресной воды в регионе, а оледенение Тянь-Шаня опосредовано обеспечивает пресной водой более 100 млн человек (Aizen et al., 2006). Цифра, приведенная выше, может показаться несколько завышенной, однако только в области водосбора р. Сыр-Дарьи (в верховье – р. Нарын) проживает 20 млн человек (Bernauer, Siegfried, 2012). По прошествии нескольких лет после опубликования вышеупомянутых работ ситуация едва ли существенно изменилась из-за высоких темпов прироста населения в регионе (Siegfried et al., 2012). Изменение климата не только влияет на ресурсы пресной воды, оно вызывает наводнения, оползни, засухи и другие стихийные бедствия (Ibatullin et al., 2009). Ускоренное таяние ледников создает дополнительные риски для устойчивого развития и региональной водной, энергетической и продовольственной безопасности (Баетов, Архангельская, 2015). Масштаб проблемы сокращения ледников становится яснее, если учесть вклад талой ледниковой воды в общий сток. В Кыргызстане талые воды составляют до 50% общего стока в годовом исчислении и до 70% в летние месяцы (Sorg et al., 2012), обеспечивая, помимо сельского хозяйства, гидроэнергетику, которая, в свою очередь, покрывает до 90% потребностей страны в электроэнергии (Ibatullin et al., 2009). Деграция горного оледенения в регионе может привести к существенным последствиям для обеспечения жизнедеятельности (Поповнин и др., 2021; Aizen et al., 2006). По оценкам (Aizen et al., 2006), за период 1943-2003 гг. сокращение ледников Северного и Центрального Тянь-Шаня составило 14.2%. Авторы отмечают, что за этот период произошел рост летней температуры воздуха (на метеостанции Тянь-Шань – на 1.0°C за 1943-2003 гг.), особенно с 1970-х гг., а количество осадков оставалось практически неизменным. В работе (Сатылканов, 2016) предполагается, что увеличение абляции ледников бассейна р. Чон-Кызыл-Суу в связи с ростом летней и осенней температуры воздуха может привести к сокращению речного стока.

Климат Внутреннего Тянь-Шаня – резко континентальный, с большими годовыми амплитудами температуры воздуха, около 75% осадков выпадает с мая по сентябрь, максимум – в летние месяцы (Aizen, 1995; Kutuzov, Shahgedanova, 2009; Van Tricht et al., 2021). Большинство ледников в данном районе имеет весенний максимум аккумуляции, а летом частые снегопады препятствуют дополнительному таянию за счет увеличения альбедо поверхности (Van Tricht et al., 2021). Ледники такого типа наиболее чувствительны к потеплению в летний период, так как, помимо эффекта от уменьшения альбедо поверхности, происходит увеличение доли жидких осадков.

Для моделирования эволюции горных ледников и речного стока необходимы климатические данные с высоким пространственным и временным разрешением (Постникова, Рыбак, 2021, 2022). Качество и полнота климатических данных оказывает значительное влияние на результаты гляциологических расчетов. Общие климатические тенденции выявляются по результатам анализа численных экспериментов на моделях общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), которые в последние годы трансформируются в так называемые «модели земной системы» (Володин и др., 2016) в силу все более и более детального описания физических процессов, протекающих в биосфере и деятельном слое суши. Пространственное разрешение в атмосферных блоках современных моделей земной системы не превышает одного градуса, что, естественно, крайне недостаточно для гляциологического моделирования в горных районах. Региональные (мезомасштабные) климатические модели (РКМ) обеспечивают пространственное разрешение, исчисляемое первыми десятками километров, но при этом, разумеется, не способны воспроизвести глобальные климатические тенденции и тоже неприменимы для описания метеорологических полей даже для крупных горных ледников. По сложившейся в последние годы практике региональные климатические проекции получают при использовании связи МОЦАО-РКМ: первые генерируют климатические изменения на долгосрочную перспективу в целом по планете и обеспечивают граничные условия для вторых, операционной областью которых является пространственно-ограниченный регион.

Для построения региональных климатических проекций в регионе Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня в настоящей работе использованы данные проекта по мезомасштабному моделированию CORDEX (Coordinated Regional Downscaling Experiment), которые сформированы в том числе и для Центральной Азии. Поскольку климатические поля, генерируемые в связке МОЦАО-РКМ содержат систематические ошибки, перед практическим применением их необходимо было соответствующим образом скорректировать, используя данные наблюдений (выполнить операцию, получившую в англоязычной литературе «bias correction» (Christensen et al., 2008; Terink et al., 2010 и мн. др.). В нашей работе подробно рассмотрена методика коррекции исходных модельных данных о температуре воздуха и количестве атмосферных осадков и анализируются ожидаемые климатические изменения этих двух параметров, которые потенциально могут привести к деградации горного оледенения в регионе. Целью данной работы явилось получение скорректированных и регионализованных до 1 км прогностических полей температуры воздуха и осадков до 2100 г. в регионе Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня, которые могут быть использованы в качестве входных параметров (граничных условий) для гляциологического моделирования. Заметим, что результаты проекта CORDEX использовались и ранее для исследования реакции горного оледенения на прогнозируемые изменения климата (Zekollari et al., 2019).

Исходные данные

Данные проекта CORDEX представляют собой климатические проекции до конца XXI в., полученные в нескольких связках МОЦАО-РКМ. На МОЦАО рассчитываются глобальные климатические поля с малым пространственным разрешением (от 1° до 5° по широте и долготе в зависимости от вида и реализации модели), задающие граничные условия для РКМ, которые оперируют на пространственных сетках с гораздо меньшим пространственным шагом (11-50 км). В проекте CORDEX Земной шар поделен на 13 макрорегионов, для каждого из которых используются различные связки МОЦАО+РКМ. В настоящей работе использовались результаты расчетов для региона Центральной Азии (CAS), который включает в себя регион Тянь-Шаня (рис. 1а).

Для данного региона были использованы следующие глобальные климатические модели (участвовавшие в проекте CMIP5):

- МОЦАО Метеорологического института Макса Планка (Гамбург, ФРГ) MPI (<https://mpimet.mpg.de/en/science/models/mpe-esm/>),
- МОЦАО CNRM-CERFACS Национального метеорологического центра Франции и Meteo-France (<http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?rubrique1&lang=en>),
- МОЦАО NCC-NorESM1 Климатического центра Норвегии <https://portal.enes.org/models/earthsystem-models/ncc-1>);

и региональные модели:

- Бельгийско-французская РКМ ALARO-0 (<http://euro-cordex.be/meteo/view/en/29038078-ALARO-0+model.html>),
- РКМ REMO Института Макса Планка и Климатического Центра CERICS (Гамбург, ФРГ) (<https://www.remo-rcm.de/>; <https://www.remo-rcm.de/059966/index.php.en>).

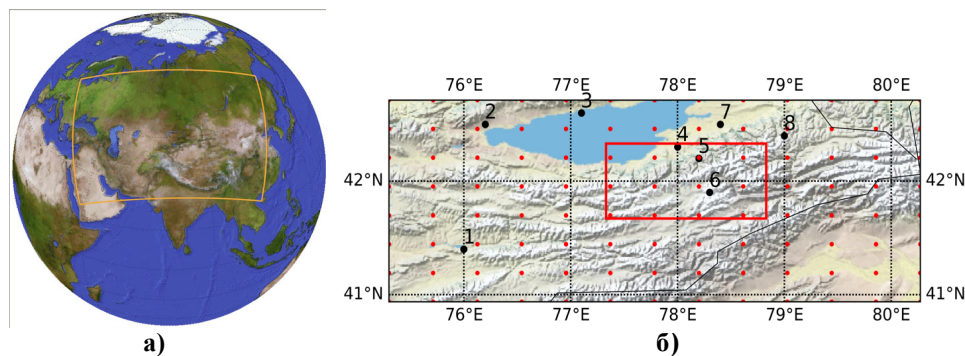


Рисунок 1. а) Регион № 13 (Центральная Азия) в проекте CORDEX (<https://cordex.org/domains/region-8-central-asia/>), б) Регион Тянь-Шаня: черные кружки – сетевые метеорологические станции, используемые в работе (табл. 1), красные кружки – узлы модельной сетки, красный прямоугольник – условные границы Внутреннего Тянь-Шаня

Figure 1. a) Region № 13 (Central Asia) in CORDEX Experiment (<https://cordex.org/domains/region-8-central-asia/>); b) Tian-Shan: black circles – meteorological stations used in this work (Table 1), approximate boundaries of the Inner Tian-Shan are marked by red rectangle

В работе были использованы расчеты на трех связках моделей: MPI-REMO, CNRM-ALARO, NCC-NorESM1-REMO. Таким образом, каждой МОЦАО соответствует своя РКМ. Климатические поля, полученные в рамках проекта CORDEX, находятся в свободном доступе на Интернет-ресурсе Всемирной программы исследований климата (WCRP): <https://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/>.

Таблица 1. Метеостанции Кыргызской Республики, которые использовались для коррекции модельных данных

Table 1. Meteorological stations in Kyrgyz Republic used for bias correction

	Название метеостанции	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	Высота над у.м., м
1	Нарын	41.4	76.0	2041
2	Балыкчы	42.5	76.2	1658
3	Чолпон-Ата	42.6	77.1	1645
4	Кызыл-Суу	42.3	78.0	1770
5	Чон-Кызыл-Суу	42.2	78.2	2555
6	Тянь-Шань	41.9	78.3	3660
7	Каракол	42.5	78.4	1770
8	Чон-Ашу	42.4	79.0	2794

Для планируемого моделирования эволюции ледников массива Ак-Шийрак, хребтов Терской Ала-Тоо, Суёк из всего региона был вырезан район, включающий часть Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня (41.0-43.0° с.ш., 75.5-80.5° в.д., рис. 1б). Исторические данные CORDEX CAS о приземной температуре воздуха и количестве осадков охватывают период 1977-2005 гг., прогностические – 2006-2100 гг., по двум сценариям – RCP2.6 и RCP8.5. Пространственное разрешение исходных данных CORDEX CAS – 25 км.

Известно, что поля климатических моделей содержат систематические ошибки (особенно в высокогорных районах), поэтому перед использованием их необходимо скорректировать, используя данные наблюдений. Для коррекции были использованы данные регулярных измерений на восьми метеорологических станциях (МС, табл. 1). Регулярные метеорологические наблюдения в Иссык-Кульской котловине Кыргызстана начались в конце XIX века, их история подробно описана в работе (Сатылканов, 2016). Дополнительно для регионализации данных моделирования привлекались данные автоматических метеостанций (АМС), установленных на леднике Кара-Баткак (высота над у.м. 3420 м, годы наблюдений 2017-2018 гг.), а также на его срединной морене (3450 м, годы наблюдений 2018-2020 гг.), и на леднике Сары-Тор (4080 м, 2015-2019 гг.). Наблюдения на всех метеостанциях, кроме Чон-Кызыл-Суу, выполняются Кыргызгидрометом, на метеостанции Чон-Кызыл-Суу и на автоматических метеостанциях на леднике Кара-Баткак выполняются Тянь-Шанским высокогорным научным центром ИВПиГЭ НАН КР (Сатылканов, 2016).

Сравнение данных моделирования с данными наблюдений

Для того чтобы иметь представление о качестве модельных данных, было проведено их сравнение с данными наблюдений и с данным реанализа. Для сравнения со стационарными данными модельные данные были проинтерполированы в точки станций из ближайшего узла модельной сетки с приведением к высоте станции с использованием вертикального градиента стандартной атмосферы для температуры и с использованием плевометрического градиента для осадков. При этом для осадков узел выбирался так, чтобы рельеф был наиболее схож с точкой расположения станции (долина/прибрежная зона/горный хребет). Такой подход является существенным упрощением сложного пространственного распределения осадков в высокогорном регионе, однако все же позволяет сформировать примерное представление о величине модельных ошибок. Кроме того, коэффициент пространственной корреляции месячных сумм осадков, по стационарным данным, составил 0.5-0.7, что означает, что радиус пространственной корреляции составляет около 130 км. Это значение близко к максимальному расстоянию от узла до ближайшей метеостанции на юго-востоке региона (см. рис. 1) – 150 км, а значит при данном пространственном разрешении модельной сетки и стационарных данных интерполяция правомерна.

На рис. 2 приведены средняя летняя температура воздуха (июнь-август) и суммы осадков за холодный (октябрь-апрель) и теплый (май-сентябрь) сезоны, по данным реанализа ERA5. В нашем случае была использована прогнозная система моделирования IFS Европейского центра ECMWF с использованием 4D-Var процедуры усвоения данных наблюдений, на 137 вертикальных уровнях в атмосфере вплоть до 0.01 ГПа (<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation>).

Для сопоставления с данными CORDEX мы использовали среднемесячные данные за период 1979-2005 гг. с пространственным разрешением 31 км (на регулярной сетке $0.25^\circ \times 0.25^\circ$). Для сравнения на рис. 2 также показаны значения соответствующих параметров, по данным метеостанций. На рис. 3 приведены пространственное распределение средней летней температуры воздуха (июнь-август) и суммы осадков за холодный (октябрь-апрель) и теплый (май-сентябрь) сезоны в среднем за период 1977-2005 гг., по данным CORDEX для трех моделей.

Данные реанализа ERA5 в целом корректно воспроизводят поле средней летней температуры воздуха (рис. 2а) как качественно, так и количественно, исключение составляет юго-западная область, близкая к метеостанции Нарын, где данные реанализа ERA5 завышают температуру более, чем на 3°C . Во всех трех случаях по моделям CORDEX CAS были получены качественно схожие распределения температуры за исторический период (рис. 3 верхний ряд). Сравнение модельных результатов, интерполированных в точки с координатами метеостанций с наблюдениями на последних (табл. 2), показывает, что практически везде модели занижают значение температуры в лет-

ний период – особенно в точках у высокогорных станций Чон-Кызыл-Суу (2555 м) (кроме модели MPI) и Тянь-Шань (3660 м).

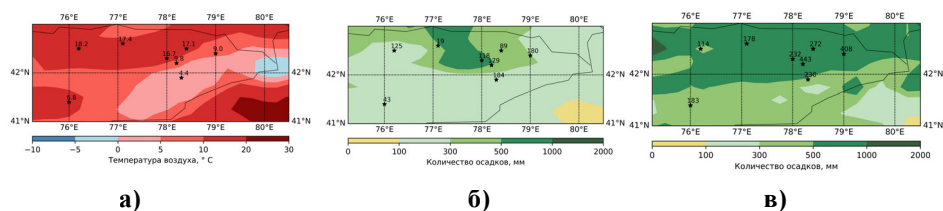


Рисунок 2. Средняя летняя температура приземного воздуха (а) и сумма осадков за холодный сезон (октябрь-апрель) (б) и теплый сезон (май-сентябрь) (в), по данным реанализа ERA5 в среднем за 1979-2005 гг.

Звездочками показано расположение метеостанций со значениями температуры и осадков, по данным этих метеостанций

Figure 2. Mean Summer (June-August) air temperatures (a), cold season (October-April) precipitation sums (b) and warm season (May-September) precipitation sums (c), by ERA5 data in average for the years 1979-2005

Positions of the stations are shown by black stars with air temperature and precipitation sums measured at these stations are indicated nearby

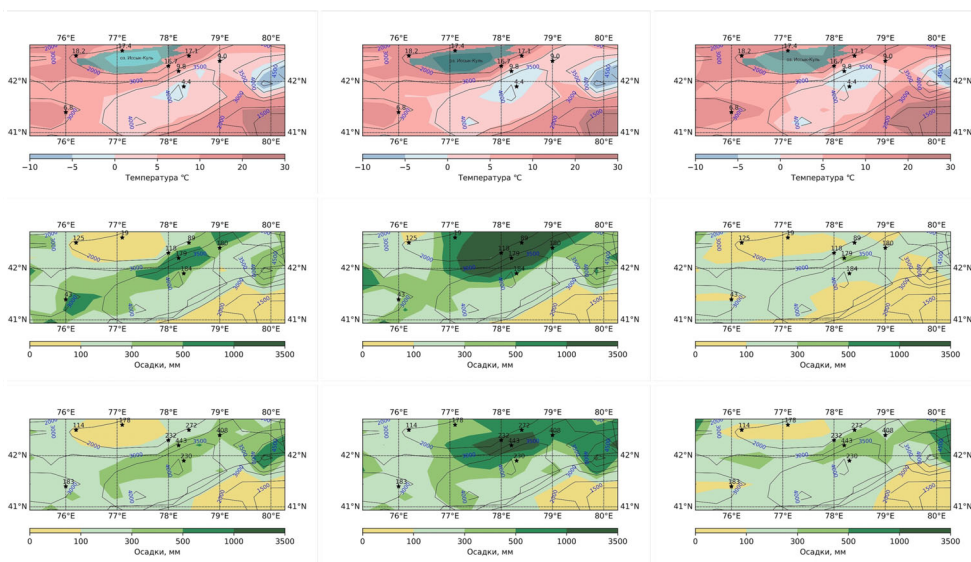


Рисунок 3. Средняя летняя (июнь-август) температура приземного воздуха (верхняя строка), сумма осадков за холодный сезон (октябрь-апрель, средняя строка) и сумма осадков за теплый сезон (май-сентябрь, нижняя строка), по данным моделирования CORDEX с использованием моделей MPI (слева), NCC-NorESM1 (в середине), CNRM-CERFACS (справа) в регионе Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня в среднем для исторического периода 1977-2005 гг.

Звездочками показано расположение метеостанций и значения соответствующих параметров; черные линии – изогипсы рельефа

Figure 3. Mean Summer (June-August) air temperatures (top row), cold season (October-April) precipitation sums (middle row) and warm season (May-September) precipitation sums (bottom row), by CORDEX CAS data for MPI model (left), NCC-NorESM1 model (in the middle), CNRM-CERFACS model (right), for the Central Tian-Shan and the Inner Tian-Shan, averages for the years 1977-2005
Stations' data and corresponding values are marked by black stars; relief is indicated by black contour lines

Таблица 2. Среднеголетние температуры воздуха, °С, в среднем за период 1977-2005 гг., по данным метеостанций и данным моделей, интерполированных в точки координат станций

Table 2. Summer mean air temperatures (°C), averages for the years 1977-2005 by meteorological stations data and model data, interpolated to stations' points

Название метеостанции	Наблюдения	По модели		
		NCC-NorESM1	MPI	CNRM-CERFACS
Нарын	16.8	14.1	14.8	18.9
Балыкчы	18.2	16.7	14.0	17.2
Чолпон-Ата	17.4	17.1	12.7	16.9
Кызыл-Суу	16.7	9.0	15.8	6.8
Чон-Кызыл-Суу	9.8	3.9	10.7	1.7
Тянь-Шань	4.4	-1.5	1.1	-3.0
Каракол	17.1	14.2	17.1	13.7
Чон-Ашу	9.0	5.0	7.8	14.9

Распределение модельных сумм осадков как за сезон аккумуляции, так и за сезон абляции за исторический период различны во всех трех случаях (рис. 3). Наиболее реалистичную картину за оба сезона при сравнении с данными метеостанций (табл. 3, 4) дает модель CNRM – до 350 мм в сезон аккумуляции и до 500 мм в сезон абляции в горных районах и до 100 мм в районе оз. Иссык-Куль. Увеличение количества осадков с высотой вдоль горных хребтов получено на модели MPI, но абсолютная сумма сильно завышена – до 900 мм в высокогорных районах в сезон аккумуляции (рис. 2, табл. 3). Значения сумм осадков в сезон абляции по этой модели достаточно хорошо согласуются с данными станций (табл. 4). По результатам модели NCC-NorESM1 получен, очевидно, ошибочный максимум до 3350 мм в сезон аккумуляции и до 1600 мм в сезон абляции в районе оз. Иссык-Куль, столь высоких сумм осадков здесь не бывает даже в сумме за весь год (средняя годовая сумма на станции Чон-Кызыл-Суу за 1977-2005 гг. составляет 627 мм). Аналогичное завышение осадков в зимний сезон на Северном Тянь-Шане было отмечено в (Shahgedanova et al., 2020), а также в регионе Тибета по моделям CORDEX CAS (Top et al., 2021).

Две из трех моделей, MPI и NCC-NorESM, некорректно воспроизводят годовой ход осадков (рис. 3 и 4). Максимум в годовом ходе по этим моделям наблюдается в холодный сезон, в то время как, по данным наблюдений, в целом для всего региона характерен летний максимум осадков. Реанализ ERA5 корректно воспроизводит летний максимум осадков в регионе (рис. 2 и 4), однако абсолютные значения месячных сумм завышены в 2-3 раза (рис. 4). Как и в моделях CORDEX CAS значительное завышение сумм осадков характерно для района оз. Иссык-Куль и прибрежных районов (рис. 2б,в), особенно для теплого периода – до 1000 мм, по данным реанализа, в то время как, по данным станций, эти суммы составляют не более 400 мм.

Таблица 3. Суммы осадков за холодный сезон (октябрь-апрель, мм) в среднем за период 1977-2005 гг., по данным метеостанций и данным моделей, интерполированных в точки координат станций

Table 3. Cold season (October-April, mm) precipitation sums averages for the years 1977-2005 measured at meteorological stations and model data, interpolated to the stations' coordinates

Название метеостанции	Наблюдения	По модели		
		NCC-NorESM1	MPI	CNRM-CERFACS
Нарын	43	307	535	64
Балыкчы	125	96	27	19
Чолпон-Ата	19	672	33	87
Кызыл-Суу	118	3323	844	304
Чон-Кызыл-Суу	179	3342	863	324
Тянь-Шань	184	699	470	205
Каракол	89	2023	175	78
Чон-Ашу	180	984	492	70

Таблица 4. Суммы осадков за теплый сезон (май-сентябрь, мм) в среднем за период 1977-2005 гг., по данным метеостанций и данным моделей, интерполированных в точки координат станций

Table 4. Warm season (May-September, mm) precipitation sums in average for the years 1977-2005 measured at meteorological stations and model data, interpolated to the stations' coordinates

Название метеостанции	Наблюдения	По модели		
		NCC-NorESM1	MPI	CNRM-CERFACS
Нарын	183	197	206	52
Балыкчы	114	177	81	33
Чолпон-Ата	178	436	68	165
Кызыл-Суу	232	1568	347	455
Чон-Кызыл-Суу	443	1587	366	475
Тянь-Шань	230	508	331	271
Каракол	272	859	148	205
Чон-Ашу	408	704	343	187

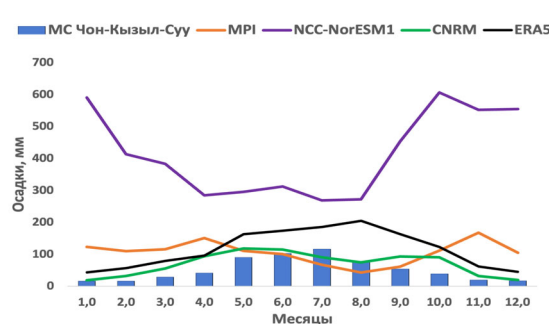


Рисунок 4. Годовой ход количества осадков на станции Чон-Кызыл-Суу, ближайшей к ней точке данных моделирования CORDEX (42.207° с.ш. 78.199° в.д., три модели) в среднем за период 1977-2005 гг., в ближайшем узле сетки реанализа ERA5 (42.25° с.ш. 78.25° в.д.) в среднем за период 1979-2005 гг.

Figure 4. Precipitation annual cycle at Chon-Kizil-Suu meteorological station, at the nearest CORDEX grid point (42.207° N 78.199° E, three models), averages for the years 1977-2005, at the nearest ERA5 grid point (42.25° N 78.25° E), averages for the years 1979-2005

Методы коррекции модельных данных

В настоящее время существуют и активно применяются различные методы статистической коррекции модельных данных (Fang et al., 2015; Luo et al., 2018; Maraun, 2016; Mendez et al., 2020). Поскольку статистическое распределение температуры воздуха и осадков имеет различный вид – температура в большинстве случаев подчиняется распределению Гаусса (нормальному распределению), а количество осадков традиционно описывается гамма-распределением или экспоненциальным распределением (см. например (Гандин, Каган, 1976), а повторяемость событий осадков – марковской цепью 1-2 порядков (Wilks, Wilby, 1999), это определяет разный подход к построению коррекционных схем. В нашем случае статистическое распределение среднемесячных значений температуры воздуха бимодально, а месячные суммы осадков подчиняются экспоненциальному распределению (рис. 5). Бимодальность при коррекции температуры воздуха может быть учтена с помощью разбиения выборки на сезоны или месяцы (в данной работе коррекция выполнялась по месяцам).

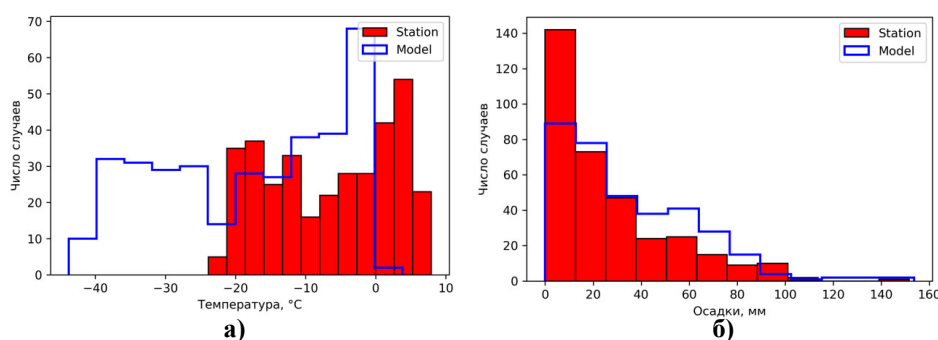


Рисунок 5. Статистическое распределение среднемесячной температуры воздуха (а) и месячных сумм осадков (б), по данным метеостанции Тянь-Шань (красные столбцы) и модели CNRM (синяя линия)

Figure 5. Statistical distribution of monthly air temperatures (a) and monthly precipitation (b), at Tian-Shan weather station (red bins) and by CNRM model data (blue line)

Рассмотрим подробно основные методы коррекции данных:

Линейный метод (температура воздуха и осадки, linear scaling (Luo et al., 2018)):

$$\left. \begin{aligned} T_{RCM_{hist,m,d}}^{corr} &= T_{RCM_{hist,m,d}} + (\overline{T_{OBS_{hist,m}}} - \overline{T_{RCM_{hist,m}}}) \\ Pr_{RCM_{hist,m,d}}^{corr} &= Pr_{RCM_{hist,m,d}} * \frac{\overline{Pr_{OBS_{hist,m}}}}{\overline{Pr_{RCM_{hist,m}}}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\overline{T_{OBS_{hist,m}}}$ – среднемесячная температура за исторический период, по данным наблюдений, $\overline{T_{RCM_{hist,m}}}$ – среднемесячная температура за исторический период, по данным моделирования, $T_{RCM_{hist,m,d}}$ – суточная температура, по данным моделирования. Для осадков (Pr) – аналогичные обозначения.

Линейный метод с учетом дисперсии (температура воздуха, variance scaling (Luo et al., 2018)):

$$T_{RCM_{hist,m,d}}^{corr} = \overline{T_{RCM,LS,m}^{corr}} + \Delta T_{RCM_{hist,m,d}} * \frac{\sigma_m(T_{OBS,m,d})}{\sigma_m(T_{RCM_{hist,m,d}})}, \quad (2)$$

где $\overline{T_{RCM,LS,m}^{corr}}$ – средняя температура, уже скорректированная по линейному методу (1), σ – стандартное отклонение, $\Delta T_{RCM_{hist,m,d}}$ – аномалия температуры: $\Delta T_{RCM_{hist,m,d}} = T_{RCM,LS,m,d}^{corr} - \overline{T_{RCM,LS,m}^{corr}}$

Коррекция с помощью функции распределения вероятности (Luo et al., 2018; Switanek et al., 2017) – распределение модельных данных корректируется в соответствие с функцией распределения данных наблюдений. Обычно предполагается, что данные наблюдений и модели соответствуют определенному выбранному закону распределения вероятностей. Для температуры воздуха чаще всего используется гауссовское распределение:

$$T_{RCM_{hist,m,d}}^{corr} = F_N^{-1}(F_N(T_{RCM_{hist,m,d}} | \mu_{hist,m}, \sigma_{hist,m}^2) | \mu_{obs,m}, \sigma_{obs,m}^2), \quad (3)$$

где F_N – функция распределения Гаусса, μ – среднее значение, σ – стандартное отклонение.

Для количества осадков оптимальным является использование гамма-распределения:

$$P_{RCM_{hist,m,d}}^{corr} = F_Y^{-1}(F_Y(P_{LOCI_{hist,m,d}} | \alpha_{LOCI,hist,m}, \beta_{LOCI,hist,m}) | \alpha_{obs,m}, \beta_{obs,m}), \quad (4)$$

где F_Y – гамма-функция, $P_{LOCI_{hist,m,d}}$ – суточное модельное количество осадков, уже скорректированное на частоту и интенсивность (см. метод 6); α – параметр формы, β – параметр масштаба для распределения.

Метод квантилей (quantile mapping (Epaayati et al., 2021; Luo et al., 2018; Themeßl et al., 2012)) – определенный квантиль распределения суточных модельных данных корректируется в соответствии с квантилем распределения данных наблюдений (см. рис. 2 в (Luo et al., 2018)), и далее в соответствии с этим корректируются прогностические данные:

$$X_{RCM_{proj,m,d}}^{corr} = Q_{D_{X(obs)}^p} (P_{D_{X(RCM)}^p} (X_{RCM_{proj,m,d}})), \quad (5)$$

где X – климатическая характеристика (температура или осадки), $Q_{D_{X(obs)}^p}$ – квантиль вероятности p распределения данных наблюдений, $P_{D_{X(RCM)}^p}$ – соответствующая вероятность p распределения данных модели. Выбор вида квантиля и соответственно вида трансформационной функции зависит от конкретных задач.

Дельта-метод (осадки) – коррекция по разности между наблюдаемыми и модельными значениями (дельта), а затем коррекция прогностических значений (Luo et al., 2018; Shahgedanova et al., 2020):

$$P_{RCMproj,m,d}^{corr} = P_{OBS,m,d} * \frac{\overline{P_{RCMproj,m,d}}}{\overline{P_{RCMhist,m,d}}} \quad (6)$$

Коррекция интенсивности и частоты выпадения осадков (Local intensity scaling, LOCI method (Fang et al., 2015; Ji et al., 2020; Luo et al., 2018)): сначала определяется пороговое значение суточной интенсивности осадков для каждого месяца $P_{T,m}$, ниже которого все модельные значения отсекаются; затем рассчитывается коэффициент s_m таким образом, чтобы среднее многолетнее значение за месяц по модельным данным совпадало с данными наблюдений:

$$s_m = \frac{\overline{P_{OBS,m,d} | P_{OBS,m,d} > 0}}{\overline{P_{RCM,m,d} | P_{RCM,m,d} > P_{T,m}}} \quad (7)$$

$$P_{RCMhist,m,d}^{corr} = \begin{cases} P_{RCM,m,d} * s_m & | P_{RCM,m,d} > P_{T,m} \\ 0 & | P_{RCM,m,d} < P_{T,m} \end{cases}$$

Методы 1, 3, 4, 5 могут применяться как для температуры воздуха, так и для осадков, метод 2 – только для температуры воздуха, метод 6 – только для осадков. Методы коррекции, использующие функции распределения вероятности (3-4), в отличие от линейных методов (1-2), позволяют скорректировать не только средние по выборке величины, но и экстремумы – значения, находящиеся на «хвосте распределения». Для температуры воздуха это не столь актуально – модельные ошибки часто сводятся лишь к систематическому завышению или занижению всей выборки и могут корректироваться линейными методами (например, (Zekollari et al., 2019)). В нашем случае вся выборка среднемесячных значений температуры имеет бимодальное распределение (рис. 5), поэтому при коррекции методом 3 и линейными методами (1 и 2) процедура осуществлялась отдельно для каждого месяца. Коррекция экстремальных значений оказывается существенной для модельных значений количества осадков – при относительно реалистичном воспроизведении среднего значения, модели (и реанализы) часто некорректно воспроизводят осадки максимальной и минимальной интенсивности (Holthuijzen et al., 2022; Xie et al., 2021). Достаточно эффективным при коррекции минимумов количества осадков и частоты их выпадения является метод 6, так как модели нередко завышают частоту осадков слабой интенсивности (так называемый «drizzle effect» в англоязычной литературе, см., например, (Schmidli et al., 2006; Velasquez et al., 2020; Fowler et al., 2007)). Более подробно на примере наших данных этот метод будет рассмотрен ниже.

Коррекция климатических данных CORDEX в регионе Внутреннего Тянь-Шаня

Нами было проведено сравнение основных методов коррекции модельных данных и выявлены оптимальные методы для температуры воздуха и количества осадков. Для этого в качестве критериев соответствия были

использованы абсолютная ошибка (MAE (8)), относительная ошибка (RE (9)), критерий Нэша-Саттклиффа (NSE (10), (Nash, Sutcliffe, 1970) (табл. 5), а также вид годового хода для каждой переменной. Все характеристики были рассчитаны для точек метеостанций, при этом данные моделирования интерполировались в эти точки из ближайшего узла с применением вертикального градиента.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i^{obs} - Y_i^{mod}|}{n} \quad (8)$$

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mod})}{\sum_{i=1}^n Y_i^{obs}} * 100\% \quad (9)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mod})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{obs_mean})^2}, \quad (10)$$

где i – шаг по времени (в данном случае месяц), n – количество наблюдений, $|Y_i^{obs}|$ – значение параметра, по данным наблюдений, $|Y_i^{mod}|$ – значение параметра, по данным модели, $|Y_i^{obs_mean}|$ – среднее многолетнее значение параметра, по данным наблюдений.

Для коррекции температуры воздуха использовались среднемесячные значения температуры на станциях, перечисленных в табл. 1 за период 1977-2005 гг., а также среднесуточные данные на станции Кызыл-Суу за тот же период. В результате поля приземной температуры воздуха были скорректированы с помощью линейного метода с учетом дисперсии (метод 2, рис. ба), так как в соответствии с результатами сравнения, приведенными в табл. 5, именно этот метод показывает наилучшее соответствие с данными наблюдений – средняя абсолютная ошибка менее 0.4°C, а относительная ошибка не превышает 2%. Стандартное отклонение в данном случае рассчитывалось по среднемесячным данным, но корректировалось с использованием суточных данных на станции Кызыл-Суу (variance correction (Luo et al., 2018; Ternik et al., 2010; Zekollari et al., 2019)). В данном случае каждый набор из 3-х связей модельных данных МОЦА-РКМ был скорректирован отдельно и затем рассчитаны средние поля по трем массивам.

Для расчета прогностических значений температуры воздуха к скорректированному историческому среднесуточному значению прибавлялась исходная прогностическая аномалия температуры, которая рассчитывалась как разность между прогностическим суточным значением за определенный день прогностического года и исходным среднесуточным значением температуры по модели в среднем за исторический период:

$$T_{RCM_{proj,m,d}}^{cor} = T_{RCM_{proj,anom}} + \overline{T_{RCM_{hist,m,d}}^{cor}} \quad (11)$$

$$T_{RCM_{proj,anom}} = T_{RCM_{proj,m,d}} - \overline{T_{RCM_{hist,m,d}}}$$

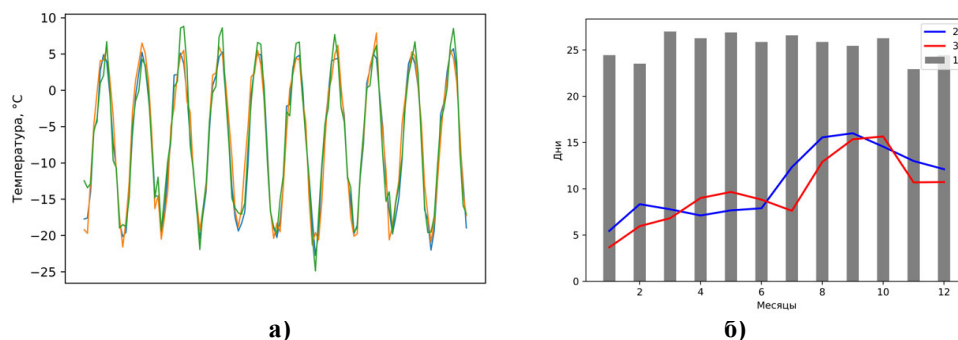


Рисунок 6. а) Временной ход среднемесячной температуры воздуха за период 1977-1986 гг., для точки метеостанции Тянь-Шань: оранжевая линия – данные наблюдений, зеленая линия – исходные значения по модели NCC-NorESM1, синяя линия – скорректированные модельные значения по методу 2; б) Количество дней с осадками для каждого месяца по исходным данным модели CNRM (1), данным наблюдений на МС Тянь-Шань (2), по скорректированным с помощью метода LOCI (метод 6) данным модели CNRM (3)

Figure 6. a) Monthly air temperatures for the years 1977-1986 for Tian-Shan weather station point, orange line – observations, green line – initial data by NCC-NorESM1 model, blue line – bias corrected data by NCC-NorESM1 model; b) Number of days with precipitation by initial CNRM model data (1), by meteorological station Tian-Shan data (2), by bias corrected CNRM model data using LOCI correction method (3)

Таблица 5. Сравнение скорректированных среднемесячных рядов температуры воздуха (номер метода коррекции соответствует номеру метода в разделе «Методы коррекции модельных данных») с данными наблюдений на метеостанциях за период 1977-2005 гг.: абсолютная ошибка (MAE, °C), относительная ошибка (RE, %) и критерий Нэша-Сатклиффа (NSE) в среднем по 8 точкам метеостанций

Table 5. Comparison of the corrected monthly air temperature time series (the number of correction method matches with the number in the Paragraph 3) with the observational data for the years 1977-2005: the mean absolute error (MAE, °C), the mean relative error (RE, %) and Nash-Sutcliffe coefficient (NSE) averaged over 8 stations points

Метод коррекции	MAE(°C/мм)			RE(%)			NSE		
	MPI	NCC-NorESM1	CNRM	MPI	NCC-NorESM1	CNRM-CERFACS	MPI	NCC-NorESM1	CNRM-CERFACS
Температура									
(2)	0.28	0.39	0.28	-1.21	-1.23	-0.16	0.98	0.99	0.99
(3)*	1.55	1.01	2.55	7.46	-0.53	7.67	0.73	0.98	0.81
(4)	1.86	1.79	1,76	6.88	4.21	8.23	0.78	0.88	0.86
Количество осадков									
(1)	23.36	20.15	23.16	-57.39	-58.64	-52.52	0.26	0.19	-2.16
(3)	32.96	37.08	24.50	-122.32	-132.63	-46.20	-43.82	-28.18	-3.59
(4)	32.96	37.29	23.34	-123.05	-130.03	-71.56	-44.16	-27.18	-1.20

Примечание: *среднее значение для 12 отдельных выборок по месяцам

Коррекция осадков осуществлялась в два этапа. Сначала в модельных данных корректировалась частота выпадения осадков. В основном климатиче-

ские модели часто значительно превышают количество дней с осадками в течение месяца и дают много «околонулевых» значений количества осадков в сутки (уже упомянутый выше «drizzle effect»). В районе станций Чон-Кызыл-Суу и Тянь-Шань количество дней с осадками по исходным модельным данным (в среднем за 1977-2005 гг.) по всем трем моделям составило от 25 до 31 дней/месяц во все месяцы года, в то время как по данным станций (в среднем за 2011-2019 гг.), оно составляет от 4 дней/месяц в зимний период до 16 дней/месяц летом. Метод коррекции частоты выпадения осадков заключается в подборе такого порогового значения суточной суммы осадков по модели, выше которого количество дней с осадками в данном месяце будет совпадать со среднемноголетним значением, по данным наблюдений (метод 6). Пороговые значения, ниже которых значения кол-ва осадков задавались нулевыми, варьировались от 0.1 мм до 1.5 мм в зависимости от месяца и модели. Пример коррекции частоты выпадения осадков для модели CNRM приведен на рис. 6б.

На втором этапе корректировалась интенсивность осадков за исторический период. Как было показано на рис. 3 из представленных трех моделей только лишь модель CNRM показывает значения осадков, схожие по порядку величины с данными наблюдений в высокогорных районах. Исходя из значений приведенных в таблице 5, для моделей MPI и NCC-NorESM1 относительная ошибка в некоторых случаях превышает 100%, а критерий Нэша-Сатклиффа значительно меньше 0. Поэтому было принято решение использовать для дальнейших расчетов только данные модели CNRM. Коррекция была осуществлена с помощью стандартного линейного метода (метод 1), при сравнении с данными наблюдений критерии соответствия показали удовлетворительный результат (см. табл. 5). Кроме того, линейный метод позволяет скорректировать годовой ход осадков (см. рис. 4). Коррекция была осуществлена для суточных данных отдельно по месяцам в предположении, что отношение месячных сумм осадков по модели и наблюдениям совпадает с отношением суточных сумм. Было задано максимальное пороговое значение количества осадков в сутки – 50 мм (определено по станционным данным).

Прогностическая аномалия количества осадков рассчитывалась как отношение месячных сумм осадков за каждый месяц прогностического года и средней месячной модельной суммы осадков за весь исторический период:

$$Pr_{RCM_{proj,m,d}}^{cor} = \overline{Pr_{RCM_{hist,m,d}}^{cor}} \cdot \frac{Pr_{RCM_{proj,m}}}{\overline{Pr_{RCM_{hist,m}}}}, \quad (12)$$

где $\overline{Pr_{RCM_{hist,m,d}}^{cor}}$ – средняя скорректированная модельная суточная сумма осадков за весь исторический период, $\overline{Pr_{RCM_{hist,m}}}$ – средняя месячная исходная модельная сумма осадков за весь исторический период, $Pr_{RCM_{proj,m}}$ – месячная модельная прогностическая сумма осадков за каждый прогностический год.

Регионализация климатических данных CORDEX в регионе Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня

Регионализация температуры воздуха и количества осадков проводилась из модельной сетки CORDEX с разрешением 25 км в пространственную сетку с разрешением около 1 км для всего рассматриваемого региона Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня (рис. 1). Для этого была использована цифровая модель рельефа ЦМР с разрешением 30 м ALOS Global Digital Surface Model "ALOS World 3D - 30 m" (ALOS DEM).

Нами были рассчитаны вертикальные градиенты приземной температуры воздуха по всем имеющимся доступным метеорологическим данным наблюдений – сетевым метеостанциям КыргызГидромета (табл. 1) и АМС в ледниковых районах (табл. 6). Градиенты рассчитаны по среднесуточным данным или при их отсутствии по среднемесячным значениям (отмечены звездочкой в табл. 6). Как видно, по данным станций Кызыл-Суу (1770 м) и Тянь-Шань (3660 м), вертикальный градиент на протяжении всего года составляет $-0.6-0.8^{\circ}\text{C}/100$ м, причем абсолютное значение градиента зимой даже оказывается выше, чем в теплый период. Еще более высокие по абсолютной величине значения градиентов были получены и по станциям Кызыл-Суу (1770 м) и Чон-Кызыл-Суу (2555 м): $-0.7-0.9^{\circ}\text{C}/100$ м в холодный период и $-0.9-1.0^{\circ}\text{C}/100$ м – в теплый период. Результаты наших расчетов в целом согласуются с данными из (Сатылканов, 2016), в которой, показано, что максимум вертикального градиента температуры воздуха наблюдается летом и составляет около $-0.72^{\circ}\text{C}/100$ м, а в зимнее время часто наблюдаются инверсии температуры воздуха, особенно в отрицательных формах рельефа. В то же время на побережье озера Иссык-Куль зимние инверсии не наблюдаются.

Более «характерный» годовой ход вертикальных градиентов температуры воздуха получен при анализе данных МС Кызыл-Суу – АМС Карабаткак (морена) и МС Чон-Кызыл-Суу – АМС Карабаткак (морена): в холодное время года градиенты составляют $0.3-0.6^{\circ}\text{C}/100$ м, а в теплое – $-0.6-0.8^{\circ}\text{C}/100$ м. По данным, полученным с использованием АМС непосредственно на ледниках Карабаткак и Сары-Топ (табл. 6), инверсии в холодный период проявляются сильнее – по данным Чон-Кызыл-Суу – л. Карабаткак градиенты в зимние месяцы составили около $-0.1-0.2^{\circ}\text{C}/100$ м (необходимо, разумеется, при этом принять во внимание малость выборки данных в данном случае – 3 года (2017-2019) среднемесячных значений). По более длинному ряду среднесуточных значений на МС Тянь-Шань и АМС на леднике Сары-Топ за 2015-2019 гг. инверсии отчетливо проявились в холодное время года: в январе, феврале и декабре градиенты и вовсе в среднем за месяц оказались положительными и составили $+0.4-0.5^{\circ}\text{C}/100$ м.

В результате для регионализации данных CORDEX для всего рассматриваемого региона были использованы среднемесячные значения температурного градиента, рассчитанные, по данным МС Кызыл-Суу – АМС Карабаткак (морена), которые отражают в целом годовой ход (с учетом зимних инверсий). Для более подробной регионализации по отдельным районам более мелкого

масштаба (например, конкретных ледников), необходимо учитывать особенности рельефа и влияние ледниковой поверхности, для чего использовать данные АМС на ледниках.

Таблица 6. Вертикальные градиенты температуры воздуха в регионе Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня, °C/100 м, рассчитанные, по данным наблюдений на сетевых МС и АМС (см. табл. 1)

Table 6. Surface air temperature vertical gradients in the Central and the Inner Tian-Shan, calculated from observations at the regular and automatic meteorological stations (see Table 1)

Станции	Период	Месяцы											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кызыл-Суу (1770 м) – Тянь-Шань (3660 м)	2011-2020	-0.79	-0.71	-0.70	-0.65	-0.67	-0.66	-0.66	-0.64	-0.66	-0.65	-0.69	-0.77
Кызыл-Суу (1770 м) – Чон-Кызыл-Суу (2555 м)	2011-2019	-0.88	-0.73	-0.75	-0.83	-0.87	-1.0	-1.0	-0.95	-0.95	-0.83	-0.78	-0.79
Кызыл-Суу (1170 м) – Карабаткак (морена, 3450 м)	2018-2020	-0.58	-0.45	-0.59	-0.61	-0.75	-0.78	-0.78	-0.75	-0.67	-0.65	-0.64	-0.62
Кызыл-Суу (1770 м) – Карабаткак (лед-ник, 3420 м)	2017-2020	-0.51	-0.43	-0.57	-0.61	-0.67	-0.73	-0.80	-0.68	-0.65	-0.58	-0.52	-0.49
Тянь-Шань (3660 м) – Сары-Тор (лед-ник, 4080 м)	2015-2019	0.48	0.39	-0.06	-0.47	-0.80	-0.73	-0.90	-0.89	-0.64	-0.53	-0.01	0.49
Чон-Кызыл-Суу (2555 м) – Карабаткак (лед-ник, 3420 м)*	2017-2019	-0.12	-0.19	-0.33	-0.35	-0.45	-0.50	-0.70	-0.65	-0.34	-0.32	-0.24	-0.15
Чон-Кызыл-Суу (2555 м) – Карабаткак (морена, 3450 м)*	2018-2019	-0.28	-0.49	-0.48	-0.26	-0.66	-0.62	-0.57	-0.58	-0.43	-0.39	-0.62	-0.40

*Значения рассчитаны по среднемесячным данным

Регионализация осадков в горных районах сопряжена с определенными сложностями: как известно, эта характеристика сильно изменчива в пространстве, так как она существенно зависит от особенностей рельефа и характеристик атмосферы в конкретном месте. Подробный обзор различных методов расчета орографической составляющей осадков представлен в работах (Barry, 2008; Торопов и др., 2022). Их условно можно разделить на 4 группы: физико-статистические методы, основанные на регрессионных связях осадков с метеорологическими (например, со снежным покровом (Черкасов, 2004; Муравьев, 1985)) и топографическими параметрами (Daly et al., 1994; Ranhao et al., 2008); аналитический метод, основанный на решении упрощенных уравнений динамики атмосферы; численный подход с применением полных мезомасштабных моделей атмосферы или упрощенных численных моделей (например, Smith et al., 2004); модели наветренного склона, в основе которой лежит

расчет скорости конденсации воздуха, поднимающегося вдоль горного склона (Торопов и др., 2022). В последней работе как раз реализован и успешно применен такой подход для расчета орографических осадков на Эльбрусе. В основном все эти подходы (кроме разве только физико-статистического) требуют большого количества входных метеорологических данных с высоким пространственным разрешением как по вертикали, так и по горизонтали. В данной работе в силу крайней ограниченности исходных данных для расчета высотного распределения осадков нами был использован упрощенный линейный подход – использование плевнометрических градиентов. Очевидно, что простая линейная зависимость количества осадков от высоты для обширного высокогорного района (в нашем случае диапазон высот составляет от 500 м до 4300 м) является весьма грубым упрощением, где-то рост осадков происходит параболически (Dahri et al., 2016), где-то максимум находится на определенной высоте и далее осадки постепенно убывают (например, Zakir et al., 2016). Поэтому одной из задач для будущей работы будет использование одного (или нескольких) методов расчета орографической составляющей осадков отдельно для меньшего по площади региона (например, отдельно для Внутреннего Тянь-Шаня).

В итоге для коррекции были использованы сезонные вертикальные градиенты осадков, рассчитанные по паре МС Кызыл-Суу – Чон-Кызыл-Суу. Эти градиенты составили в холодное время года (октябрь-апрель) 0.3 мм/100м/месяц и в теплое время года (май-сентябрь) 5.4 мм/100м/месяц. Эти градиенты в среднем соответствуют данным, приведенным в монографии (Швер, 1976). В монографии Черкасова (Черкасов, 2004) отмечено, что максимум осадков для ледника Шумского в Казахстане достигается на уровне около 3650 м, и далее происходит их постепенное убывание, а в работе (Van Tricht et al., 2021) 4200-4400 м. В нашей работе мы приняли, что осадки возрастают до высоты 4000 м над у.м. (данные АМС на леднике Сары-Тор показывают большее количество осадков по сравнению с АМС на леднике Карабаткак). Далее, выше отметки 4000 м задано убывание осадков с высотой по степенной зависимости (Van Tricht et al., 2021):

$$P_z = P_{4000} - gradP \cdot (z - 4000)^{0.6} \quad (13)$$

Итоговые прогностические оценки изменений температуры воздуха и количества осадков

Прогностические аномалии, рассчитанные по скорректированным данным CORDEX, представлены на рис. 7-9. В соответствии со сценарием RCP2.6 величина положительной среднемесячной аномалии приземной температуры воздуха в среднем за летний период к концу XXI века не превышает 1.5°C, а по сценарию RCP8.5 достигает 5.5°C относительно исторического периода 1977-2005 гг. (рис. 7а). Если рассматривать аномалии отдельно по

десятилетиям, то по сценарию RCP2.6 вплоть до конца века положительная аномалия температуры сохраняется на уровне 1-1.5°C, а по сценарию RCP8.5 возрастает практически линейно с 1°C в 2021-2030 гг. до 5.5°C в 2091-2100 гг. (рис. 9а). В годовом ходе аномалий для Внутреннего Тянь-Шаня максимум прогнозируется в осенние и зимние месяцы, минимум – в апреле (рис. 8а).

Для осадков как холодного, так и теплого периодов по обоим сценариям прогнозируются практически одни и те же изменения – по сценарию RCP2.6 осадки в регионе Тянь-Шаня практически не меняются (рис. 7б-в, 8б, 9б-в) по сравнению с историческим периодом на протяжении всего XXI века. По сценарию RCP8.5 увеличение осадков составляет не более чем в 1.7 раза, в годовом ходе выделяются максимумы в весенние и зимние месяцы (рис. 8б).

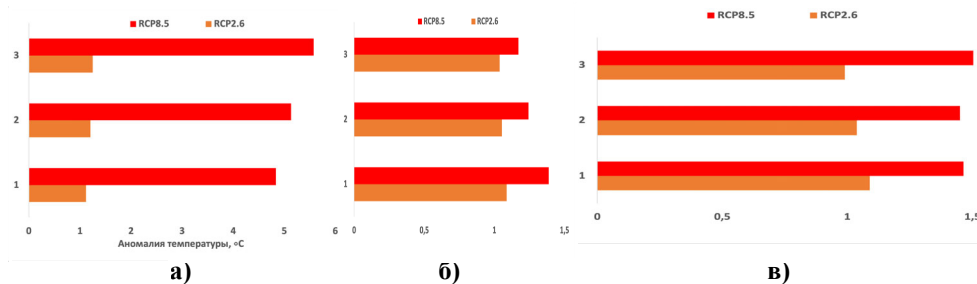


Рисунок 7. Средние по площади прогностические аномалии приземной температуры воздуха за теплый сезон, °С, (май-сентябрь) (а), количества осадков за холодный сезон (октябрь-апрель) (б) и теплый сезон (май-сентябрь) (в), относительные единицы, на период 2091-2100 г. для всего региона Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня (1), для точек с абсолютной высотой более 3000 м (2), для района Внутреннего Тянь-Шаня (41.67°-42.33° с.ш., 77.33°-78.83° в.д.)

Figure 7. Mean regional surface air temperature anomalies for the warm season (May-September, °C) (a), mean regional precipitation anomalies for cold season (October-April) (b) and warm season (May-September) (c), relative units, for the years 2091-2100: for the whole region of the Central and the Inner Tian-Shan (1), for the points above 3000 m a.s.l. (2), for the Inner Tian-Shan (41.67°-42.33° N, 77.33°-78.83° E)

Эти оценки согласуются с полученными в других работах для Центральной Азии. Так, например, в работе (Qiu et al., 2022), по модельным данным, по сценарию RCP4.5 на период 2031-2050 гг. относительно исторического периода 1986-2005 гг. ожидается потепление в регионе до 2.0°C и незначительный рост осадков (до 0.1 мм/день). К концу XXI века по сценарию RCP8.5 рост среднегодовой температуры в регионе по ансамблю моделей CMIP5 составляют 5.3-6.4°C (Didovets et al., 2021). Новые прогностические оценки динамики осадков по 15 моделям CMIP6 по четырем сценариям SSP для среднеазиатского региона (включая оз. Иссык-Куль и его окрестности) представлены в работе (Jiang et al., 2020). По этим данным, для 2081-2100 гг. рост среднегодового количества осадков в среднем по среднеазиатскому региону составит до 14.5% по самому жесткому сценарию SSP5-8.5 относительно периода 1995-2014 гг. Отмечается, что максимальный рост осадков будет наблюдаться в горах Тянь-Шаня. При этом в годовом ходе отмечается рост осадков весной и уменьшение летом. Сходные с полученными в нашей работе

оценки получены в работе (Yu et al., 2018) по четырем лучшим моделям CMIP5 для центральноазиатского региона: к концу XXI в. по сценарию RCP8.5 рост осадков (до 0.5 мм/сутки) будет происходить с ноября по май, и практически без изменений с июня по октябрь; аналогичный сезонный ход аномалий осадков по моделям CMIP5 проекта ISIMIP получены в работе (Didovets et al., 2021).

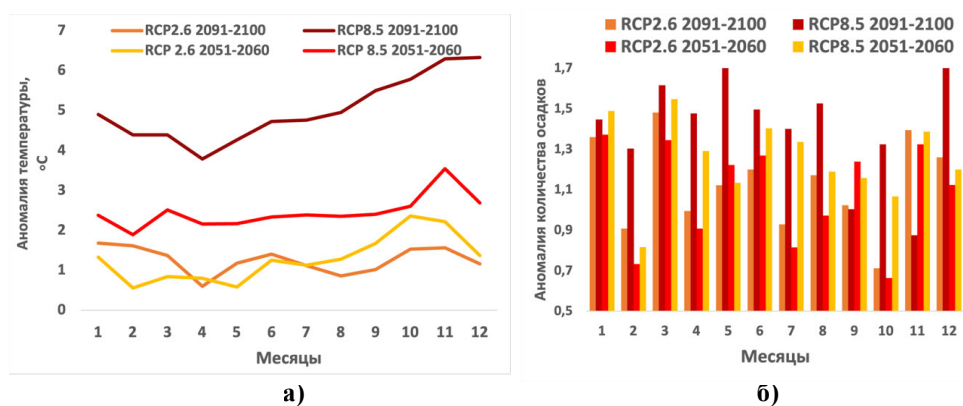


Рисунок 8. Годовой ход аномалий приземной температуры воздуха, °С, (а) и количества осадков, безразмерные единицы, (б) на период 2051-2060 и 2091-2100 гг. для всего региона Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня

Figure 8. Annual cycle of the surface air temperature anomalies, °C, (a) and precipitation anomalies, relative units, (b) for the periods 2051-2060 and 2091-2100 for the whole region of the Central and the Inner Tian-Shan

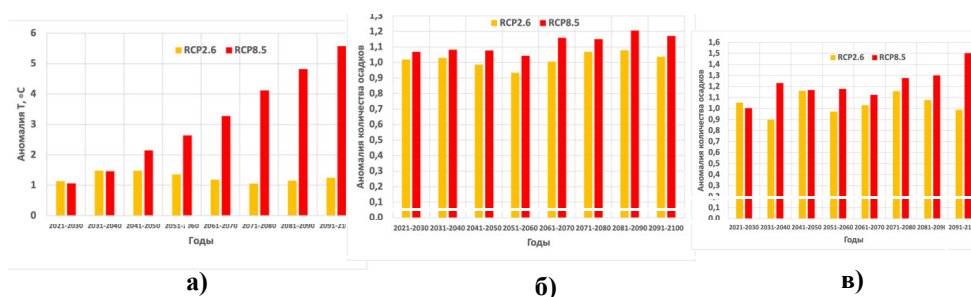


Рисунок 9. Аномалии приземной температуры воздуха, °С, за теплый период (май-сентябрь) (а), суммы атмосферных осадков за холодный период (октябрь-апрель) (б) и теплый период (относительные единицы, май-сентябрь) (в) за период 2021-2100 гг. по десятилетиям для Внутреннего Тянь-Шаня (41.67°- 42.33° с.ш., 77.33°-78.83° в.д.)

Figure 9. Surface air temperature anomalies for warm season (May-September, °C) (a), precipitation anomalies for the cold season (October-April) (b) and for the warm season (May-September) (c), relative units, for the decades 2021-2100 for the Inner Tian-Shan (41.67°-42.33° N, 77.33°-78.83° E)

Заключение

В статье были исследованы долгосрочные климатические проекции на регионы Внутреннего и Центрального Тянь-Шаня. Ожидаемые изменения климата неизбежно скажутся на состоянии горного оледенения – основного

источника пресной воды и стабилизирующего фактора для водных ресурсов на обширной территории с быстрорастущим населением и развивающейся экономикой.

Современные региональные климатические проекции строятся на основе результатов глобального климатического моделирования на МОЦАО, которые в дальнейшем подвергаются процедуре даунскейлинга с использованием РКМ, в результате чего получаются прогностические климатические поля с высоким пространственным и временным разрешением. Полученные поля, как правило, содержат разного рода систематические ошибки и для практического использования нуждаются в процедуре коррекции. В настоящей работе рассмотрены некоторые наиболее распространенные процедуры коррекции и оценена их применимость к результатам проекта мезомасштабного климатического моделирования CORDEX, в рамках которого были построены климатические проекции на нескольких связках МОЦАО-РКМ для различных регионов мира.

Нами было показано, что данные CORDEX требуют значительной коррекции, особенно данные о количестве осадков, которые оказываются завышенными в некоторых районах в несколько раз. Скорректированные модельные поля были подвергнуты дальнейшей статистической регионализации с использованием данных наблюдений до более высокого, чем в РКМ пространственного разрешения. В результате были получены прогностические поля температуры воздуха и количества осадков с пространственным разрешением 1 км и разрешением по времени 1 сутки за каждый год с 1977 по 2100, а также средние многолетние за исторический период 1977-2005 гг. и по прогностическим десятилетиям с 2006 по 2100 гг. Указанные данные доступны по запросу.

Заметим, что полученные в данной работе климатические поля могут быть использованы для гидрологического и гляциологического моделирования только лишь в качестве входных параметров или граничных условий. Т.е. следует учитывать региональные микроклиматические эффекты (которые не были учтены при подготовке этих данных) для конкретного ледника или группы ледников уже непосредственно при моделировании – температурный скачок при переходе на поверхность ледника, особенности рельефа при использовании полей осадков. Кроме того, в данной работе были рассмотрены только 2 основных климатических параметра – температура воздуха и осадки, а для оценки поверхностного баланса массы горных ледников важно также учитывать радиационный баланс (и его прогностические аномалии для будущих проекций) и турбулентные потоки тепла. Это – задачи для отдельной работы.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта РФФИ 20-05-00681 «Эволюция оледенения Внутреннего Тянь-Шаня в условиях климатических изменений и техногенного воздей-

ствия». Авторы выражают благодарность за предоставленные сотрудниками КыргызГидромета данные сетевых метеостанций Кыргызской Республики. Работа О.О. Рыбака получила поддержку в рамках темы № FMWZ-2022-0001 Государственного задания ИВП РАН.

Список литературы

Баетов, Б.И., Архангельская, А.В. (2015) Изменение водности рек и ее вызовы гидроэнергетической безопасности, *Вестник КРСУ*, т. 15, № 1, с. 140-143.

Володин, Е.М., Галин, В.Я., Грицун, А.С., Гусев, А.В., Дианский, Н.А., Дымников, В.П., Ибраев, Р.А., Калмыков, В.В., Кострыкин, С.В., Кулямин, Д.В., Лыкосов, В.Н., Мортиков, Е.В., Рыбак, О.О., Толстых, М.А., Фадеев, Р.Ю., Чернов, И.А., Шашкин, В.В., Яковлев, Н.Г. (2016) *Математическое моделирование Земной системы*, под ред. Яковлева Н.Г., М., МАКС Пресс, 328 с.

Гандин, Л.С., Каган, Р.Л. (1976) *Статистические методы интерпретации метеорологических данных*, Л., Гидрометеиздат, 360 с.

Муравьев, Я.Д. (1985) Снежный покров горных районов Камчатки, *Вопросы географии Камчатки*, № 9, с. 30-40.

Поповнин, В.В., Губанов, А.С., Сатылканов, Р.А., Эрменбаев, Б.О. (2021) Реконструкция баланса массы ледника Сары-Тор по метеорологическим данным, *Лёд и Снег*, т. 61, № 1, с. 58-74.

Постникова, Т.Н., Рыбак, О.О. (2021) Глобальные гляциологические модели: новый этап в развитии методов прогнозирования горного оледенения. Часть 1. Общий подход и архитектура моделей, *Лед и Снег*, т. 61, № 4, с. 620-636.

Постникова, Т.Н., Рыбак, О.О. (2022) Глобальные гляциологические модели: новый этап в развитии методов прогнозирования горного оледенения. Часть 2. Постановка экспериментов и практические приложения, *Лед и Снег*, т. 62, № 2, с. 287-304.

Сатылканов, Р.А. (2016) Современная динамика основных параметров климата Иссык-Кульской котловины, *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана*, № 9, с. 23-34.

Черкасов, П.А. (2004) *Расчет составляющих водно-ледового баланса внутриматериковой ледниковой системы*, Алматы, Каганат, 334 с.

Швер, Ц.А. (1976) *Атмосферные осадки на территории СССР*, Ленинград, Гидрометеиздат, 302 с.

Aizen V.B., Aizen E.M. and Melack J.M. (1995) Climate, snow cover, glaciers, and runoff in the Tian Shan, Central Asia. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 31, pp. 1113-1129.

Aizen, V., Kuzmichenok, V., Surazakov, A., Aizen, E. (2006) Glacier changes in the central and northern Tien Shan during the last 140 years based on surface and remote-sensing data, *Annals of Glaciology*, vol. 43, pp. 202-213.

ALOS DEM: Japan Aerospace Exploration Agency (2021) ALOS World 3D 30 meter DEM. V3.2, <https://doi.org/10.5069/G94M92HB>.

Barry, R. (2008) *Mountain weather and climate*, 3rded., Cambridge, Cambridge University Press, 497 p.

Bernauer, T., Siegfried, T. (2012) Climate change and international water conflict in Central Asia, *Journal of Piece Research*, vol. 49, pp. 227-239.

Christensen, J.H., Boberg, F., Christensen, O.B., Lucas-Picher, P. (2008) On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation, *Geophysical Research Letter*, vol. 35, L20-709.

CORDEX: Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment, available at: <https://cordex.org/>.

Dahri, Z.H., Ludwig, F., Moors, E., Ahmad, B., Khan, A., Kabat, P. (2016) An appraisal of precipitation distribution in the high-altitude catchments of the Indus basin, *Science of The Total Environment*, vol. 548-549, pp. 289-306, ISSN 0048-9697.

Daly, C., Neilson, R.P., Phillips, D.L. (1994) A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 33, pp. 140-158.

Didovets, I., Lobanova, A., Krysanova, V., Menz, C., Babagalieva, Z., Nurbatsina, A., Gavrilenko, N., Khamidov, V., Umirbekov, A., Qodirov, S., Muhyew, D., Hattermann, D.F. (2021) Central Asian rivers under climate change: Impacts assessment in eight representative catchments, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 34, 100779, ISSN 2214-5818.

Hock, R., Bliss, A., Marzeion, B., Giesen, R., Hirabayashi, Y., Huss, M., Radic, V., Slangen, A. (2019) GlacierMIP – A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections, *Journal of Glaciology*, vol. 65(251), pp. 453-467.

Holthuijzen, M., Beckage, B., Clemins, P.J., Higdon, D., Winter, J.M. (2022) Robust bias-correction of precipitation extremes using a novel hybrid empirical quantile-mapping method, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 149, pp. 863-882.

Enayati, M., Bozorg-Haddad, O., Bazrafshan, J., Hejabi, S., Chu, X. (2021) Bias correction capabilities of quantile mapping methods for rainfall and temperature variables, *Journal of Water and Climate Change*, vol. 12, no. 2, pp. 401-419.

Fang, G.H., Yang, J., Chen, Y.N., Zammit, C. (2015) Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 19, pp. 2547-2559.

Fowler, H., Blenkinsop, S., Tebaldi C. (2007) Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling, *International Journal of Climatology*, vol. 27, pp. 1547-1578.

Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussailant, I., Brun, F., Kääb, A. (2021) Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century, *Nature*, vol. 592, pp. 726-731.

Ibatullin, S. (2009) *The impact of climate change on water resources in Central Asia. Sector report no. 6*, in S. Ibatullin, V. Yasinsky, A. Mironenkov, Almaty, Rep. Kazakhstan, Eurasian Development Bank, 43 p.

Ji, X., Li, Y., Luo, X., He, D., Guo, R., Wang, J., Bai, Y., Yue, C., Liu, C. (2020) Evaluation of bias correction methods for APHRODITE data to improve hydrologic simulation in a large Himalayan basin, *Atmospheric Research*, vol. 242, 104964, ISSN 0169-8095.

Jiang, J., Zhou, T., Chen, X., Zhang, L. (2020) Future changes in precipitation over Central Asia based on CMIP6 projections, *Environmental Research Letters*, vol. 15, no. 5, 054009.

Luo, M., Liu, T., Meng, F., Duan, Y., Frankl, A., Bao, A., Maeyer, Ph. (2018) Comparing Bias Correction Methods Used in Downscaling Precipitation and Temperature from Regional Climate Models: A Case Study from the Kaidu River Basin in Western China, *Water*, vol. 10, 1046.

Maraun, D. (2016) Bias Correcting Climate Change Simulations – a Critical Review, *Current Climate Change Reports*, vol. 2, pp. 211-220.

Mendez, M., Maathuis, B., Hein-Griggs, D., Alvarado-Gamboa, L.-F. (2020) Performance Evaluation of Bias Correction Methods for Climate Change Monthly Precipitation Projections over Costa Rica, *Water*, vol. 12, p. 482.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles, *J. Hydrology*, vol. 10, pp. 282-290

Qiu, Y., Feng, J., Yan, Z., Wang, J. (2022) HCPD-CA: high-resolution climate projection dataset in central Asia, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 14, pp. 2195-2208, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-14-2195-2022>.

Ranhao, S., Baiping, Z., Jing, T. (2008) A multivariate regression model for predicting precipitation in the Daqing Mountains, *Mountain Research and Development*, vol. 28, no. 3/4, pp. 318-325.

Schmidli, J., Frei, C., Vidale, P.L. (2006) Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods, *International Journal of Climatology*, vol. 26, no. 5, pp. 679-685.

Shahgedanova, M., Afzal, M., Hagg, W., Kapitsa, V., Kasatkin, N., Mayr, E., Rybak, O., Saidaliyeva, Z., Severskiy, I., Usmanova, Z., Wade, A., Yaitskaya, N., Zhumabayev, D. (2020) Emptying Water Towers? Impacts of Future Climate and Glacier Change on River Discharge in the Northern Tien Shan, Central Asia, *Water*, vol. 12, p. 627.

Siegfried, T., Bernauer, T., Guinnet, R., Sellars, S., Robertson, A.W., Mankin, J., Bauer-Gottwein, P., Yakovlev, A. (2012) Will climate change exacerbate water stress in Central Asia? *Climatic Change*, vol. 112, pp. 881-899.

Sorg, A., Bolch, T., Stoffel, M., Solomina, O., Beniston, M. (2012) Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia), *Nature Climate Change*, vol. 2, pp. 725-731.

Switanek, B.M., Troch, A.P., Castro, C.L., Leuprecht, A., Chang, H.-I., Mukherjee, R., Demaria, E.M.C. (2017) Scaled distribution mapping: A bias correction method that preserves raw climate model projected changes, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, no. 6, pp. 2649-2666.

Terink, W., Hurkmans, R.T.W.L., Torfs, P.J.J.F., Uijlenhoet, R. (2010) Evaluation of a bias correction method applied to downscaled precipitation and temperature reanalysis data for the Rhine basin, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 14, pp. 687-703, available at: <https://doi.org/10.5194/hess-14-687-2010>.

Themeßl, M.J., Gobiet, A., Heinrich, G. (2012) Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal, *Climatic Change*, vol. 112, pp. 449-468.

Top, S., Kotova, L., De Cruz, L., Aniskevich, S., Bobylev, L., De Troch, R., Gnatiuk, N., Gobin, A., Hamdi, R., Kriegsmann, A., Remedio, A.R., Sakalli, A., Vyver, H.V.D., Schaeybroeck, B.V., Zandersons, V., De Maeyer, Ph., Termonia, P., Caluwaerts, S. (2021) Evaluation of regional climate models ALARO-0 and REMO2015 at 0.22° resolution over the CORDEX Central Asia domain, *Geosci. Model Dev.*, vol. 14, pp. 1267-1293.

Wilks, D.S., Wilby, R.L. (1999) The weather generation game: a rereview of stochastic weather models, *Progr. Phys. Geography*, vol. 23, pp. 329-357.

Van Tricht, L., Paice, C.M., Rybak, O., Satylkanov, R., Popovnin, V., Solomina, O., Huybrechts, P. (2021) Reconstruction of the Historical (1750-2020) Mass Balance of Bordu, Kara-Batkak and Sary-Tor Glaciers in the Inner Tien Shan, Kyrgyzstan, *Front. Earth Sci.*, vol. 9, 734802, doi: 10.3389/feart.2021.734802.

Velasquez, P., Messmer, M., Raible, C.C. (2020) A new bias-correction method for precipitation over complex terrain suitable for different climate states: a case study using WRF (version 3.8.1), *Geoscientific Model Development*, vol. 13, pp. 5007-5027.

Xie, Y., Dong, G., Wang, Y., Fan, D., Tian, Z., Tan, J., Wu, W., Zhang, M. (2021) High-Resolution Ensemble Projection of Mean and Extreme Precipitation Over China Based on Multiple Bias-Corrected RCM Simulations, *Frontiers in Earth Science*, vol. 9, 771384.

Yu, X., Zhao, Y., Ma, X., Yao, J., Li, H. (2018) Projected changes in the annual cycle of precipitation over central Asia by CMIP5 models, *Int. J. Climatology*, vol. 38, p. 1-16.

Zekollari, H., Huss, M., Farinotti, D. (2019) Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble, *The Cryosphere*, vol. 13, pp. 1125-1146.

References

Baetov B.I., Arhangel'skaya A.V. 2015. Izmenenie vodnosti rek i ee vyzovy gidroenergeticheskoy bezopasnosti [Change in the water content of rivers and its challenges to hydropower security], *Vestnik KRSU*, vol. 15, no. 1, pp. 140-143.

Cherkasov, P.A. (2004) *Raschet sostavlyayushchikh vodno-ledovogo balansa vnutrikontinental'noy lednikovoĭ sistemy* [Calculation of the components of the water-ice balance of the intracontinental glacial system], Kaganat, Almaty, Kazakhstan, 334 p.

Volodin, E.M., Galin, V.Ya., Gritsun, A.S., Gusev, A.V., Diansky, N.A., Dymnikov, V.P., Ibraev, R.A., Kalmykov, V.V., Kostrykin, S.V., Kulyamin, D.V., Lykosov, V.N., Mortikov, E.V., Rybak, O.O., Tolstykh, M.A., Fadeev, R.Yu., Chernov, I.A., Shashkin, V.V., Yakovlev, N.G. (2016) *Matematicheskoe modelirovanie Zemnoj sistemy* [Mathematical modeling of the Earth system], in Yakovleva N.G. (ed.), MAKS Press, Moscow, Russia, 328 p.

Gandin, L.S., Kagan, R.L. (1976) *Statisticheskie metody interpretacii meteorologicheskikh dannyh* [Statistical methods of interpretation of meteorological data], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 360 p.

Muravyov, Ya.D. (1985) Snezhnyy pokrov gornyx rayonov Kamchatki [Snow cover of Kamchatka mountain regions], *Voprosy geografii Kamchatki*, no. 9, pp. 30-40.

Postnikova, T.N., Rybak, O.O. (2021) Global'nye glyaciologicheskie modeli: novyj etap v razvitii metodov prognozirovaniya gornogo oledeneniya. Chast' 1. Obshchij podhod i arhitektura modelej [Global glaciological models: a new stage in the development of mountain glaciation prediction methods. Part 1. General Approach and Model Architecture], *Lyod i Sneg*, vol. 61, no. 4, pp. 620-636.

Postnikova, T.N., Rybak, O.O. (2022) Global'nye glyaciologicheskie modeli: novyj etap v razvitii metodov prognozirovaniya gornogo oledeneniya. Chast' 2. Postanovka eksperimentov i prakticheskie prilozheniya [Global glaciological models: a new stage in the development of mountain glaciation prediction methods. Part 2. Setting up experiments and practical applications,], *Lyod i Sneg*, vol. 62, no. 2, pp. 287-304.

Popovnin, V.V., Gubanov, A.S., Satylkanov, R.A., Ermenbaev, B.O. (2021) Rekonstrukciya balansa massy lednika Sary-Tor po meteorologicheskim dannym [Reconstruction of the mass balance of the Sary-Tor Glacier from meteorological data], *Lyod i Sneg*, vol. 61, no. 1, pp. 58-74.

Satylkanov, R.A. (2016) Sovremennaya dinamika osnovnyh parametrov klimata Issyk-Kul'skoj kotloviny [Modern dynamics of the main climate

parameters of the Issyk-Kul basin], *Nauka, novye tekhnologii i innovacii Kyrgyzstana*, no. 9, pp. 23-34.

Schwer, Ts.A. (1976) *Atmosfernye osadki na territorii SSSR* [Atmospheric precipitation on the territory of the USSR], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 302 p.

Aizen, V., Kuzmichenok, V., Surazakov, A., Aizen, E. (2006) Glacier changes in the central and northern Tien Shan during the last 140 years based on surface and remote-sensing data, *Annals of Glaciology*, vol. 43, pp. 202-213.

ALOS DEM: Japan Aerospace Exploration Agency (2021) ALOS World 3D 30 meter DEM. V3.2, <https://doi.org/10.5069/G94M92HB>.

Barry, R. (2008) *Mountain weather and climate*, 3rded., Cambridge, Cambridge University Press, 497 p.

Bernauer, T., Siegfried, T. (2012) Climate change and international water conflict in Central Asia, *Journal of Piece Research*, vol. 49, pp. 227-239.

Christensen, J.H., Boberg, F., Christensen, O.B., Lucas-Picher, P. (2008) On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation, *Geophysical Research Letter*, vol. 35, L20-709.

CORDEX: Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment, available at: <https://cordex.org/>.

Dahri, Z.H., Ludwig, F., Moors, E., Ahmad, B., Khan, A., Kabat, P. (2016) An appraisal of precipitation distribution in the high-altitude catchments of the Indus basin, *Science of The Total Environment*, vol. 548-549, pp. 289-306, ISSN 0048-9697.

Daly, C., Neilson, R.P., Phillips, D.L. (1994) A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 33, pp. 140-158.

Didovets, I., Lobanova, A., Krysanova, V., Menz, C., Babagalieva, Z., Nurbatsina, A., Gavrilenko, N., Khamidov, V., Umirbekov, A., Qodirov, S., Muhyyew, D., Hattermann, D.F. (2021) Central Asian rivers under climate change: Impacts assessment in eight representative catchments, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 34, 100779, ISSN 2214-5818.

Hock, R., Bliss, A., Marzeion, B., Giesen, R., Hirabayashi, Y., Huss, M., Radic, V., Slangen, A. (2019) GlacierMIP – A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections, *Journal of Glaciology*, vol. 65 (251), pp. 453-467.

Holthuijzen, M., Beckage, B., Clemins, P.J., Higdon, D., Winter, J.M. (2022) Robust bias-correction of precipitation extremes using a novel hybrid empirical quantile-mapping method, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 149, pp. 863-882.

Enayati, M., Bozorg-Haddad, O., Bazrafshan, J., Hejabi, S., Chu, X. (2021) Bias correction capabilities of quantile mapping methods for rainfall and

temperature variables, *Journal of Water and Climate Change*, vol. 12, no. 2, pp. 401-419.

Fang, G.H., Yang, J., Chen, Y.N., Zammit, C. (2015) Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 19, pp. 2547-2559.

Fowler, H., Blenkinsop, S., Tebaldi C. (2007) Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling, *International Journal of Climatology*, vol. 27, pp. 1547-1578.

Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussaillant, I., Brun, F., Kääb, A. (2021) Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century, *Nature*, vol. 592, pp. 726-731.

Ibatullin, S. (2009) *The impact of climate change on water resources in Central Asia. Sector report no. 6*, in S. Ibatullin, V. Yasinsky, A. Mironenkov, Almaty, Rep. Kazakhstan, Eurasian Development Bank, 43 p.

Ji, X., Li, Y., Luo, X., He, D., Guo, R., Wang, J., Bai, Y., Yue, C., Liu, C. (2020) Evaluation of bias correction methods for APHRODITE data to improve hydrologic simulation in a large Himalayan basin, *Atmospheric Research*, vol. 242, 104964, ISSN 0169-8095.

Jiang, J., Zhou, T., Chen, X., Zhang, L. (2020) Future changes in precipitation over Central Asia based on CMIP6 projections, *Environmental Research Letters*, vol. 15, no. 5, 054009.

Luo, M., Liu, T., Meng, F., Duan, Y., Frankl, A., Bao, A., Maeyer, Ph. (2018) Comparing Bias Correction Methods Used in Downscaling Precipitation and Temperature from Regional Climate Models: A Case Study from the Kaidu River Basin in Western China, *Water*, vol. 10, 1046.

Maraun, D. (2016) Bias Correcting Climate Change Simulations – a Critical Review, *Current Climate Change Reports*, vol. 2, pp. 211-220.

Mendez, M., Maathuis, B., Hein-Griggs, D., Alvarado-Gamboa, L.-F. (2020) Performance Evaluation of Bias Correction Methods for Climate Change Monthly Precipitation Projections over Costa Rica, *Water*, vol. 12, p. 482.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles, *J. Hydrology*, vol. 10, pp. 282-290.

Qiu, Y., Feng, J., Yan, Z., Wang, J. (2022) HCPD-CA: high-resolution climate projection dataset in central Asia, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 14, pp. 2195-2208, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-14-2195-2022>.

Ranhao, S., Baiping, Z., Jing, T. (2008) A multivariate regression model for predicting precipitation in the Daqing Mountains, *Mountain Research and Development*, vol. 28, no. 3/4, pp. 318-325.

Schmidli, J., Frei, C., Vidale, P.L. (2006) Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods, *International Journal of Climatology*, vol. 26, no. 5, pp. 679-685.

Shahgedanova, M., Afzal, M., Hagg, W., Kapitsa, V., Kasatkin, N., Mayr, E., Rybak, O., Saidaliyeva, Z., Severskiy, I., Usmanova, Z., Wade, A., Yaitskaya, N., Zhumabayev, D. (2020) Emptying Water Towers? Impacts of Future Climate and Glacier Change on River Discharge in the Northern Tien Shan, Central Asia, *Water*, vol. 12, p. 627.

Siegfried, T., Bernauer, T., Guinnet, R., Sellars, S., Robertson, A.W., Mankin, J., Bauer-Gottwein, P., Yakovlev, A. (2012) Will climate change exacerbate water stress in Central Asia? *Climatic Change*, vol. 112, pp. 881-899.

Sorg, A., Bolch, T., Stoffel, M., Solomina, O., Beniston, M. (2012) Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia), *Nature Climate Change*, vol. 2, pp. 725-731.

Switanek, B.M., Troch, A.P., Castro, C.L., Leuprecht, A., Chang, H.-I., Mukherjee, R., Demaria, E.M.C. (2017) Scaled distribution mapping: A bias correction method that preserves raw climate model projected changes, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, no. 6, pp. 2649-2666.

Terink, W., Hurkmans, R.T.W.L., Torfs, P.J.J.F., Uijlenhoet, R. (2010) Evaluation of a bias correction method applied to downscaled precipitation and temperature reanalysis data for the Rhine basin, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 14, pp. 687-703, available at: <https://doi.org/10.5194/hess-14-687-2010>.

Themeßl, M.J., Gobiet, A., Heinrich, G. (2012) Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal, *Climatic Change*, vol. 112, pp. 449-468.

Top, S., Kotova, L., De Cruz, L., Aniskevich, S., Bobylev, L., De Troch, R., Gnatiuk, N., Gobin, A., Hamdi, R., Kriegsmann, A., Remedio, A.R., Sakalli, A., Vyver, H.V.D., Schaeybroeck, B.V., Zandersons, V., De Maeyer, Ph., Termonia, P., Caluwaerts, S. (2021) Evaluation of regional climate models ALARO-0 and REMO2015 at 0.22° resolution over the CORDEX Central Asia domain, *Geosci. Model Dev.*, vol. 14, pp. 1267-1293.

Wilks, D.S., Wilby, R.L. (1999) The weather generation game: a rereview of stochastic weather models, *Progr. Phys. Geography*, vol. 23, pp. 329-357.

Van Tricht, L., Paice, C.M., Rybak, O., Satylkanov, R., Popovnin, V., Solomina, O., Huybrechts, P. (2021) Reconstruction of the Historical (1750-2020) Mass Balance of Bordu, Kara-Batkak and Sary-Tor Glaciers in the Inner Tien Shan, Kyrgyzstan, *Front. Earth Sci.*, vol. 9, 734802, doi: 10.3389/feart.2021.734802.

Velasquez, P., Messmer, M., Raible, C.C. (2020) A new bias-correction method for precipitation over complex terrain suitable for different climate states: a case study using WRF (version 3.8.1), *Geoscientific Model Development*, vol. 13, pp. 5007-5027.

Xie, Y., Dong, G., Wang, Y., Fan, D., Tian, Z., Tan, J., Wu, W., Zhang, M. (2021) High-Resolution Ensemble Projection of Mean and Extreme Precipitation Over China Based on Multiple Bias-Corrected RCM Simulations, *Frontiers in Earth Science*, vol. 9, 771384.

Yu, X., Zhao, Y., Ma, X., Yao, J., Li, H. (2018) Projected changes in the annual cycle of precipitation over central Asia by CMIP5 models, *Int. J. Climatology*, vol. 38, p. 1-16.

Zekollari, H., Huss, M., Farinotti, D. (2019) Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble, *The Cryosphere*, vol. 13, pp. 1125-1146.

Статья поступила в редакцию (Received): 04.12.2022 г.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 07.05.2023 г.

Принята к публикации (Accepted): 20.05.2023 г.

Для цитирования / For citation:

Корнева, И.А., Рыбак, О.О., Сатылканов, Р.А. (2023) Климатические проекции для центрального и внутреннего Тянь-Шаня на основе данных CORDEX, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 2, с. 133-164, doi:10.21513/2410-8758-2023-2-133-164.

Korneva, I.A., Rybak, O.O., Satylkanov, R.A. (2023) Climate projections for Central and Inner Tian Shan based on CORDEX data, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 2, pp. 133-164, doi:10.21513/2410-8758-2023-2-133-164.

Перспективы декарбонизации цементной промышленности России

И.А. Башмаков

Центр энергоэффективности – XXI век,
Россия, 117418, г. Москва, ул. Новочеремушкинская, д. 61

Адрес для переписки: *bashmako@co.ru*

Реферат. В статье рассмотрены прогнозные оценки направлений декарбонизации российской цементной промышленности. Показано, что после 2000 г. пик выбросов парниковых газов пришелся на 2013 г. – 49 млн тCO₂, что на 20% ниже уровня 1990 г. К 2060 г. снижение выбросов ПГ в цементной промышленности России может составить 79% от уровня 1990 г. Превращение ее в углероднейтральную в 2060 г. возможно за счет увеличения масштабов применения технологии CCUS или доведения доли биомассы в топливном балансе до 80-90%. Однако, с учетом «эффекта губки» цементная промышленность России может стать углероднейтральной уже к 2040 г., а затем она становится нетто-стоком углерода.

Ключевые слова. Цементная промышленность, декарбонизация, прогнозы, парниковые газы, технологии.

Russian cement industry decarbonization perspectives

I.A. Bashmakov

Center for Energy Efficiency – XXI,
61, Novocheremushkinskaya str., 117418, Moscow, Russian Federation

Correspondence address: *bashmako@co.ru*

Abstract. The article considers possible directions of decarbonization of the Russian cement industry. It is shown that after 2000, the peak of greenhouse gas emissions occurred in 2013 at 49 million tCO₂, which is 20% below the 1990 level. By 2060, the reduction of GHG emissions in the Russian cement industry may reach 79% of the 1990 level. Its transformation into carbon neutral by 2060 is possible via increasing the scale of application of CCUS or bringing the share of biomass in the fuel balance up to 80-90%. However, taking into account the “sponge effect”, the cement industry in Russia may become carbon neutral even by 2040, and then it becomes a net sink (GHG) of carbon.

Keywords. Cement industry, decarbonization, projections, greenhouse gases, technologies.

Перспективы развития цементной промышленности в России до 2060 г.

Индекс работ в строительстве в большинстве стран и в России растет медленнее ВВП и медленнее индекса производства в обрабатывающей промышленности (ОЕСД, 2022). В России индекс работ в строительстве в 2021 г. был на 4% ниже уровня 2008 г. Во многих странах мира (например, в Японии, Бельгии, Ирландии, Греции) индекс работ в строительстве в 2021 г. был ниже даже уровней 1970-1995 гг. Таким образом, и российский опыт последних 13 лет, и опыт многих стран показывает, что рост индекса работ в строительстве может отставать от роста ВВП. Последствием наложенных на Россию санкций станет дальнейшее падение индекса работ в строительстве. В итоге, в нижней точке кризиса (2023 г.) по оценке автора он окажется на 17% ниже уровня 2021 г. и на 20% ниже уровня 2008 г. Санкционные ограничения на экспорт и импорт приведут к существенному снижению доходов как населения, так и бизнеса. Такое падение доходов наряду с высокими ставками процентов по кредиту и недоступностью западных кредитов значительно ограничит инвестиционную активность и приведет к глубокому падению объемов работ в строительстве (Bashmakov et al., 2022).

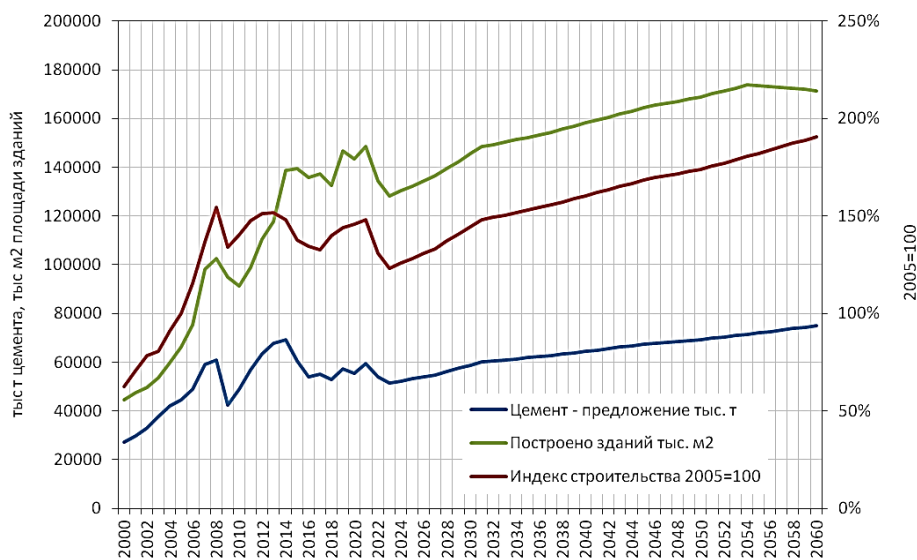
Как ожидается, на уровень 2021 г. индекс работ в строительстве выйдет не ранее 2031 г., а на уровень 2008 г. – не ранее 2036 г. Индекс работ в строительстве вырастет в 2021-2060 гг. только на 29%, или в среднем будет расти на 0.6% в год. Анализ показал, что Россия потеряет 10-11 лет экономического роста, а уровень ВВП 2021 г. вернется к 2031-2032 гг. К 2050 г. Россия потеряет около 50% от ранее ожидаемого потенциального роста ВВП. В 2060 г. ВВП России будет только на 21-44% выше, чем в 2021 г., а темпы роста ВВП не превысят 1.6% в 2040-2050 гг. и 1.3% в 2050-2060 гг. Неспособность обеспечить новые институциональные и социально-политические рамки для стимулирования экономического роста с «опорой на собственные силы» ограничит рост ВВП России в 2021-2060 гг. лишь уровнем 6-22% (Bashmakov et al., 2022).

Площадь построенных зданий, согласно данным Росстата, вышла на пик 148 млн м² в 2021 г. Она вернется к этому уровню только к 2031 г. В связи с падением доходов, удорожанием кредитов и ипотеки объемы построенных в 2022-2030 гг. зданий заметно снизятся. Затем – при благоприятных институциональных и экономических условиях – они начнут расти. В расчетах предполагается, что максимальный ввод жилых зданий на 1 чел. в год не превысит 1 м², а всех зданий – 1.3 м². Поэтому после выхода в 2050-е годы на этот уровень объемы строительства зданий достигают пика и начинают снижаться вслед за снижением численности населения. Обеспеченность площадью зданий к 2060 г. достигает 82.5 м²/чел. при нынешнем уровне в США 100 м²/чел., а в Европе – 64 м²/чел.

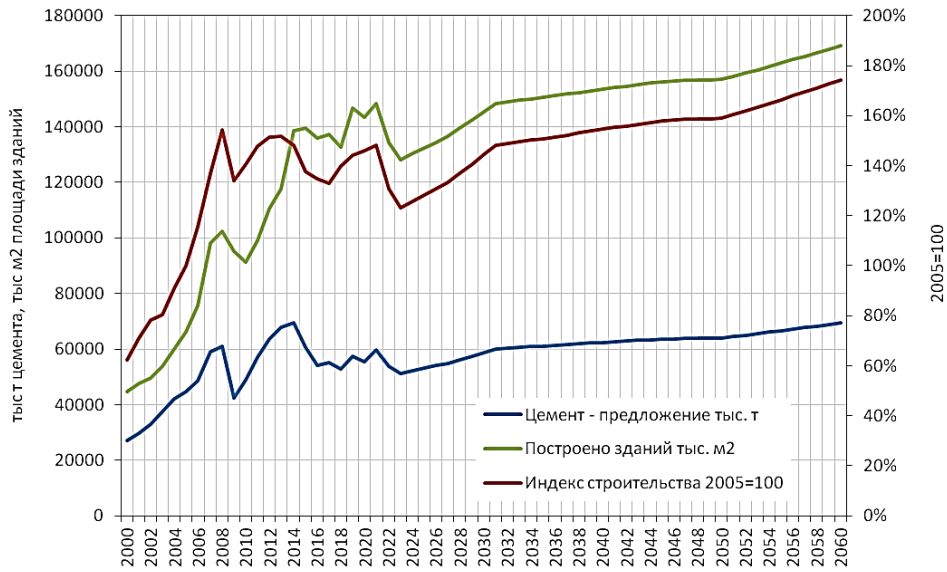
Потребление цемента сначала падает до 51 млн т к 2023 г., а затем растет, но не будет превышать 75 млн т к 2060 г. в сценарии «Возвращение в

мировую экономику». В сценарии «Опора на собственные силы» с умеренным прогрессом в повышении продуктивности экономики России потребление цемента выходит к 2060 г. на уровень немногим ниже 70 млн т. В расчете на душу населения оно повышается до 560 кг к 2060 г. в первом сценарии (рис. 1). Это заметно выше уровня, на котором, по оценке МЭА, ожидается конвергенция удельного потребления цемента в мире (485 кг/чел.), и на верхней границе удельного потребления цемента, соответствующего уровню ВВП на душу населения в диапазоне 40-45 тыс. долл. 2017 г. по ППС в год (см. рис. 2). В сценарии «Опора на собственные силы» удельное потребление цемента к 2060 г. растет до 500 кг/чел. Это ближе к значениям для стран, которые сегодня имеют ожидаемый для России на 2060 г. уровень ВВП на душу населения. Для такого уровня характерна стабилизация или снижение удельного расхода цемента на душу населения. Поэтому можно ожидать, что потребление цемента будет находиться в диапазоне 70-75 млн т вплоть до 2060 г., а с учетом возможного повышения эффективности использования бетона и цемента уровень потребления может быть и ниже. Это заметно меньше контрольных цифр принятой в 2020 г. «Сводной стратегии развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2024 года и на период до 2035 года» – 90 млн т на 2035 г.

Объемы производства цемента в России будут следовать за динамикой его потребления. Объемы импорта и экспорта цемента невелики. География внешней торговли цементом в основном охватывает страны, которые не вводили санкций. Кризис, в т.ч. из-за логистики, скажется и на внешней торговле цементом, но поскольку чистый импорт цемента в последние годы заметно не превышал 0.5 млн т, т.е. менее 1% от всего производства цемента, то его изменение мало скажется на динамике производства.



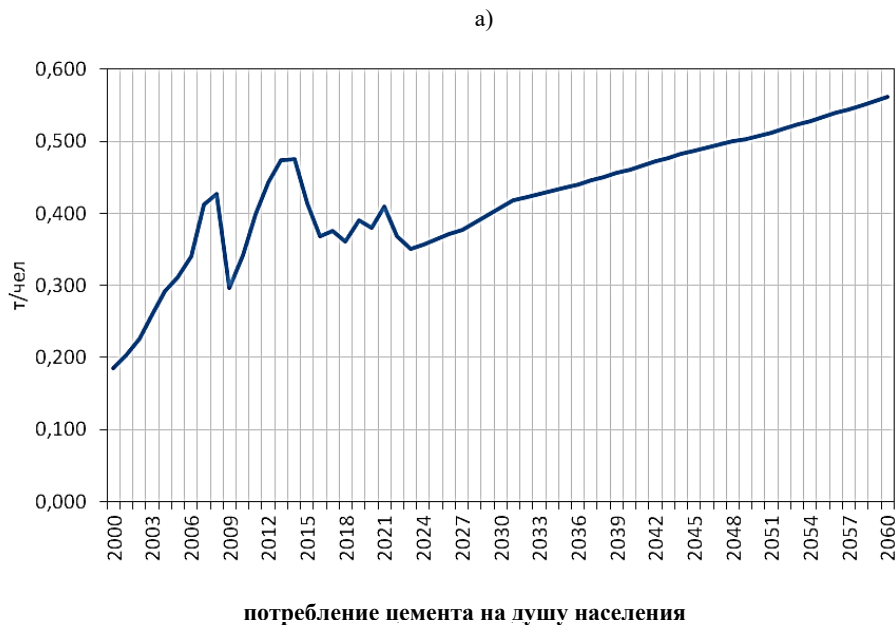
а) сценарий «Возвращение в мировую экономику» с динамичным развитием нефтегазового ВВП после 2031 г. на основе повышения производительности всех факторов производства»

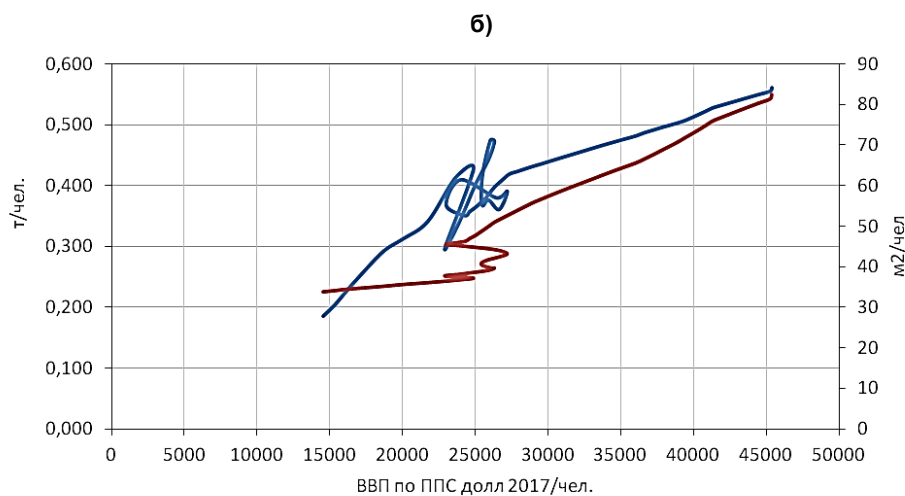


б) сценарий «Опора на собственные силы» с более медленным развитием нефтегазового ВВП»

Рисунок 1. Индекс работ в строительстве, площадь построенных зданий и потребление цемента в России в 2000-2060 гг. (оценки на базе: Bashmakov et al., 2022)

Figure 1. Index construction activity, flow space of constructed buildings and cement consumption in Russia in 2000-2060 (estimated based on: Bashmakov et al., 2022)





**потребление цемента на душу населения и обеспеченность площадью зданий
в зависимости от ВВП на душу населения**

Рисунок 2. Потребление цемента и обеспеченность площадью зданий на душу населения
(оценки автора)

Figure 2. Consumption of cement and provision of building space per capita (author's estimates)

Объемы производства цемента в России будут следовать за динамикой его потребления. Объемы импорта и экспорта цемента невелики. География внешней торговли цементом в основном охватывает страны, которые не вводили санкций. Кризис, в т.ч. из-за логистики, скажется и на внешней торговле цементом, но поскольку чистый импорт цемента в последние годы заметно не превышал 0.5 млн т, т.е. менее 1% от всего производства цемента, то его изменение мало скажется на динамике производства.

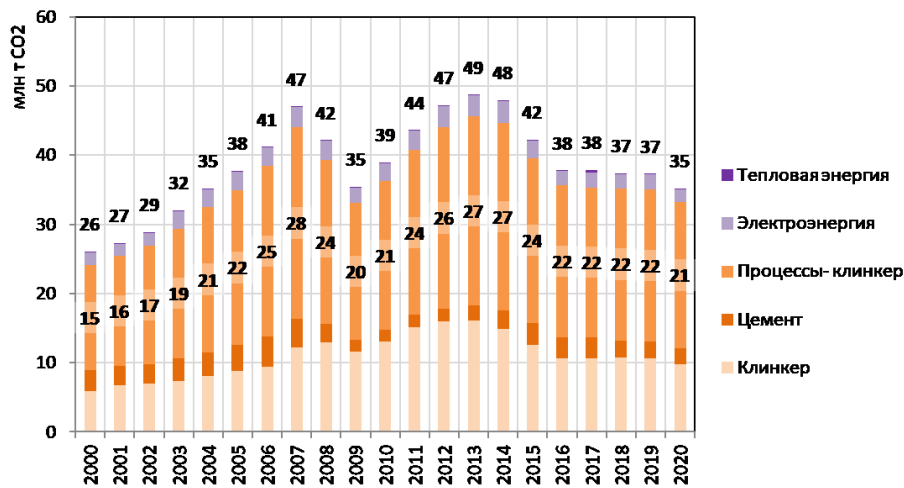
Объемы производства клинкера будут сокращаться: резко в 2022-2023 гг. (до 35 млн т) с последующим частичным восстановлением до 38 млн т к 2031 г. и затем со стабилизацией на уровне 36-38 млн т вплоть до 2060 г. В расчетах предполагается постепенное снижение доли клинкера в цементе (измеренное по данным статистики Росстата) с 72% в 2021 г. до 50% (лучшие сегодняшние практики) к 2053 г. с последующей стабилизацией на этом уровне до 2060 г.

Из-за кризиса процессы модернизации цементной промышленности могут заметно растянуться во времени. Оборудование для цементных заводов импортируется в основном из стран, которые ввели санкции. Альтернативы существуют в Китае и других странах. Их способность заменить поставщиков из развитых стран требует специального изучения.

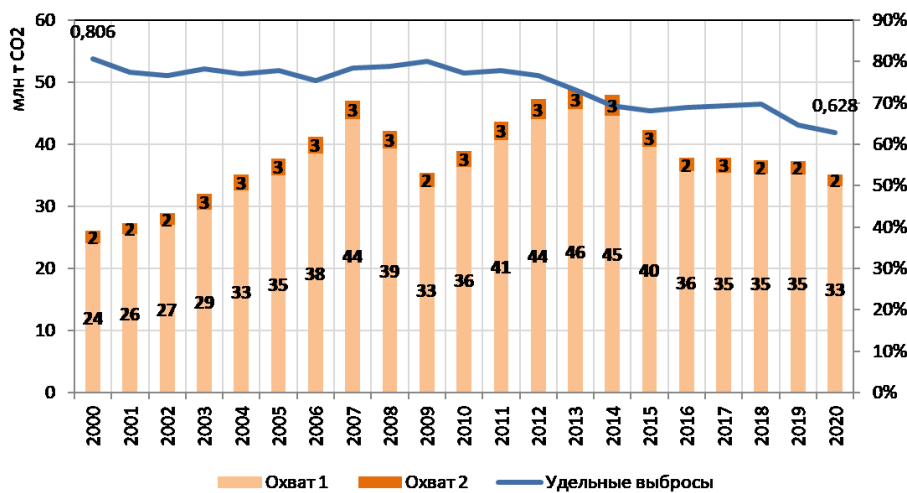
Ретроспективная динамика выбросов парниковых газов от цементной промышленности

По оценке автора выбросы ПГ от производства цемента в России по охватам 1+2 в 2019 г. составили 37 млн тСО₂, а в 2020 г. – 35 млн тСО₂ (рис.

3), или только 1.2% от всех выбросов мировой цементной промышленностью (Bashmakov et al., 2022). Выбросы от сжигания топлива при производстве цемента составили соответственно 13 и 12 млн тCO₂; от промышленных процессов – еще 22 и 21 млн тCO₂, а от используемой в отрасли электрической и тепловой энергии – еще 2 млн тCO₂. По данным национальной инвентаризации, выбросы от технологических процессов составили 20.3 млн тCO₂. (Национальный доклад, 2022). Используемый в ней уровень производства клинкера дан по форме «1-натура». Однако в форме «4-ТЭР» даются более высокие объемы производства клинкера.



а) выбросы по источникам



б) выбросы по охватам 1 и 2

Рисунок 3. Динамика выбросов ПГ от цементной промышленности России в 2000-2020 гг. (оценки автора по данным Росстата)

Figure 3. Dynamics of GHG emissions from the Russian cement industry in 2000-2020 (author's estimates based on Rosstat)

В среднем по России удельные выбросы при производстве 1 т цемента по охвату 1 в 2020 г. оценены равными 594 кгСО₂/т цемента, по охватам 1+2 – 628 кгСО₂/т цемента, по охвату 1 – 771 кгСО₂/т клинкера. Все эти значения ниже среднемировых показателей. Приведенные оценки получены как результат деления данных по суммарным выбросам СО₂ на объемы производства цемента и клинкера. В структуре выбросов ПГ при производстве цемента доминируют прямые выбросы (охват 1) – 94-95%, а в прямых выбросах доминируют технологические выбросы – 62-64%.

Снижение выбросов ПГ от российской цементной промышленности в 1990-2019 гг. можно оценить равным 43%. По данным национальной инвентаризации выбросы от технологических процессов в 1990 г. составили 34.6 млн тСО₂ (Национальный доклад, 2022). Выбросы от сжигания топлива с учетом его более высоких удельных расходов в 1990 г. и меньшей доли природного газа составляли около 43% суммарных выбросов, которые в этом случае можно оценить равными 61 млн тСО₂.

После 2000 г. пик выбросов – 49 млн тСО₂ – был достигнут в 2013 г. Динамика выбросов следовала за динамикой производства цемента с коррекцией на снижение удельных выбросов. По охватам 1+2 выбросы ПГ от производства цемента в 2000-2021 гг. выросли в 1.35 раза, а в 2000-2019 – в 1.43 раза (рост на 1.9% в год). Удельные выбросы в 2000-2020 гг. снизились на 22%, с 806 до 628 кгСО₂/т цемента. Это произошло за счет снижения клинкер-фактора и сокращения удельного расхода топлива из-за роста доли производства цемента сухим способом.

В России еще нет системы учета удельных выбросов парниковых газов по видам продукции (цемент, клинкер), и только в 2022 г. силами ЦЭНЭФ-ХХI для ЦЭПП была создана национальная система бенчмаркинга по удельным выбросам ПГ для цементных заводов – программный комплекс «Оценка углеродоемкости (бенчмаркинг) продукции цементной промышленности Российской Федерации». ЦЭПП только приступил к ее эксплуатации. Приведенные значения абсолютных и удельных выбросов парниковых газов для цементной промышленности России – это оценки автора.

Перспективная динамика выбросов парниковых газов от цементной промышленности¹⁾

В отличие от многих стран (Китай, Индия), в России с ее более возрастными мощностями по производству цемента есть существенный потенциал повышения энергоэффективности, реализация которого позволяет заметно снизить выбросы ПГ от процессов сжигания топлива. Постепенное прибли-

¹⁾Методика прогнозных расчетов и их основные результаты по всем секторам экономики показаны в (Bashmakov et al., 2022). Расчеты проведены на имитационной инженерно-экономической модели для промышленности INDEE-MOD, в которой выделен блок цементной промышленности.

жение удельных расходов энергии к уровням практического минимума (лучшим нынешним показателям для цементных заводов мира) и к характеристикам термодинамического минимума в районе 2045-2050 гг. позволяет существенно снизить потребность российской цементной промышленности в ископаемом топливе даже при росте уровня производства цемента к 2060 г. Этому также способствует рост доли прочих видов топлива, и в первую очередь, биомассы при производстве клинкера. По мере исчерпания потенциала экономии энергии снижение выбросов от сжигания топлива замедляется после 2045 г.

Снижение выбросов от технологических процессов ограничено. Оно происходит в основном за счет замены клинкера в цементах на менее углеродоемкие материалы (рис. 4 и 5). Отношение клинкер/цемент снижается до 50% к 2053 г. и затем стабилизируется на этом уровне до 2060 г. При росте производства цемента после 2030 г. это приводит к практической стабилизации выбросов от промышленных процессов вплоть до 2060 г.

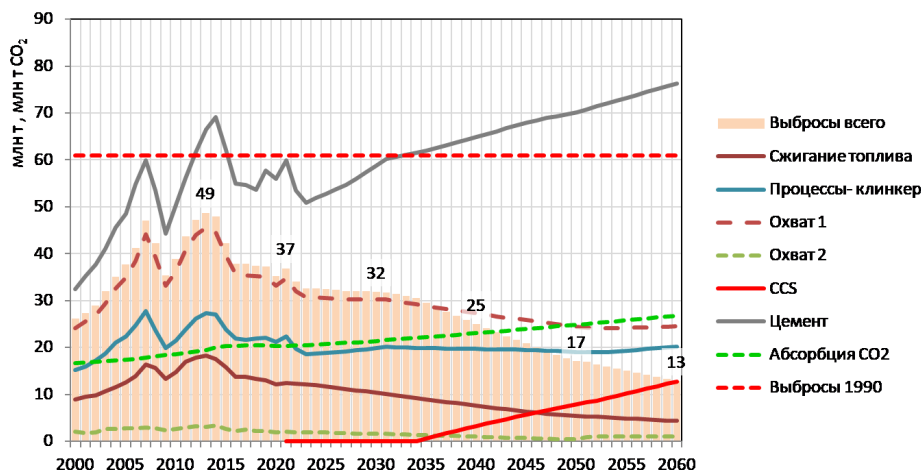


Рисунок 4. Динамика выбросов и стоков ПГ в цементной промышленности России в 2000-2060 гг. (оценки автора)

Figure 4. Dynamics of GHG emissions and sinks in the Russian cement industry in 2000-2060 (author's estimates)

Повышение энергоэффективности, снижение клинкер-фактора и замещение ископаемого топлива могут обеспечить значительное снижение выбросов CO₂ в российской цементной промышленности. Для ее еще более глубокой декарбонизации необходимо наращивание масштабов использования технологии CCUS. Предполагается, что эта технология будет применяться в России с 2035 г., и к 2060 г. масштабы захвата и захоронения составят 12.7 млн тCO₂. Однако даже такой масштаб применения технологии CCUS не позволяет трансформировать российскую цементную промышленность в углеродонейтральную. В 2060 г. нетто-выбросы сохраняются на уровне 13 млн тCO₂, что равно 21% от значения 1990 г. Годовые инвестиции в техноло-

гию CCUS выходят на пик 114 млн долл. в 2035 г., а затем снижаются и в сумме за 2022-2060 гг. составляют 2.2 млрд. долл.

Снижение выбросов ПГ в цементной промышленности России в 1990-2060 гг. составляет 79%. Превращение ее в углероднейтральную в 2060 г. возможно за счет удвоения масштабов применения технологии CCUS или доведения доли биомассы в топливном балансе до 80-90%.

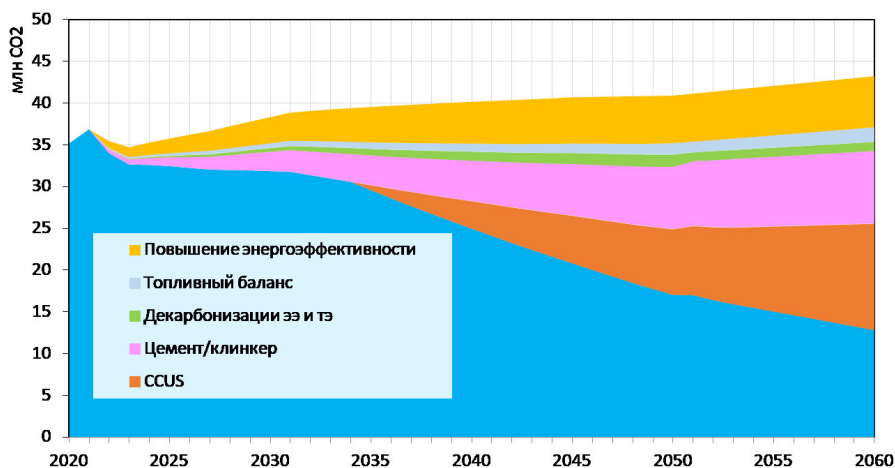


Рисунок 5. Вклад отдельных мер в снижение выбросов CO₂ от российской цементной промышленности (оценки автора)

Figure 5. Contribution of selected measures to reduce CO₂ emissions from the Russian cement industry (author's estimates)

С учетом «эффекта губки» (Cao et al., 2020; Guo et al., 2021; GCCA, 2021; Xi et al., 2016) цементная промышленность России может стать углероднейтральной к 2040 г., а затем она становится нетто-стоком углерода (рис. 6). Если этот сток будет учитываться в национальной инвентаризации, то для достижения углеродной нейтральности использование CCUS не понадобится. Для Испании такая работы уже начата (см. Sanjuan et al., 2020). Можно оценить масштаб поглощения бетоном CO₂ (повторная карбонизация) на территории России в размере 26.8 млн тCO₂ в 2060 г. Даже если эта величина в 2 раза меньше, то цементная промышленность России может стать углероднейтральной к 2060 г. Специальные исследования по абсорбции цементосодержащими продуктами CO₂ на территории России не проводились. Приведенная оценка получена на основе допущения о том, что средний запас цемента на душу населения в России такой же, как он оценен в Cao et al. (2020) для стран СНГ за 2000-2020 гг. и по данным (Guo et al., 2021). Затем он оценивался на основе прогноза по ежегодному потреблению цемента и при допущении, что ежегодно за счет сноса выбывает 1.5% запаса цемента. На базе работы Cao et al. (2020) было принято допущение, что ежегодно бетонная «губка» впитывает 0.008 тCO₂/т накопленного запаса цемента. Это позволило получить оценку стока CO₂ в бетонную «губку» в размере 26.8 млн тCO₂ в

2060 г. Эффект «губки» пока не учитывается в национальных инвентаризациях, но есть предложения по его учету при оценке источников и стоков выбросов ПГ.

Удельные выбросы в 2020-2060 гг. снижаются с 628 до 168 кгCO₂/т цемента. Для более существенного их снижения необходимо либо увеличить масштабы применения технологии CCUS, либо существенно изменить структуру топливного баланса отрасли в пользу биомассы с доведением ее доли до 80-90%, как это планируется в ЕС, либо учитывать эффект повторной карбонизации. При выходе на долю биомассы 80-90% удельные выбросы на 1 т цемента в России сокращаются до нуля к 2060 г.

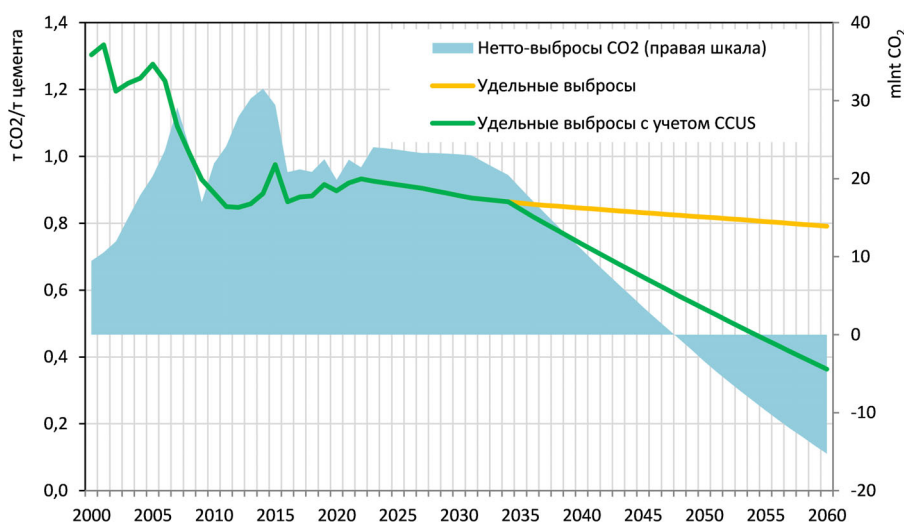


Рисунок 6. Динамика удельных выбросов CO₂ на тонну цемента и нетто-выбросов с учетом эффекта повторной карбонизации (правая шкала) в России в 2000-2060 гг. (оценки автора)

Figure 6. Dynamics of specific CO₂ emissions per ton of cement and net emissions, taking into account the effect of re-carbonization (right scale) in Russia in 2000-2060 (author's estimates)

Использование технологий декарбонизации цементной промышленности ведет к удорожанию цемента (Bashmakov et al., 2022b). Цемент с заводов, оснащенных CCUS, становится конкурентоспособным в 2043 г. при цене углерода 38 долл./тCO₂ и цене цемента 83 долл./т (рис. 7). При использовании в России технологии CCUS стоимость цемента сначала практически удваивается. Затем за счет масштабирования ее применения она постепенно сокращается. Чтобы сделать «низкоуглеродный цемент» конкурентоспособным, в первые годы нужны субсидии. При введении цены на углерод максимальный размер субсидий достигает 8 долл./т цемента в 2036 г. Затем, по мере удешевления технологии CCUS и повышения цены на углерод, субсидии снижаются до нуля к 2043 г. Всего сумма субсидий в 2036-2043 гг. составляет 60 млн долл.

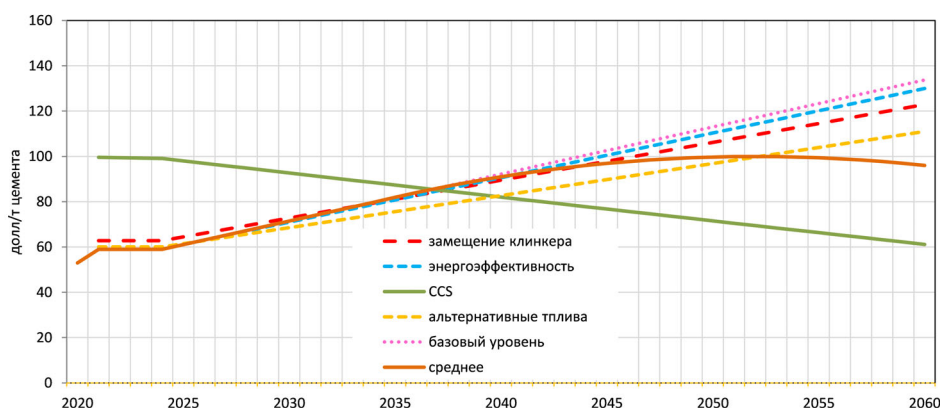


Рисунок 7. Приведенная стоимость производства цемента при введении цены на углерод с 2025 г. с ее монотонным повышением до 72 долл./тCO₂ к 2060 г.
(расчеты автора по данным Bataille et al. 2022)

Figure 7. Levelized costs of cement production with introduction of carbon price from 2025 with its monotonous increase to \$72/tCO₂ by 2060
(author's calculations based on Bataille et al. 2022)

При использовании технологий повышения энергоэффективности, использовании альтернативных топлив или заменителей клинкера цены на цемент не растут или растут очень незначительно. Однако при введении налога на углерод после реализации этих мер стоимость цемента будет расти, поскольку сохраняется значительная величина технологических выбросов. Но она будет ниже базового варианта. В итоге средние цены цемента выходят на пик 89 долл./т, который на 30 долл./т выше уровня 2021 г., а затем начинают медленно снижаться.

Список литературы

Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2020 гг. (2022) Москва.

Bashmakov, I.V., Bashmakov, K., Borisov, M., Dzedzichuk, A., Lunin, Govor, I. (2022) *Russia's carbon neutrality: pathways to 2060*, CENef-XXI, М. (<https://cenef-xxi.ru/articles/russia-s-carbon-neutrality:-pathways-to-2060>).

Bashmakov et al. (2022b) Industry. In: *Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the IPCC Sixth Assessment Report (AR6)*, in Skea, J. et al., (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Bataille, C., Åhman, M., Fishedick, M., Lechtenböhmer, S., Neuhoff, K., Nilsson, L.J., Solano-Rodriguez, B., Denis-Ryan, A., Steibert, S., Rahbar, S., Waisman, H., Sartor, O. (2022) *The Global Heavy Industry Decarbonization Technology Database Project*.

Cao, Z. et al. (2020) The sponge effect and carbon emission mitigation potentials of the global cement cycle, *Nat. Commun.*, vol. 11(1), p. 3777, doi:10.1038/s41467-020-17583-w.

Guo, R. et al. (2021) Global CO₂ uptake by cement from 1930 to 2019, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 13(4), pp. 1791-1805, doi:10.5194/essd-13-1791-2021.

GCCA (2021) *The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete*, London, UK, 46 pp. <https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW.pdf>.

OECD (2022) *Industrial production (indicator)*, doi: 10.1787/39121c55-en (Accessed on 28 April 2022), Industry, Industrialproduction, OECD Data.

Sanjuan, Miguel Angel, Pedro, Mora (2020) Carbon Dioxide Uptake by Cement-Based Materials, A Spanish Case Study, *Appl. Sci.* vol. 10, p. 339; doi:10.3390/app10010339.

Xi, F., Davis, S.J., Ciais, P., Crawford-Brown, D., Guan, D., Pade, C., Shi, T., Syddall, M., Lv, J., Ji, L., Bing, L., Wang, J., Wei, W., Yang, K.-H., Lagerblad, B., Galan, I., Andrade, C., Zhang, Y., Liu, Z. Substantial global carbon uptake by cement carbonation, *Nature Geosci.*, vol. 9, pp. 880-883, <https://doi.org/10.1038/ngeo2840>.

References

Nacional'nyj doklad o kadastre antropogennyh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikovyh gazov, ne reguliruemyh Monreal'skim protokolom, za 1990-2020 gg. [National report on the inventory of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for 1990-2020] (2022) Moscow, Russia.

Bashmakov, I.V., Bashmakov, K., Borisov, M., Dzedzichuk, A., Lunin and I. Govor (2022) *Russia's carbon neutrality: pathways to 2060*, CENef-XXI, M. (<https://cenef-xxi.ru/articles/russia-s-carbon-neutrality:-pathways-to-2060>).

Bashmakov et al. (2022b) Industry. In: *Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the IPCC Sixth Assessment Report (AR6)*, in Skea, J. et al., (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Bataille, C., Åhman, M., Fishedick, M., Lechtenböhmer, S., Neuhoff, K., Nilsson L.J., Solano-Rodriguez, B., Denis-Ryan, A., Steibert, S., Rahbar, S., Waisman, H., Sartor, O. (2022) *The Global Heavy Industry Decarbonization Technology Database Project*.

Cao, Z. et al. (2020) The sponge effect and carbon emission mitigation potentials of the global cement cycle, *Nat. Commun.*, vol. 11(1), p. 3777, doi:10.1038/s41467-020-17583-w.

GCCA (2021) *The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete*, London, UK, 46 pp. <https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW.pdf>

Guo, R. et al. (2021) Global CO₂ uptake by cement from 1930 to 2019, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 13(4), pp. 1791-1805, doi:10.5194/essd-13-1791-2021.

OECD (2022) *Industrial production (indicator)*, doi: 10.1787/39121c55-en (Accessed on 28 April 2022), Industry, Industrialproduction, OECD Data.

Sanjuan, Miguel Angel, Pedro, Mora (2020) Carbon Dioxide Uptake by Cement-Based Materials, A Spanish Case Study, *Appl. Sci.* vol. 10, p. 339; doi:10.3390/app10010339.

Xi, F., Davis, S.J., Ciais, P., Crawford-Brown, D., Guan, D., Pade, C., Shi, T., Syddall, M., Lv, J., Ji, L., Bing, L., Wang, J., Wei, W., Yang, K.-H., Lagerblad, B., Galan, I., Andrade, C., Zhang, Y., Liu, Z. Substantial global carbon uptake by cement carbonation, *Nature Geosci.*, vol. 9, pp. 880-883, <https://doi.org/10.1038/ngeo2840>.

Статья поступила в редакцию (Received): 03.11.2022.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 16.05.2023.

Принята к публикации (Accepted): 20.05.2023.

Для цитирования / For citation:

Башмаков, И.А. (2023) Перспективы декарбонизации цементной промышленности мира, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 2, с. 165-177, doi:10.21513/2410-8758-2023-2-165-177.

Bashmakov, I.A. (2023) Russian cement industry decarbonization perspectives, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 2, pp. 165-177, doi:10.21513/2410-8758-2023-2-165-177.

Оценка климатических рисков для территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры

О.Н. Липка ¹⁾*, А.Ю. Богданович ¹⁾, А.П. Андреева ¹⁾, А.С. Каравеева ^{1),2)},
С.В. Крыленко ¹⁾, А.М. Седова ¹⁾

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, 20Б

²⁾ Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева,
Россия, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

*Адрес для переписки: olipka@mail.ru

Реферат. Для оценки климатических рисков в рамках разработки региональных планов адаптации к изменениям климата рекомендовано использовать методики Паспорта климатической безопасности (Минприроды России) (далее – Минприроды) и Оценки климатических рисков (Минэкономразвития России) (далее – Минэкономразвития). Для Ханты-Мансийского автономного округа списки выявленных угроз близки, включают опасные гидрометеорологические явления и их последствия, а также прогнозы изменений климата до середины и конца XXI века. В качестве наиболее разрушительного явления выделяются половодья (для 37 населенных пунктов целесообразно переселение жителей), но также характерны опасные явления, связанные с высокими температурами и засухливостью. Площадь, пройденная огнем, может достигать 120-140 тыс. га. По оценке с использованием методики Минэкономразвития, 7 явлений (оползни; суффозия; эрозия плоскостная и овражная; наводнение; ураганы; смерчи; сильный ветер; жара; засуха) периодически достигают катастрофического уровня. По подверженности и уязвимости опасным явлениям наблюдаются заметные различия между западной гористой частью округа (6%) и низменной выравненной основной территорией. Возможный экономический ущерб от климатических рисков может составлять от 1.4 до 4.6 млрд руб. в год. Обе методики нуждаются в доработке. Необходимо более четко определить объекты, для которых оцениваются риски (на территории региона их насчитывается от 1.5 до 3 тыс.), провести инвентаризацию и создать систему сбора информации об ущербах в связи с опасными гидрометеорологическими явлениями. Уровни опасности по методике Минэкономразвития для засухи, подтопления, сильного ветра, осадков и пожарной опасности могут быть занижены.

Ключевые слова. Изменение климата, климатические риски, опасные гидрометеорологические явления, паспорт климатической безопасности, региональный план адаптации, ХМАО.

Assessment of climate-related risks for the territory of Khanty-Mansiysk autonomous okrug – Yugra

O.N. Lipka^{1)}, A.Yu. Bogdanovich¹⁾, A.P. Andreeva¹⁾, A.S. Karavaeva^{1), 2)},
S.V. Krylenko¹⁾, A.M. Sedova¹⁾,*

¹⁾Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya st., 107258, Moscow, Russian Federation

²⁾Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
49, Timiryazevskaya st., 127434, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: *olipka@mail.ru*

Abstract. It is recommended to use the methods of the Climate Safety Data Sheet (Ministry of Natural Resources Russian Federation) and the Climate Risk Assessment (Ministry of Economic Development Russian Federation) to assess climate risks as part of the regional climate change adaptation plan development. For the Khanty-Mansiysk autonomous okrug, the lists of identified threats are similar, including dangerous hydrometeorological phenomena and their consequences, as well as forecasts of climate change until the middle and end of the 21st century. Floods are the most destructive phenomenon (for 37 settlements it is advisable to resettle residents), but dangerous phenomena associated with high temperatures and aridity are also manifested. The fire-burned area in dry years can reach 120-140 thousand hectares. 7 phenomena (landslides; suffusion; flat and ravine erosion; flood; hurricanes, tornadoes, strong wind; heat; drought) periodically reach a catastrophic level. In terms of exposure and vulnerability to hazards, there are marked differences between the western mountainous part of the Okrug (6%) and the low-lying flattened main area. Possible economic damage from climate risks can vary from 1.4 to 4.6 billion rubles in year. Both methods need to be improved. It is necessary to more clearly define the objects for which risks are assessed (there are from 1.5 to 3 thousand of them in the region), conduct an inventory and create a system for collecting information on damages due to dangerous hydrometeorological phenomena. The level of danger according to the methodology of the Ministry of Economic Development for drought, flooding, strong winds, precipitation and fire hazard can be underestimated.

Keywords. Surface air temperature, precipitation, wind speed, minimum air temperature, maximum air temperature, frequency of intense precipitation, duration of dry periods.

Введение

Ханты-Мансийский автономный округ – Югра (ХМАО) расположен в центральной части Западно-Сибирской низменности. Его северная граница проходит южнее полярного круга, но территория относится к районам Крайнего Севера и приравненным к ним местностям (постановление Правитель-

ства РФ, 2021). При низкой численности населения (1 675.3 тыс. чел.) округ является основным нефтегазоносным районом России (41.2% общероссийской добычи нефти) и одним из крупнейших нефтедобывающих регионов мира (Доклад об экологической ситуации, 2022).

Изменения климата проявляются на территории ХМАО с конца прошлого века как в увеличении среднегодовой и сезонной температуры воздуха, так и по ряду других параметров, включая экстремальные явления (Доклад об особенностях климата..., 2022; Третий оценочный..., 2022). Для округа характерно островное распространение многолетнемерзлых пород (Атлас ХМАО, 2004), что делает его менее уязвимым к деградации мерзлоты по сравнению с ЯНАО. Вместе с тем, низменная, равнинная территория с густой гидрографической сетью в месте слияния Оби и Иртыша подвержена комплексу опасных гидрометеорологических явлений. Крайняя западная часть округа включает восточный макросклон Уральских гор со свойственными им опасными явлениями (сели, оползни, лавины и др.). По данным статистики, в ХМАО регулярно возникают чрезвычайные ситуации природного характера, которые обусловлены длительной суровой зимой, весенним половодьем на реках округа и лесными пожарами в весенне-летний период (Соколов, Кузнецова, 2019).

Как и другие регионы страны, ХМАО испытывает дефицит адаптации, который в меняющемся климате будет усиливаться, если не применять соответствующие меры (Третий оценочный..., 2022; Глобальное изменение климата ..., 2021). Недоучет климатических рисков может приводить также к техногенным катастрофам, которые наносят значительный ущерб природе, экономике и здоровью населения.

Эффективность адаптационных мер зависит от правильности оценки воздействий опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлений и их последствий, включая прогнозы изменений климата, которые входят в понятие климатического риска для конкретной территории. Принятие решений в конкретной ситуации основывается на сопоставлении информации об уязвимости важных объектов, размерах ущербов при отсутствии мер адаптации и стоимости реализации различных вариантов адаптационных мер.

Для подготовки региональных планов адаптации к изменениям климата в качестве методологической основы двумя министерствами практически одновременно были изданы нормативные документы: приказ Минэкономразвития России № 267 от 13.05.2021 «Об утверждении методических рекомендаций и показателей по вопросам адаптации к изменениям климата» (включает методические рекомендации по оценке климатических рисков, в том числе для территорий) и распоряжение Минприроды России от 19.05.2021 № 16-р «Об утверждении Типового паспорта климатической безопасности территории субъекта Российской Федерации». Теоретически, оценка климатических рисков по формату Минэкономразвития может быть выполнена на основе информации, обобщенной в паспорте климатической безопасности. Однако на практике регионы, и ХМАО в том числе, столкнулись с трудностями, связанными как с форматами подачи информации, так и с методологическими различиями двух подходов по оценке климатических рисков.

Целью данного исследования является оценка климатических рисков для территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры с применением двух утвержденных методик и сравнение предложенных подходов.

Для достижения цели решались следующие задачи:

- сравнение терминов, относящихся к климатическим рискам, в предложенных методиках с используемыми Росгидрометом и Межправительственной группой экспертов по изменению климата;
- оценка климатических рисков по методике Минприроды России;
- оценка климатических рисков по методике Минэкономразвития России;
- сравнение результатов оценок;
- выявление несовершенств и трудностей при использовании утвержденных методик, устранение которых повысит эффективность применения методик для разработки планов адаптации.

Методы и материалы

Классическое определение риска, связанного с климатообусловленными воздействиями, приведено в работах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC, 2014). В нем климатический риск определяется как сочетание климатических угроз (Hazards), которые включают опасные явления и тенденции, с уязвимостью (Vulnerability) и подверженностью (Exposure) антропогенных и природных систем. В данном контексте «угроза» – потенциальное возникновение естественного или вызванного человеком физического события или тренда, которые могут привести к гибели людей, травмам или другим воздействиям на здоровье, а также к утрате/ущербу в отношении имущества, инфраструктуры, средств к существованию, экосистемных услуг, экосистем и природных ресурсов»; «подверженность» – присутствие людей, средств к существованию, видов или экосистем, экологических функций, услуг и ресурсов, инфраструктуры, а также экономических, социальных или культурных ценностей в местах и ситуациях, в которых они могут быть подвержены отрицательным воздействиям»; и «уязвимость» – склонность или предрасположенность к неблагоприятным последствиям. Уязвимость охватывает множество понятий и элементов, в том числе чувствительность или подверженность вреду и недостаток способности противостоять воздействию и адаптироваться» (IPCC, 2014).

В соответствии с Федеральным законом «О гидрометеорологической службе» (113-ФЗ, 1998): «опасное природное явление – гидрометеорологическое или гелиогеофизическое явление, которое по интенсивности развития, продолжительности или моменту возникновения может представлять угрозу жизни или здоровью граждан, а также может наносить значительный материальный ущерб». По смыслу данное определение близко к приведенному выше термину «угроза» В руководящих документах РД 52.27.724-2019 (2019) и РД 52.88.699-2008 (2008) Росгидромета представлены типовые перечни метеорологических, агрометеорологических, гидрологических и морских гидромете-

орологических опасных явлений и закреплены их критерии. На сайте Обь-Иртышского УГМС опубликованы перечни опасных явлений, возможных на территории ХМАО, а также их региональные критерии (Перечень и критерии..., 2014).

Опасные гидрометеорологические явления относятся к природным чрезвычайным ситуациям, по определению МЧС России (Атлас природных и техногенных..., 2010).

Разработка паспорта климатической безопасности (распоряжение Минприроды России..., 2021) является важным этапом адаптации региона России к изменениям климата (Национальный план..., 2019). В соответствии с методикой документ включает основные гидрометеорологические характеристики субъекта РФ: температура приземного воздуха, относительная и абсолютная влажность приземного воздуха; количество атмосферных осадков; скорость и направление приземного ветра; расход воды основных рек; повторяемость интенсивных осадков (число дней в году с осадками не менее 10 мм); продолжительность сухих периодов (максимальное число последовательных дней в году с осадками менее 1 мм); продолжительность залегания снежного покрова; повторяемость опасных и особо опасных явлений (распоряжение Минприроды России..., 2021).

Наблюдаемые изменения климатических характеристик даются максимально подробно за период начиная с 1960-х гг. (но не позднее, чем с середины 1971-х гг.): радиационный режим; термический режим воздуха; термический режим почвы, включая состояние многолетней мерзлоты (при наличии) и ее температурный режим, сезонно-талый слой; режим увлажнения; снежный покров; лавиноопасность; ветровой режим; атмосферные метеорологические явления; опасные гидрометеорологические явления (повторяемость, интенсивность, площадь охвата, распределение по территории); гидрологические характеристики водных объектов (реки: расходы воды, характерные уровни); водохранилища и озера; море: характеристики ветрового волнения; температура, соленость и плотность морской воды; режим течений; ледяной покров) (распоряжение Минприроды России..., 2021).

В паспорт также включается информация об изменении спектра важных для региона показателей: уровень моря, таяние материкового льда (включая деградацию многолетнемерзлых пород), засоление почв, рост пожароопасности, оценка состояния лесных экосистем и земельных угодий, их динамика и прогноз состояния (деградации лесов и земель, уменьшении биоразнообразия, опустынивании, изменения состояния популяций растений и животных, включенных в Красную книгу Российской Федерации, а также имеющих социально-экономическое значение) (распоряжение Минприроды России..., 2021). Из них к опасным метеорологическим явлениям относится только одно – рост пожарной опасности. Изменение уровня моря, таяние материкового льда являются медленными процессами, связанными с изменениями климата, но остальные перечисленные показатели могут быть в гораздо большей степени связаны с прямым антропогенным воздействием, в том числе с переводом земель из одной категории в другую. Вклад опасных гидрометеороло-

гических явлений, например, в изменение биологического разнообразия, требует специальных глубоких исследований.

В паспорт включается информация о наиболее значимых и уязвимых объектах социально-экономической сферы, формируются оценки экономического ущерба, обусловленного воздействием погодно-климатических факторов (распоряжение Минприроды России..., 2021).

Также паспорт климатической безопасности содержит сведения о прогнозной (сценарной) оценке изменений климатических характеристик до середины XXI века, включая количественные оценки неопределенности прогнозов.

Завершает характеристику региона оценка риска для населения (включая отдельные его группы) и хозяйственных объектов территории субъекта Российской Федерации, подверженных негативному воздействию погодно-климатических факторов. При этом риск рассчитывается как произведение вероятности негативного воздействия погодно-климатических факторов на степень защищенности (уязвимости) населения и хозяйственных объектов территории к указанному воздействию, которая (степень уязвимости) определяется как доля от нормативно установленного значения защищенности, принимаемого за единицу или 100% (распоряжение Минприроды России..., 2021).

Введение вероятностной оценки в понятие риска вполне оправдано в дополнение к классическим категориям угроза-подверженность-уязвимость (как дополнительная характеристика угрозы). При этом нет упоминания силы воздействия. Например, ветер может наносить ущерб объектам лесного хозяйства при скорости 10-15 м/с, что гораздо ниже порогового значения опасного метеорологического явления, установленного УГМС. Вызывает вопросы наличие данных о степени фактической защищенности объектов, которая может быть индивидуальной, а также сведения о нормативно установленных значениях защищенности – единого перечня значений, который можно было бы использовать для расчетов для всех предложенных категорий.

Приказ Минэкономразвития (2021) вводит набор ключевых терминов, на которых базируется разработка региональных планов адаптации. Предложенные определения ориентированы на возможность оценки дефицита адаптации, разработку адаптационных мер и определение их эффективности в рублевом эквиваленте. С точки зрения оценки климатических рисков ключевыми являются следующие термины:

Климатический фактор (фактор климата) – параметр климатической системы, меняющийся под воздействием внутренней динамики климатической системы и (или) в силу воздействий на эту систему внешних факторов (колебания солнечной радиации, изменение химического состава атмосферы, изменение радиационных свойств поверхности и т.д.).

Уязвимость – склонность или предрасположенность к неблагоприятному воздействию, включая чувствительность или восприимчивость к ущербу и ограниченную способность адаптироваться.

Объект воздействия – компонент антропогенной или природной системы, функционирование которого зависит от фактора (факторов) климата.

Климатический риск – совместная характеристика вероятности опасных проявлений климатического фактора и его воздействия (в виде вреда или ущерба) на объект этого воздействия, которая выражается в величине ущерба (в натуральном и (или) стоимостном выражении), характерного для повторяемости заданных значений опасного климатического фактора.

Подверженность – степень влияния на объект воздействия опасного для этого объекта климатического фактора (приказ Минэкономразвития..., 2021).

Понятие климатического риска близко к классическому: сочетание угрозы (опасное проявление климатического фактора), подверженности (изначально рассматривается только для объектов, которые данному воздействию подвержены) и уязвимости. В отличие от определения Минприроды здесь установлены единицы измерения: стоимостной эквивалент. Другие единицы применяются, например, когда речь идет о количестве пострадавших.

«Подверженность» в методике Минэкономразвития ближе по смыслу к другому термину МГЭИК: воздействия (Impacts) – «воздействия на природные или антропогенные системы, оказываемые экстремальными погодными и климатическими явлениями и изменениями климата» (IPCC, 2014).

В методике Минэкономразвития (2021) климатические риски территорий рекомендуется оценивать по следующим источникам риска:

а) атмосфера: очень сильный ветер (в том числе ураган, шквал, смерч), засуха, заморозки, аномальная жара (холод), крупный град, аномальные атмосферные осадки, грозы, чрезвычайно высокая пожарная опасность и др. (приказ Минэкономразвития..., 2021) – отобраны некоторые опасные метеорологические и агрометеорологические явления (РД 52.27.724-2019, 2019; РД 52.88.699-2008, 2008);

б) гидросфера: наводнение (вследствие половодья, паводка, затора, зажора, сильного ливня), русловые деформации, повышение уровня Мирового океана и др. (приказ Минэкономразвития..., 2021) – опасные гидрологические явления (РД 52.88.699-2008, 2008), а также некоторые геоморфологические (русловые деформации). В отличие от большинства перечисленных явлений, которые развиваются быстро, повышение уровня Мирового океана является медленным процессом, но обладающим потенциалом существенного негативного воздействия для низменных побережий;

в) криосфера и литосфера: лавины, оползни, сели (включая гляциальные), абразия, переработка берегов (рек, водохранилищ, озер), эрозия плоскостная и овражная, водоснежные потоки, деградация многолетней мерзлоты, термоабразия, термоэрозия овражная, термокарст, пучение, солифлюкция, наледеобразование, карст, суффозия, просадочность лессовых пород, подтопление территории и др. (приказ Минэкономразвития..., 2021) – сход снежных лавин относится к опасным метеорологическим явлениям, сели – к опасным гидрологическим (РД 52.88.699-2008, 2008), остальные процессы в большей степени геоморфологические, входят в список природных опасностей и рисков МЧС (Атлас природных и техногенных..., 2010).

Для характеристики степени климатического риска региона, согласно методике Минэкономразвития, применяются различные оценки, для которых

разработаны специальные табличные формы приложений (приказ Минэкономразвития..., 2021).

На первом этапе определяются пороговые значения чувствительности (работоспособности) объектов воздействия при наличии фактора (факторов) климата различной интенсивности и продолжительности (Приложение 2). То есть сопоставляются сочетание силы и продолжительности климатического фактора, при которых он переходит в категорию опасных явлений для некоего объекта воздействия.

Далее проводится ретроспективная оценка климатических рисков территорий с их распределением по уровням опасности (Приложение 4). Для этого составлен перечень из 24 явлений: оползни; сели; лавины; абразия и термоабразия; переработка берегов водохранилищ, озер; карст; суффозия; просадочность лессовых пород; подтопление территории; эрозия плоскостная и овражная; русловые деформации; термоэрозия овражная; термокарст; пучение; солифлюкция; наледообразование; наводнение; ураганы, смерчи, сильный ветер; жара; засуха; заморозки; град; сильные атмосферные осадки; пожарная опасность в лесах (Приложение 3, приказ Минэкономразвития..., 2021). Большинство из перечисленных явлений не входят в типовой перечень опасных явлений, по которым собирает информацию и ведет статистику Росгидромет (РД 52.88.699-2008, 2008). Каждый фактор риска рекомендуется характеризовать показателями интенсивности, распространенности и продолжительности воздействия, которые позволяют идентифицировать уровень его опасности по следующим категориям: чрезвычайно опасный (катастрофический), весьма опасный, опасный и умеренно опасный в соответствии с предложенными индикаторами (Приложение 3). Для сравнения: УГМС Росгидромета определяют пороговые значения двух уровней – опасного и неблагоприятного явления (РД 52.27.724-2019, 2019; РД 52.88.699-2008, 2008).

Расчет экономического ущерба предлагается проводить в соответствии с Единой межведомственной методикой оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификации и учета чрезвычайных ситуаций, утвержденной МЧС России в 2004 г. (Единая межведомственная..., 2004). Оценка базируется на основе математического ожидания ущерба:

$$M[W, \Delta t] = a_{\text{чс}}(\Delta t) \bar{W} = \sum_{j=1}^m a_{\text{чс}j}(\Delta t) \bar{W}_j,$$

где $\bar{W} = \int_0^{\infty} wf(w)dw$ – средний ущерб от ЧС; $\bar{W}_j = \int_{w_{\text{чс}j=1}}^{w_{\text{чс}j}} wf(w)dw$ – средний ущерб от ЧС j-го класса по степени тяжести; $a_{\text{чс}}(\Delta t) = \Delta_{\text{чс}} \Delta t$ – математическое ожидание числа ЧС за интервал времени; $\Delta_{\text{чс}}$ – повторяемость ЧС j-го класса по степени тяжести.

Завершают характеристику климатических рисков по методике Минэкономразвития (2021) ожидаемые изменения климата по территории в соответ-

ствии с прогнозом Росгидромета и описание прогнозируемых изменений в распределении климатических рисков территории (Приложение 4).

Нами для анализа климатических рисков по предложенным методикам использовались архивы метеорологических данных суточного и срочного разрешения, сформированные во Всероссийском научно-исследовательском институте гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (далее – ВНИИГМИ-МЦД) (Булыгина и др., 2022а, б), а также любезно предоставленные специалистами ВНИИГМИ-МЦД по нашему запросу для станций Березово, Леуши, Ханты-Мансийск, Нижневартовск и Корлики. Выбранные пункты наблюдений являются репрезентативными для равнинной части ХМАО и полностью отражают ее специфику. Применялись стандартные статистические методы обработки метеорологической информации (Дегтярев и др., 2015). Для характеристики горной части округа (от 2 до 6% территории по разным оценкам) использовались литературные и картографические материалы, база данных опасных гидрометеорологических явлений, агрегированная по субъектам Федерации (Шамин и др., 2022).

Высокая степень детализации информации об опасных явлениях, их последствиях, объектах, находящихся в зоне воздействия, их уязвимости и ущербах потребовала изучения докладов и отчетов, научных материалов и публикаций, картографических материалов, данных дистанционного зондирования и баз данных, находящихся в открытом доступе. Обрабатывались сведения об опасных явлениях с начала XX века, результаты модельных прогнозов изменения климата до конца XXI века.

Для оценки площадей, подверженных опасным гидрометеорологическим явлениям на территории округа, выполнялась привязка и оцифровка картографических материалов из различных источников в программе QGIS. В качестве цифровой модели рельефа использовалась интерактивная гипсометрическая карта проекта Open Street Map (Проект Open Street Map..., 2023).

Результаты и обсуждение

При сравнении методик Минприроды и Минэкономразвития с подходами, используемыми МГЭИК и в Росгидромете, выясняется, что для региональной оценки климатических рисков используются три определения: МГЭИК, Минприроды и Минэкономразвития России. Концептуально они схожи между собой, но имеются различия в способах их характеристики и необходимых исходных данных. Термин «угроза» МГЭИК включает «опасные гидрометеорологические явления» Росгидромета, а также их последствия (что соответствует концепции Минприроды) и идентичен «опасному проявлению климатического фактора» Минэкономразвития.

Специфика сфер ответственности министерств проявляется в том, под каким углом рассматривается воздействие опасных явлений, в каком виде и какие данные они хотят получить в качестве результата оценки климатических рисков. Рассмотрим полученные данные о климатических рисках в последовательности: угрозы – подверженность – уязвимость.

Характеристика климатических рисков по методике Минприроды

Угрозы

По данным наблюдений на станциях (подробно см. в Богданович, Караваева, 2023), в базе данных опасных явлений ВНИИГМИ-МЦД (Шамин и др., 2022), по материалам Природнадзора ХМАО (Доклад об экологической ситуации..., 2022), на территории округа были подтверждены следующие опасные и неблагоприятные гидрометеорологические явления: очень сильный ветер; ураганный ветер; сильный ливень; очень сильный дождь; очень сильный снег; сильная метель; сильное гололедно-изморозевое отложение; крупный град; сильный мороз; сильный туман; сильная жара; аномально жаркая погода; аномально холодная погода; чрезвычайная пожароопасность; сели; лавины; наводнения. В качестве критериев опасного явления использовались данные Обь-Иртышского УГМС (Перечень и критерии..., 2014). Из них за период 1991-2021 гг. наиболее часто проявлялись: сильный ветер – 17 (один случай более 33 м/с); чрезвычайная пожароопасность – 17 случаев, а также половодья и паводки – 11 случаев (Шамин и др., 2022).

Максимальные значения основных метеорологических параметров за всю историю наблюдений приведены в табл. 1. На территории ХМАО возможны не только экстремально низкие (ниже -50°C), но и высокие (выше $+35^{\circ}\text{C}$) температуры. Продолжительность периода температур ниже -30°C достигала на станции Березово почти 400 ч – около 16 дней (Справочник по опасным..., 1997). Повторяемость сильных морозов на территории округа в январе составляет по средней суточной температуре воздуха 15-20% (в северных и восточных районах до 30%), а по минимальной температуре воздуха возрастает до 30-37% (на севере и востоке – до 45-50%) (Булыгина и др., 2013).

Скорость ветра на всех пяти пунктах наблюдений достигает значений, наносящих существенный ущерб инфраструктуре (20 м/с и выше; табл. 1). В целом на севере округа (Березово, Казым) повторяемость скоростей ветра более 10 м/с превышает 20% в конце весны-начале лета. Значительно реже скорость ветра достигает 12 м/с, повторяемость таких ветров колеблется от 10-12% на севере округа до 3-6% на юге (Булыгина и др., 2013).

Суточное количество осадков может не только превышать среднюю месячную норму, но и приводить к опасным дождевым паводкам (табл. 1). Продолжительная и холодная зима благоприятствует накоплению снега. В ХМАО в твердом виде выпадает свыше 30% годового количества осадков, однако межгодовая изменчивость высоты снежного покрова достаточно велика: в малоснежные зимы она может быть ниже 20 см, в многоснежные – до 100 см и выше (Булыгина и др., 2013). Средняя высота снежного покрова на территории округа достигает 50-60 см, на востоке увеличивается до 80 см (Мурашко и др., 2020).

По данным пяти метеостанций, было рассчитано число дней с осадками не менее 10 мм для периодов 1961-1990 и 1991-2020 гг. Во втором климатиче-

ском периоде по сравнению с первым число дней с интенсивными осадками возросло на каждой станции. Наибольшее число дней с осадками не менее 10 мм за оба климатических периода было зафиксировано в Ханты-Мансийске (табл. 2).

Таблица 1. Абсолютный максимум T_{max} и абсолютный минимум T_{min} температуры воздуха ($^{\circ}C$), максимальная скорость ветра U_{max} (м/с), наибольшая сумма осадков за сутки R_{max} (мм), по данным станционных наблюдений

Table 1. Absolute maximum T_{max} and absolute minimum T_{min} of air temperature ($^{\circ}C$), maximum wind speed U_{max} (m/s), maximum daily precipitation R_{max} (mm), according to station observations

Станция	T_{max}	T_{min}	U_{max}	R_{max}
Березово	+33.6	-52.8	34	78.6
Леуши	+36.4	-48.3	26	62.3
Ханты-Мансийск	+34.7	-49	24	94.7
Нижневартовск	+35.1	-53.1	27	46.8
Корлики	+36.4	-58.5	29	89.7

Таблица 2. Общее число дней с осадками не менее 10 мм, по данным станций, за периоды 1961-1990 гг. и 1991-2020 гг.

Table 2. Total number of days with precipitation of at least 10 mm according to station data in 1961-1990 and 1991-2020

Период	Ханты-Мансийск	Березово	Леуши	Корлики	Нижневартовск
1961-1990 гг.	328	294	292	259	269
1991-2020 гг.	340	334	327	316	325

На территории округа также возможны опасные явления, связанные с дефицитом осадков. Хотя число последовательных дней в году с осадками менее 1 мм в среднем не превышает 20, максимальная продолжительность засушливых периодов может достигать 30 дней и более (Березово – 36, Леуши – 42).

Округ расположен на юге криолитозоны, на Урале и на крайнем севере ХМАО (Надымская низменность), мерзлотные процессы имеют распространение более чем на 50% площади территории (Атлас Ханты-Мансийского..., 2004). Южнее многолетняя мерзлота встречается лишь в торфяных буграх пучения (Булыгина и др., 2013). По литературным данным подтверждается таяние мерзлоты в торфяных буграх плоскобугристых и крупнобугристых комплексах, что приводит к развитию термокарста с последующим формированием просадок. Усилению протаивания способствуют волны тепла и засухи (Шишконокова и др., 2016).

Для рек ХМАО характерно растянутое половодье, пониженная пропускная способность и пониженная дренирующая роль, что является одним из важных факторов переувлажнения и заболачивания территории. Сильный подпор притоков главных рек Оби и Иртыша в половодье вызывает дополни-

тельное обводнение водораздельных территорий. Высота подъема воды колеблется от 4.5 до 7.5 м, иногда достигая 8-10 м. Реки, выходя из берегов, затапливают огромные пространства. В бассейне р. Конда паводковые воды часто сливаются с болотами, образуя единые водные системы. В некоторые годы половодье, смыкаясь с летними паводками, растягивается до осени (Арктик-Энерджи, 2013).

Опасность схода лавин, селей и водоснежных потоков на территории округа характерна только для склонов Уральских гор (6% от общей площади ХМАО). Продолжительность лавиноопасного периода обычно составляет 150-210 дней. Степень опасности схода селей и водоснежных потоков преимущественно низкая, в центральной части склонов гор достигает среднего уровня. Наиболее вероятными периодами схода селей являются июль и август, водоснежных потоков – май и июнь (Справочник по опасным..., 1997; Атлас Ханты-Мансийского..., 2004; Национальный атлас России, 2007; Атлас природных и техногенных, 2010).

Пожароопасный период в округе наступает в начале мая, его продолжительность составляет 120-140 дней (Антонов, Исаков, 2015). В последние десятилетия увеличение количества пожаров наблюдается вместе с увеличением количества пожароопасных дней в регионе. С мая по сентябрь учащаются случаи регистрации чрезвычайной пожароопасности (5 класс горимости) на территории округа (Алагулов и др., 2019; Доклад об экологической ситуации ..., 2021; Шерстюков, 2021). За период с 2010 по 2020 гг. в лесах ХМАО возникло 5709 пожаров на площади 493.8 тыс. га (постановление..., 2021; Куплевацкий, Шабалина, 2020) притом, что 80% территории лесного фонда ХМАО характеризуется невысоким классом природной пожароопасности. Наиболее распространенными являются низовые пожары – до 98% общей площади (постановление..., 2021).

Прогнозы изменений климата лучше отражают динамику средних величин, чем экстремальных значений. Результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей, принявших участие в CMIP6, показали для большинства сценариев, что к концу XXI века по отношению к 1850-1900 гг. в регионе «Западная Сибирь» произойдет устойчивое повышение средней годовой температуры воздуха. Возможно также повышение максимальной и минимальной температуры воздуха на 2.4-7.3°C, увеличение на 5-18 числа дней с максимальной температурой выше +35°C и незначительное сокращение максимального количества последовательно сухих дней (IPCC, 2021). Ниже в табл. 3 приведены значения для сценария SSP5-8.5, соответствующего высокому уровню выбросов парниковых газов (табл. 3; IPCC, 2021).

Как и в большинстве регионов России, для ХМАО ожидается уменьшение вероятности опасных явлений, связанных с холодным стрессом, и увеличение для связанных с высокими температурами. Оценки изменения продолжительности засух неоднозначны. Увеличение общего количества осадков может сопровождаться увеличением суточных максимумов, что усиливает предпосылки для дождевых паводков. Об изменении рисков, связан-

ных с половодьями, на основании используемых данных невозможно сделать четкие заключения.

Таблица 3. Изменение средних региональных значений климатических параметров относительно уровня 1850-1900 гг. при разных уровнях глобального потепления согласно сценарию SSP5-8.5 в регионе «Западная Сибирь», результаты расчета проекта CMIP6 (IPCC, 2021)

Table 3. Changes in the average regional values of climatic parameters relative to 1850-1900 at different global warming level according to SSP5-8.5 scenario in the Western Siberia region, the results of CMIP6 project calculation (IPCC, 2021)

Климатические параметры	Число моделей в ансамбле	Потепление 1.5°C	Потепление 2°C	Потепление 3°C	Потепление 4°C
Температура воздуха, °C	34	+2.6	+3.5	+5.2	+6.8
Минимальная температура воздуха, °C	27	+2.9	+3.8	+5.5	+7.3
Число морозных дней	26	-17.8	-23.5	-35.2	-48.3
Максимальная температура воздуха, °C	27	+2.4	+3.1	+4.7	+6.5
Число дней с максимальной температурой выше 35°C	27	+5.1	+7.2	+12.8	+18.1
Число дней с максимальной температурой выше 40°C	27	+1.1	+2.0	+4.1	+6.9
Общее количество осадков, %	33	+6.9	+9.1	+12.0	+14.7
Максимальное число последовательно сухих дней (с осадками <1 мм)	32	-0.9	-0.5	-0.6	+0.3

Подверженность

При оценке рисков трудной задачей оказалось составление «Перечня наиболее значимых объектов экономики и социальной сферы, подверженных погодно-климатическому воздействию». Именно для них в первую очередь предполагалось оценить климатообусловленные риски, чтобы в дальнейшем планировать адаптационные мероприятия.

Так, на официальном сайте Департамента жилищно-коммунального комплекса и энергетики Ханты-Мансийского автономного округа – Югры опубликован «Перечень социально значимых и критически важных объектов» (2021), включающий 3300 наименований. Из них в «Реестр социально значимых объектов и объектов жизнеобеспечения, перерывы в работе которых могут привести к критическим последствиям для потребителей» (2022) (с данными о параметрах их энергоснабжения и функционирования), вошел 1861

объект. Данные об их состоянии, конструктивных особенностях, уязвимости к тем или иным погодно-климатическим явлениям ранее не собирались. Кроме того, на территории округа находятся потенциально опасные объекты, аварии на которых могут нанести значительный ущерб, включая здоровье населения, экосистемы и экономику. Анализ ситуации осложняется тем, что большинство потенциально опасных объектов находятся в ведении коммерческих структур. В результате от оценки воздействия климатообусловленных рисков на конкретные объекты было принято решение отказаться.

До момента подготовки Паспорта климатической безопасности на территории ХМАО специальная статистика по оценке риска для населения, включая отдельные его группы, подверженные негативному воздействию природно-климатических факторов, не велась (О состоянии..., 2022). Население округа невелико – немногим более 1.5 млн. чел., из которых 93% составляет городское население и 7% – сельское (Росстат, 2021). На территории ХМАО создано 105 муниципальных образований и расположено 195 населенных пунктов (Доклад об экологической ситуации..., 2021).

Сели, оползни, лавины и воднокаменные потоки характерны для малонаселенной части округа (Атлас Ханты-Мансийского..., 2004), что в значительной степени уменьшает подверженность важных объектов воздействию перечисленных опасных явлений.

Растительность ХМАО представлена сообществами лесов, болот, лугов, водоемов, горных тундр. Флора Югры насчитывает свыше 800 видов высших сосудистых растений (Атлас Ханты-Мансийского..., 2004). По данным государственного лесного реестра, по состоянию на 1 января 2022 года общая площадь земель автономного округа, на которых располагаются леса, составляет 50 396.9 тыс. га (Характеристика лесного фонда..., 2022). Региональной особенностью является переувлажнение. Около 37.3% (19 913.3 тыс. га) территории округа занимают болота, преимущественно верхового и переходного типа (Доклад об экологической ситуации..., 2021). Развитию болот способствуют равнинный рельеф, тектоническое опускание, слабая дренированность территории, избыточное увлажнение, а также низкие температуры (Биоразнообразие биомов..., 2020).

Уязвимость

С точки зрения уязвимости населения, типичными для районов Крайнего Севера являются различные формы патологий, вызываемые холодом (40% всех заболеваний приезжего населения): болезни верхних дыхательных путей, бронхиты, пневмония, миозиты, тонзиллиты, грипп, ангина, невралгия. Холодовая болезнь представляет собой глубокие нарушения центральной нервной системы и периферической нервной системы и связана не только с холодом, но и с характерной для Севера погодной ситуацией – низкой температурой воздуха в сочетании с сильным ветром и высокой влажностью (Русак и др., 2013; Агаджанян, Нотова, 2009; Пашнин и др., 2013).

Индекс теплосодержания воздуха, который характеризует суммарное количество тепла единицы массы воздуха, обусловленного внутренней энер-

гией воздуха и содержанием водяного пара в воздухе, на территории ХМАО колеблется в пределах от -3.175 ккал/кг (в Леушах) до -5.182 ккал/кг (в Нумто). То есть вся территория округа является абсолютно дискомфортной в холодный период года (Соколов, Кузнецова, 2019). Вывод подтверждается районированием территории России по природным условиям жизни населения, согласно которому ХМАО относится к условно неблагоприятной и неблагоприятной зонам природной дискомфортности (Природно-климатические условия..., 2018).

Наибольший экономический ущерб ХМАО нанесли половодья в 2007 и 2015 гг. (Ткачев, Досанов, 2020), которые усиливаются подпорными явлениями (Ткачев, 2015). По состоянию на 2011 г. был составлен перечень из 37 населенных пунктов, рекомендованных к переселению местных жителей, а для 61 пункта предлагалось строительство, укрепление или реставрация уже имеющихся водозащитных сооружений (Арктик-Энерджи, 2013). Более позднее обследование 23 населенных пунктов, расположенных на широтном участке средней Оби, показало: в 7 из них имеется полное или частичное берегоукрепление, в трех построены противопаводковые дамбы, но во всех случаях требуется реконструкция, строительство новых берегоукреплений и завершение имеющихся. В остальных населенных пунктах берегоукрепления отсутствуют. В 8 из них нецелесообразно строить берегоукрепление, но опасности эрозионной активности присутствуют, поэтому рекомендуется переселить граждан из зоны риска. В 5 населенных пунктах необходимость и целесообразность строительства берегоукрепительных сооружений подтверждена (Коркин, Исыпов, 2019).

За период половодья 2020 года на территории ХМАО было подтоплено 11 населенных пунктов. На отдельных участках федеральных автодорог образовывались области подпора тела дороги талыми водами в виду недостаточности водопропускных сооружений в местах временных и постоянных водотоков. В подобных условиях идет активное насыщение грунтов дорожной насыпи водой, что влечет за собой потерю несущей способности, просадку, увеличивая риск разрушения проезжей части (Материалы в ежегодный..., 2020).

Протаивание многолетнемерзлых пород несет опасность возникновения аварийных ситуаций на объектах нефтегазовой инфраструктуры округа (Атлас ХМАО, 2004; Атлас природных и техногенных..., 2010; Третий оценочный..., 2022).

Несмотря на высокую обводненность и заболоченность территории, природные пожары ежегодно наносят ущерб природным системам. Наиболее уязвимыми являются хорошо дренируемые местообитания. В 2010-2020 гг. ежегодно возникало от 200 до 1600 очагов возгораний (главным образом по вине человека). Площадь, пройденная огнем, колебалась от 1.2-1.5 тыс. га во влажные годы до 122-144 тыс. га в засушливые (Доклад об экологической ситуации..., 2021).

По данным МЧС, на территории ХМАО ежегодно происходит более двух чрезвычайных ситуаций природного характера регионального и межрегио-

нального уровня, что по классификации ведомства относится к высокому уровню опасности (Атлас природных и техногенных..., 2010). В большинстве случаев причиной возникновения являются опасные гидрометеорологические явления. Масштабы последствий характеризуются следующими показателями: зона чрезвычайной ситуации не выходит за пределы территории одного субъекта РФ (региональная) или затрагивает территорию двух и более субъектов РФ (межрегиональная), при этом количество пострадавших составляет свыше 50 человек, но не более 500 человек, либо материальный ущерб составляет свыше 5 млн. руб., но не более 500 млн. руб. Аналогичный уровень опасности отмечается, например, для территории Ленинградской и Иркутской области, Краснодарского, Хабаровского и Приморского края. Однако опасность чрезвычайных ситуаций федерального уровня (с ущербом свыше 500 млн. руб.) для ХМАО ниже, чем для перечисленных регионов (Атлас природных и техногенных..., 2010).

Характеристика климатообусловленных рисков по методике Минэкономразвития

Угрозы

Пороговые значения чувствительности (работоспособности) объектов воздействия при наличии фактора (факторов) климата различной интенсивности и продолжительности являются в высокой степени индивидуальными для подверженных опасным явлениям объектов. В качестве общей оценки ситуации можно рассматривать в качестве объекта территорию ХМАО. В таком случае пороговые значения будут соответствовать критериям опасных метеорологических явлений Обь-Иртышского УГМС.

На основе данных метеостанций и литературных материалов была собрана информация и выполнена оценка для 17 климатических факторов, включающих 14 опасных метеорологических явлений (очень сильный ветер, ураганный ветер, сильный ливень, очень сильный дождь, продолжительный сильный дождь, крупный град, очень сильный снег, сильная метель, сильное гололедно-изморозевое отложение, сильный мороз, сильная жара, аномально жаркая погода, аномально холодная погода, чрезвычайная пожароопасность) и три комплекса (сильный ветер и сильный снег, сильный ветер и сильный дождь (ливень), сильный ветер и град). В таблицы вносились данные о превышении критического порога и продолжительности. Примеры для очень сильного ветра, сильного мороза и комплекса из сильного ветра и сильного дождя (ливня) см. в табл. 4-6 ниже.

Предложенная Минэкономразвития форма не всегда позволяет корректно отразить продолжительность воздействия климатического фактора в соответствии с данными наблюдений. Так, если аномально холодная погода установилась на две недели, в форме отражается продолжительность только в течение 5 дней.

Иногда при заполнении формы выявляются разночтения между типовыми и региональными критериями опасного явления. Так, для сильного

мороза в руководящих документах пороговое значение для продолжительности явления не установлено (РД 52.27.724-2019, 2019; РД 52.88.699-2008, 2008), но в соответствии с региональными критериями температура ниже -45°C должна регистрироваться в течение не менее 3-х дней (Перечень и критерии..., 2014). В табл. 5 отмечена продолжительность 5 дней и 30 дней, т.к. трехдневный срок в данной форме не предусмотрен. При этом, по данным наблюдений, имеются сведения об экстремально низких температурах срочного разрешения. Соответственно, могли бы быть заполнены столбцы с продолжительностью воздействия климатического фактора для 12 и 24 часов.

Таблица 4. Значения интенсивности и продолжительность климатического фактора «сильный ветер» в формате Приложения 2 к методике Минэкономразвития (приказ Минэкономразвития..., 2021)

Table 4. Intensity and duration of the “strong wind” climatic factor in the format of Appendix 2 to the methodology of the Ministry of Economic Development (order of the Ministry of Economic Development..., 2021)

Очень сильный ветер	Возможная продолжительность воздействия климатического фактора								
	1 мин	1 час	12 часов	24 часа	5 дней	30 дней	3 месяца	6 месяцев	Год
Средняя скорость 20 м/с	+	+							
Порывы 25 м/с	+								
Средняя скорость 25 м/с	+	+							
Средняя скорость 27 м/с	+	+							
Средняя скорость 28 м/с	+	+							
Средняя скорость 30 м/с	+	+							
Средняя скорость 31 м/с	+	+							

Таблица 5. Значения интенсивности и продолжительность климатического фактора «сильный мороз» в формате Приложения 2 к методике Минэкономразвития (приказ Минэкономразвития..., 2021)

Table 5. Intensity and duration of the “strong frost” climatic factor in the format of Appendix 2 to the methodology of the Ministry of Economic Development (order of the Ministry of Economic Development ..., 2021)

Сильный мороз	Возможная продолжительность воздействия климатического фактора								
	1 мин	1 час	12 часов	24 часа	5 дней	30 дней	3 месяца	6 месяцев	Год
Ниже -45°C					+	+			
-50°C					+				
-53°C					+				
-58°C					+				

Таблица 6. Значения интенсивности и продолжительности климатического фактора для комплекса опасных явлений: «сильный ветер + сильный дождь (ливень)» в формате Приложения 2 к методике Минэкономразвития (приказ Минэкономразвития..., 2021)

Table 6. Intensity and duration of the climatic factor “complex of hazardous phenomena”: “strong wind + heavy rain (rain)” in the format of Appendix 2 to the methodology of the Ministry of Economic Development (order of the Ministry of Economic Development ..., 2021)

Сильный ветер Сильный дождь (ливень)	Возможная продолжительность воздействия климатического фактора								
	1 мин	1 час	12 часов	24 часа	5 дней	30 дней	3 месяца	6 месяцев	Год
20 м/с 21 мм	+	+							
20 м/с 75 мм	+	+							

Далее в соответствии с методикой происходит переход к другому списку из 24 климатических рисков для территории по уровням опасности (приказ Минэкономразвития..., 2021). Из них для 6 опасных метеорологических явлений (ураганы, смерчи, сильный ветер; жара; град; сильные атмосферные осадки; пожарная опасность в лесах) уже были охарактеризованы значения интенсивности и продолжительность климатического фактора. Для остальных явлений информация собиралась в соответствии с предложенными в методике индикаторами (Приложение 3 к приказу Минэкономразвития..., 2021; табл. 7).

В той или иной степени на территории ХМАО проявляются все риски (угрозы) из предложенного Минэкономразвития списка. В большинстве случаев опасность конкретного явления варьирует по годам, некоторые отмечаются достаточно редко. В целом, реализация менее опасных явлений закономерно происходит гораздо чаще, чем катастрофических. Об одном явлении (овражной термоэрозии) не удалось собрать информацию в соответствии с требуемыми индикаторами. Опасность других может быть недооценена, т.к. информация в регионе по предложенным индикаторам ранее не собиралась и не фиксировалась.

На основе анализа собранных данных было выявлено, что в той или иной степени на территории ХМАО проявляются все 24 климатических риска. Из них 7 (оползни; суффозия; эрозия плоскостная и овражная; наводнение; ураганы, смерчи, сильный ветер; жара; засуха) периодически достигают катастрофического уровня, 12 – весьма опасного (табл. 7). Рассмотрим критерии отнесения к уровню опасности (диапазону) для каждого из климатических рисков.

Риск возникновения оползней на территории округа оценивается как «опасный» и «умеренно опасный», т.к. подверженность территории ХМАО оползням составляет менее 10% (Атлас Ханты-Мансийского..., 2004) – горная часть занимает 6% площади округа. В результате развития оползневого процесса может сойти от 0.1 до 2.5 км² пород (Елохина и др., 2012; Абатурова и др., 2013).

Таблица 7. Распределение климатических рисков территории ХМАО по уровням опасности в формате Приложения 4 к методике Минэкономразвития (приказ Минэкономразвития..., 2021)

Table 7. Ranking of climatic risks in KhMAO by hazard levels in the format of Appendix 4 to the methodology of the Ministry of Economic Development (order of the Ministry of Economic Development ..., 2021)

	Климатические риски	Катастрофический (Чрезвычайно опасный)	Весьма опасный	Опасный	Умеренно опасный
		7	12	18	19
1	Оползни.	да	да	да	да
2	Сели	нет	нет	да	да
3	Лавины	нет	нет	да	да
4	Абразия и термоабразия	нет	да	да	да
5	Переработка берегов водохранилищ, озер	н/д	да	да	да
6	Карст	н/д	н/д	н/д	да
7	Суффозия	да	да	да	да
8	Просадочность лессовых пород	нет	нет	да	да
9	Подтопление территории	нет	да	нет	нет
10	Эрозия плоскостная и овражная	да	да	да	да
11	Русловые деформации	нет	да	да	да
12	Термоэрозия овражная	н/д	н/д	н/д	н/д
13	Термокарст	нет	да	нет	нет
14	Пучение	нет	нет	нет	да
15	Солифлюкция	нет	нет	да	нет
16	Наледеобразование	нет	нет	да	да
17	Наводнение	да	да	да	да
18	Ураганы, смерчи, сильный ветер	да	да	да	да
19	Жара	да	да	да	да
20	Засуха	да	да	да	да
21	Заморозки	нет	нет	да	да
22	Град	нет	нет	да	да
23	Сильные атмосферные осадки	нет	нет	да	да
24	Пожарная опасность в лесах	нет	нет	да	да

Сели классифицируются как «опасное» и «умеренно опасное» явление: подверженность территории сходу селей менее 10%, объем единовременного

выноса селевых потоков достигает 10-50 тыс. м³ (Справочник по опасным ..., 1997; Атлас природных и техногенных..., 2010).

Аналогично степень лавинной опасности характеризуется как «опасная» и «умеренно опасная»: менее 10% территории округа подвержено сходу лавин, объем единовременного выноса снега может достигать 100 тыс. м³ (Атлас Ханты-Мансийского..., 2004).

При развитии абразии и термоабразии скорость отступления береговой линии составляет в среднем 5 м/год, максимально – 21 м/год (Атлас Ханты-Мансийского..., 2004). Риск, связанный с проявлением данных процессов на территории округа, находится в диапазоне от «умеренно опасного» до «весьма опасного».

Скорость отступления берегов на отдельных участках водохранилищ и озер составляет 5-10 м/год, что по степени опасности находится в диапазоне от «умеренно опасного» до «весьма опасного» (Атлас Ханты-Мансийского..., 2004; Елохина и др., 2012).

Карст распространен на небольшой части территории округа. Коэффициент площадной закарстованности составляет 0.04-0.175, иногда превышает 0.2 для склонов Уральских гор (Елохина и др., 2012), что составляет не более 2% от территории округа. Данное явление относится к категории «умеренно опасной».

К одним из наиболее распространенных явлений на территории округа относится суффозия. Суффозионным просадкам подвержено до 80% территории ХМАО, что характеризует данное явление как «чрезвычайно опасное». Максимальная площадь проявления процесса достигает 410 м² на одном участке, а объем подверженных деформации горных пород – 0.451 тыс. м³, что классифицируется как «умеренно опасное» явление (Атлас Ханты-Мансийского..., 2004; Информационный бюллетень, 2022).

По данным МЧС, площадь развития лессов достигает 20% территории. При этом максимальная скорость развития процесса составляет 0.1 см/сут., т.е. соответствует рубежу между «умеренно опасным» и «опасным» уровнями (Атлас природных и техногенных..., 2010).

На территории ХМАО в зону подтопления (частичного и полного) попадают города и населенные пункты Березовского, Октябрьского, Белоярского, Кондинского, Нефтеюганского, Нижневартовского, Сургутского, Ханты-Мансийского районов, расположенные по берегам и в пределах пойм крупных рек Обь, Иртыш, Конда, Северная Сосьва и др. (Атлас природных и техногенных..., 2010). Более 75% территории подвержены риску подтопления, особенно в весенний период, что соответствует уровню «весьма опасный» (Атлас Ханты-Мансийского..., 2004; Атлас природных и техногенных..., 2010; Арктик-Энерджи, 2013; Доклад об экологической ситуации..., 2021).

Плоскостная и овражная эрозия развивается на 2% территории округа и классифицируются как «умеренно опасный» процесс (Информационный бюллетень, 2022). Средняя площадь одиночного оврага составляет 210-300 м² – «умеренно опасный» риск. Скорость развития овражной эрозии может колебаться от 2-5 м/год до 2500 м/год, что является «чрезвычайно опасным» явлением (Елохина и др., 2012; Большаник, 2014).

Скорость развития русловых процессов (русловые деформации) составляет 2-5 м/год, максимально – 25 м/год, вследствие чего данному явлению присвоены категории риска «опасный» и «весьма опасный» (Елохина и др., 2012; Коркин, 2014; Коркин, Кугушева, 2018).

Процесс пучения грунтов развивается на менее чем 5% территории округа со скоростью менее 0.5 см/год. Данное явление для ХМАО характеризуется как «умеренно опасное» (Атлас Ханты-Мансийского..., 2004).

Скорость развития солифлюкции составляет 0.1 м/год, что является «опасным» явлением (Елохина и др., 2012).

Наледеобразование может проявляться от 0.01 до 1 км² на одном участке и относится к следующим категориям риска: «умеренно опасный» и «опасный» (Национальный атлас России, 2007).

Риск наводнения (вследствие половодья, затора, зажора или катастрофического ливня) несет наибольшую опасность для здоровья населения и объектов инфраструктуры. Он включает все категории риска от «умеренно опасного» до «чрезвычайно опасного». Более 25% территории округа подвержено наводнениям, а длительность проявления процесса колеблется от менее 100 дней до >200 (максимум 222 дня), скорость развития составляет 0.1-2.2 м/сут. (Атлас Ханты-Мансийского..., 2004; Арктик-Энерджи, 2013).

Сильный ветер и ураганы фиксируются практически на всей территории округа (Атлас Ханты-Мансийского..., 2004). Их продолжительность достигает 2-3 часов, а скорость – от 20 м/с до 34 м/с максимально. Данные явления по степени воздействия относятся ко всем категориям риска (Отчет Обь-Иртышского УГМС..., 2018; Глобальное изменение климата..., 2021; Шамин и др., 2022).

«Жара» в методике Минэкономразвития (2021) оценивается только по одному показателю – площадь подверженности территории. Если рассматривать ее как случаи аномально жаркой погоды, тогда «жара» характерна для всей территории округа, но чаще проявляется на юге. Она отнесена к диапазону категорий опасности от «умеренно опасного» до «чрезвычайно опасного» (Доклад об экологической ситуации..., 2021).

Несмотря на высокую степень заболоченности и подверженность наводнениям, засухи регулярно фиксируются на территории ХМАО в равнинной части (т.е. более 70% площади округа) (Атлас Ханты-Мансийского..., 2004), что позволяет присвоить им максимальный уровень опасности. В методике Минприроды указан второй показатель – интенсивность (очень сильная, сильная, средняя, слабая), но не приведены критерии для выделения. Также не указано, о какой именно засухе идет речь: атмосферной, почвенной, или гидрологической. На территории округа число дней подряд с осадками менее 1 мм ежегодно составляет 16-20 (Богданович, Караваева, 2023). Данного уровня достаточно для возникновения природных пожаров (Доклад Природнадзора ХМАО, 2021), т.е. есть основания рассматривать уровень опасности в качестве «весьма опасного».

Риск заморозков (возврат холодов в вегетационный период) по охвату территории характеризуется в диапазоне от «умеренно опасного» до «чрезвычайно опасного», т.к. им подвержено до 90% территории округа (Атлас

Ханты-Мансийского..., 2004; Вавер, 2009). Критерии интенсивности заморозков не указаны, но известна их продолжительность – от 5 часов до более 12 часов (Арктик-Энерджи, 2013; Шамин и др., 2022).

Град также отнесен по площадному критерию ко всем категориям опасности – ему подвержена вся равнинная часть территории округа (Атлас Ханты-Мансийского..., 2004). С градом фиксируется более 2-х дней в году (средняя степень опасности), а его диаметр может достигать 45 мм (средняя степень опасности) (Шамин и др., 2022). В данном случае попытка прямого соотнесения уровня опасности в таблице Минприроды с критериями УГМС приводит к занижению значения показателя.

Сильные атмосферные осадки фиксируются в округе повсеместно, что позволяет отнести явление ко всем категориям в диапазоне от «умеренно опасного» до «чрезвычайно опасного». Как и в случае с градом, интенсивность осадков (количество в мм за определенное время) по методике Минэкономразвития (2021) не может превышать уровень «опасно». По данным наблюдений, сильный ливень в 2013 г. превысил стандартный порог опасного явления УГМС в 30 мм – выпало 46 мм в течение часа, а в результате очень сильных дождей периодически выпадает 55-88 мм (Шамин и др., 2022). Вероятно, методику стоит дополнить и присвоить экстремальным осадкам высокой интенсивности более высокий уровень опасности.

Риск пожарной опасности в лесах ХМАО классифицируется по методике Минэкономразвития (2021) как «умеренно опасный» и «опасный» – значение индекса Нестерова в регионе составляет $6000(^{\circ}\text{C})^2 \cdot \text{сут.}$ (Отчет Обь-Иртышского УГМС..., 2018), т.е. не достигает критических $10\,000(^{\circ}\text{C})^2 \cdot \text{сут.}$ Однако для округа Обь-Иртышским УГМС стандартный порог уровня чрезвычайной пожароопасности (5 класс) по индексу Нестерова был снижен до $6000(^{\circ}\text{C})^2 \cdot \text{сут.}$ (Перечень и критерии..., 2014). Таким образом, уровень риска было бы целесообразно поднять до «весьма опасного».

Прямая отсылка на критерии опасного явления Росгидромета вновь приводит к занижению опасности по методике Минэкономразвития. Значения по площади охвата зачастую входят в противоречие с градациями для интенсивности явлений. Например, для пожарной опасности можно было бы использовать градации ГОСТ Р 22.1.09-99 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования» (2000) (табл. 8). В таком случае умеренно опасный уровень соответствовал бы II классу пожарной опасности, а чрезвычайный присваивался бы при превышении $10\,000(^{\circ}\text{C})^2 \cdot \text{сут.}$ (с поправками на критерии региональных УНМС).

Методика Минэкономразвития также включает информацию об изменениях климата для территории региона, но в краткой сжатой форме, предпочтительно на основе данных Росгидромета. Обобщая литературные данные, можно ожидать, что к середине XXI в. по отношению к концу XX в. в западной и юго-западной части ХМАО возможно повышение температуры воздуха летнего сезона на 2-3 $^{\circ}\text{C}$, в восточной части – на 1-2 $^{\circ}\text{C}$. Суммы осадков летом могут возрасти на 5-10%. Зимой возможен еще более сильный рост темпера-

туры воздуха – на 5-8°C. Увеличение сумм осадков в зимний сезон на большей части округа ожидается в диапазоне 20-40%. Регион по-прежнему останется в зоне достаточного и избыточного увлажнения. Продолжительность залегания снежного покрова будет уменьшаться в соответствии с повышением сезонной температуры. Средняя скорость ветра незначительно уменьшится, как и на большей части территории страны (Глобальное изменение климата и УФО, 2012; Третий оценочный..., 2022).

Таблица 8. Шкала пожарной опасности в лесу по условиям погоды (по ГОСТ Р 22.1.09-99, 2000) (Методы оценки..., 2012)

Table 8. Levels of fire danger in the forest according to weather conditions (by GOST R 22.1.09-99, 2000) (Methods of assessment..., 2012)

Класс пожарной опасности по условиям погоды	Диапазон значений индекса горимости, (°C) ² ·сут.	Пожарная опасность
I	0-300	Отсутствует
II	301-1000	Малая
III	1001-4000	Средняя
IV	4001-10000	Высокая
V	>10000	Чрезвычайная

К середине и концу XXI века (в зависимости от сценариев изменения климата) по отношению к началу XX века прогнозируется повышение минимальных температур на 3-7°C и сокращение количества морозных дней на 17-48. Максимальные температуры вырастут на 2-6°C, число дней с температурой выше +35°C увеличится на 5-18. Максимальное число последовательно сухих дней (с осадками <1 мм) в большинстве сценариев сокращается, но в некоторых – увеличивается на 3-5 дней. Скорость наиболее сильных ветров увеличивается на 1-3%. Увеличение количества осадков может отразиться на увеличении вероятности и силы паводков (IPCC, 2019; Третий оценочный..., 2022).

Подверженность

Одним из критериев уровня опасности климатических рисков (Приложение 3 к приказу Минэкономразвития..., 2021) является «распространенность» явления по территории региона. Подверженность выражается в % от общей площади, градации варьируют в зависимости от характера явления (табл. 9). При этом площадь разового проявления может быть значительно меньше площади территории, на которой явление в пределах округа возможно. Для уточнения иногда вводится как дополнительный критерий, км².

В данном контексте подверженность охарактеризована выше при обосновании уровня опасности климатического риска и указывалось, что некоторые градации нуждаются в переоценке и доработке. Например, теоретическое подтопление 75-100% территории целесообразно относить к чрезвычайному уровню опасности, что ярко проявляется в условиях ХМАО.

Таблица 9. Примеры характеристики подверженности территории воздействию климатических рисков с типовыми градациями степени опасности (по приказ Минэкономразвития..., 2021)

Table 9. Examples the territory's exposure to climate risks parameters with typical levels of the danger degree (by the order of the Ministry of Economic Development ..., 2021)

Показатели риска	Уровень опасности в зависимости от подверженности территории, %			
	чрезвычайно опасный (катастрофический)	весьма опасный	опасный	умеренно опасный
Оползни	Более 30	11-30	1-10	0.1-1
Сели	-	Более 50	10-50	Менее 10
Лавины	-	Более 30	10-30	Менее 10
Карст	-	50-80	5-50	Менее 5
Суффозия	-	Более 10	2-10	Менее 2
Просадочность лессовых пород	-	60-70	50-60	30-50
Подтопление территории	-	75-100	50-75	Менее 50
Наледеобразование	-	5-10	1-5	Менее 1
Наводнение	50	25	15	10
Ураганы, смерчи, сильный ветер	70	30-70	30	20
Жара	70	30-70	30	20
Засуха	70	30-70	30	20
Сильные атмосферные осадки	70	30-70	30	20

Уязвимость

Качественное описание уязвимости территории ХМАО в методике Минэкономразвития связывается с климатическими факторами (опасными метеорологическими явлениями) и климатическими рисками в результате их реализации (Приложение 1 к приказу Минэкономразвития..., 2021). В отличие от Паспорта климатической безопасности, табличная форма позволяет лишь тезисно охарактеризовать основные направления и воздействия на целевые группы. С другой стороны, сжатый формат позволяет резюмировать итоги и удобен для принятия решений по адаптации к изменениям климата.

Большинство климатических факторов в той или иной степени удалось соотнести с уязвимостью здоровья населения, зданий и сооружений (в том

числе объектов нефтегазового комплекса), транспорта, сельского хозяйства, природных систем. В табл. 10 приведены примеры описания для сильного ветра, ливня, мороза и жары. По отношению к отдельным опасным гидрометеорологическим явлениям или их слабым проявлениям объекты могут быть малоуязвимы, но по отношению ко всему комплексу угроз уязвимость высока, на что указывает, например, высокая степень дискомфортности климата для проживания населения.

Таблица 10. Примеры климатических факторов и их связей с климатическими рисками и уязвимостью для территории ХМАО (Доклад о климатических рисках..., 2017; Третий оценочный доклад..., 2022; Атлас природных и техногенных..., 2010; Доклад о научно-методических основах..., 2020; Ревич и др., 2019; Доклад об экологической ситуации..., 2021; Кобышева и др., 2015; Васильев и др., 2017)

Table 10. Examples of climatic factors and their connections to climate risks and vulnerability for the territory of KHAMAO (Report on climate risks..., 2017; Third assessment report..., 2022; Atlas of natural and man-made..., 2010; Report on scientific and methodological foundations..., 2020; Revich et al., 2019; Report on the ecological situation..., 2021; Kobysheva et al., 2015; Vasiliev et al., 2017)

Фактор климата	Описание уязвимости	Описание рисков
Очень сильный ветер	<p>Прямая угроза жизни и здоровью людей, оказавшихся в зоне действия и не имеющих доступа к надежному укрытию</p> <p>Здания и объекты инфраструктуры могут быть повреждены как непосредственно (особенно при длительном воздействии), так и в результате удара переносимыми ветром объектами или обломками</p> <p>Скорость ветра 25 м/с для лесных экосистем считается критической – с этого момента начинаются ветровалы и ветроломы</p> <p>Для сельского хозяйства: возможно повреждение или полное уничтожение выращиваемых культур</p> <p>Возможны косвенные потери из-за вынужденного прекращения деятельности</p>	<p>Повышенный риск травматизма и преждевременной смертности</p> <p>Ущерб зданиям и объектам инфраструктуры, нарушение коммуникаций</p> <p>Рост расходов на содержание транспортных объектов, безопасность движения, снижение скорости транспортных потоков</p> <p>Резкое увеличение риска аварий на транспорте</p> <p>Риск повреждения и аварийных отключений объектов электросетевого хозяйства</p> <p>Потеря товарной древесины в результате ветровалов и ветроломов, увеличение расходов на лесовосстановление</p> <p>Повреждение или уничтожение с/х культур на значительных площадях</p>

Продолжение таблицы 10

Фактор климата	Описание уязвимости	Описание рисков
Сильный ливень	<p>Снижается качество воды в результате усиления площадного смыва</p> <p>Сильные дожди негативно сказываются на скорости транспортных потоков и безопасности дорожного движения. Несоответствие существующих дренажных систем ожидаемому увеличению интенсивности осадков может повлечь разрушение грунтовых зон автомобильных и железных дорог и других объектов. Рост количества и интенсивности осадков в теплое время года увеличит риски возникновения опасных последствий, связанных с потерей устойчивости склонов – оползней, селей</p> <p>Повышается вероятность речных ливневых наводнений, которые могут вызвать затопление и разрушение всей прибрежной инфраструктуры</p> <p>Климатическое увеличение среднегодовых, летне-осенних и зимних расходов воды усиливает вероятность досрочного размыва магистральных трубопроводов на подводных переходах</p>	<p>Увеличение числа заболеваний, передающихся через воду</p> <p>Риск подтопления и затопления населенных пунктов, дорог, разрушения мостов и путепроводов</p> <p>Рост расходов на содержание объектов ЖКХ для обеспечения их защиты от протекания, затопления и подтопления</p> <p>Рост расходов на содержание транспортных объектов, безопасность движения, снижение скорости транспортных потоков</p> <p>Резкое увеличение риска аварий на транспорте</p> <p>Риск размыва или подмыва дорожного полотна, железнодорожных путей</p> <p>Риск размыва магистральных трубопроводов на подводных переходах</p> <p>Повреждение объектов и инфраструктуры в результате развития эрозии, склоновых процессов (включая оползни)</p> <p>Риски для продовольственной безопасности, связанные со смывом сельхозкультур</p> <p>Ущерб от временного прекращения деятельности, например, в сфере туризма</p> <p>Ущерб из-за перебоев в энергообеспечении</p>
	<p>Наиболее уязвимы дети до лет, взрослые старше 60 лет, а также люди с заболеваниями сердечно-легочной и бронхо-сосудистой систем</p> <p>Уязвимость антропогенных систем проявляется в необходимости поддерживать</p>	

Продолжение таблицы 10

Фактор климата	Описание уязвимости	Описание рисков
Сильный мороз	<p>температуру, достаточную для нормального жизнеобеспечения и выполнения производственных процессов</p> <p>Повышение хрупкости и износа многих материалов, включая конструкционные</p> <p>Морозобоины могут явиться причиной развития инфекционных некрозов и заболеваний стволов деревьев</p> <p>Ослабление и гибель животных, в том числе домашних северных оленей</p>	<p>Повышенный риск травматизма, болезней и преждевременной смертности</p> <p>Рост расходов на отопление, более быстрый износ зданий и объектов инфраструктуры</p> <p>Рост расходов на содержание транспортных объектов, безопасность движения, поддержание бесперебойности коммуникаций</p> <p>Риск ущербов для лесного хозяйства и оленеводства, при промерзании водоемов – для рыбного промысла</p>
Сильная жара	<p>При превышении порога среднесуточной температуры 23.5°C резко увеличивается количество дополнительных смертей. Наиболее уязвимы младенцы до 3 лет, люди старше 60, беременные женщины и люди с заболеваниями сердечно-сосудистой и бронхо-легочной систем</p> <p>Рост бактериальной флоры в пище и воде приводит к вспышкам инфекционных заболеваний</p> <p>Возможно нарушение соответствующих санитарно-гигиенических показателей в домах старой постройки</p> <p>Происходит размягчение асфальтового покрытия и быстрое ухудшение эксплуатационных качеств автодорог</p> <p>При экстремально высоких температурах воздуха происходит значительный перегрев рельсов и последующая деформация железнодорожных путей,</p>	<p>Увеличение числа смертей и заболеваний системы кровообращения, цереброваскулярных заболеваний, заболеваний органов дыхания и эндокринной системы, особенно у лиц старше 65 лет, а также у людей с хроническими заболеваниями сердечно-сосудистой системы и органов дыхания</p> <p>Негативное воздействие на нервную систему человека, возможен рост суицидов</p> <p>Рост потребления энергии на обеспечение системы кондиционирования в жилых зданиях и на предприятиях</p> <p>Риск системных аварий, возникающих при одновременном резком увеличении энергопотребления, снижении генерации энергии и больших потерях на линиях электропередач</p>

Продолжение таблицы 10

Фактор климата	Описание уязвимости	Описание рисков
	<p>приводящая к уменьшению скорости передвижения и увеличивающая риск схода с рельсов подвижного состава</p> <p>Увеличение температуры в летний период провоцирует риски уменьшения добычи газа, так как превышение температурой отметки в 15°C приводит к падению мощности компрессорных станций и к уменьшению добычи топлива</p> <p>Риски снижения производительности нефтяных скважин, поскольку при таянии мерзлоты скважины деформируются и их последующее восстановление приводит к потерям добычи нефти на 10-20%</p> <p>Возрастание на 6°C наружной температуры в среднем вызывает уменьшение на 0.5% эффективности и падение на 3-4% выходной мощности газовой турбины</p> <p>При аномальных температурных условиях требуется снижение мощности энергоблоков или полная остановка</p>	<p>Рост расходов на содержание транспортных объектов, безопасность движения, снижение скорости транспортных потоков</p> <p>Резкое увеличение риска аварий на транспорте</p> <p>Увеличение риска лесных и торфяных пожаров</p> <p>Ущерб, связанные с уменьшением добычи газа и его транспортировкой</p>

*Характеристика ущербов
 как показатель климатического риска*

В качестве результата анализа климатических рисков за исторический период и Минприроды, и Минэкономразвития предлагают провести оценки потерь и ущербов в рублевом эквиваленте. Для рекомендуемого расчета возможного ущерба в соответствии с Единой межведомственной методикой оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификации и учета чрезвычайных ситуаций (2004) необходима совокупность данных, которые недоступны на данный момент в большинстве регионов России. Причина заключается в отсутствии налаженной системы сбора необходимых данных, их хранения и обработки.

Развитие деятельности по адаптации к изменениям климата на страновом и региональном уровне позволит в будущем успешно применять предложенную методику.

В качестве обобщенной оценки риска от опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлений для ХМАО в данном исследовании были использованы расчеты возможного экономического ущерба на основе Методологии Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО) (Кобышева и др., 2015; Васильев и др., 2017), адаптированного для получения индекса погодно-климатического риска в конкретном субъекте (муниципальном образовании) РФ (Васильев, Кобышева, 2019):

$$R_{\text{ЭК}} = \sum_i^n \left(p_i \cdot \frac{S_i}{S} \cdot t_i \cdot K_i \right) \cdot m \cdot D \sum_i^n \left(p_i \cdot \frac{S_i}{S} \cdot t_i \cdot K_i \right) \cdot m \cdot D,$$

где i – номер вида опасного явления или неблагоприятного явления, n – число видов опасных или неблагоприятных явлений в данном субъекте, p_i – повторяемость i -го вида явления; t_i – время воздействия i -го вида явления, сутки; S_i – средняя площадь воздействия i -го вида явления, кв. км; m – численность населения в субъекте РФ; S – площадь субъекта РФ, кв. км.; K_i – коэффициент агрессивности i -го вида явления, рассчитанный на основе учета непосредственного силового воздействия опасного или неблагоприятного явления на объекты инфраструктуры; D – часть годового валового регионального продукта субъекта РФ, приходящаяся на 1 жителя данного субъекта РФ и произведенная за 1 сутки (Кобышева и др., 2015; Васильев и др., 2017).

Значение индекса риска $R_{\text{ЭК}}$ для экономики ХМАО находится в диапазоне $3 \cdot 10^{-4}$ - 10^{-3} (Васильев и др., 2017), что ниже уровня, например, для Московской области или Краснодарского края.

В соответствии с полученными данными можно рассчитать возможный экономический ущерб ХМАО как произведение индекса риска субъекта на валовый региональный продукт (ВРП) субъекта.

В качестве показателя ВРП были использованы данные за 2021 г. – 4602.4 млрд. руб. (Правительство Ханты-Мансийского..., 2022). Таким образом, возможный экономический ущерб ХМАО от погодно-климатических рисков составит от 1.4 до 4.6 млрд. руб. в год, что превышает оценки ущерба в результате чрезвычайных ситуаций природного характера МЧС (Атлас природных и техногенных..., 2010).

Заключение

Сравнение результатов оценок климатических рисков по двум методикам

Обе методики для оценки климатического риска используют сходные определения, базирующиеся на классическом сочетании угрозы, подверженности и уязвимости.

Паспорт климатической безопасности представляет собой подробный многостраничный документ, включающий детальную информацию о климате и его изменениях, опасных гидрометеорологических явлениях и их последствиях (угрозы), о населении, природе и экономике (подверженность), а также уязвимости по отношению к опасным явлениям.

Оценка климатических рисков Минэкономразвития в сжатой форме суммирует информацию об опасных явлениях и их последствиях на основе разработанной системы количественных показателей (в том числе информации о подверженности), а также уязвимости объектов на территории региона.

Списки угроз, полученные на основе двух методик, оказались близки, включают опасные гидрометеорологические явления и их последствия, а также прогнозы изменений климата до середины и конца XXI века.

По методике Минприроды в качестве наиболее разрушительного явления, наносящего наибольший ущерб, выделяются половодья, которые могут сливаться с летними паводками и затягиваться до осени. Несмотря на то, что округ относится к районам Крайнего Севера и местностям, приравненным к ним, опасные явления, связанные с высокими температурами и засушливостью, регулярно фиксируются, по данным наблюдений. Площадь, пройденная огнем, в значительной степени варьирует и в засушливые годы может достигать 120-140 тыс. га. По оценке с использованием методики Минэкономразвития 7, явлений (оползни; суффозия; эрозия плоскостная и овражная; наводнение; ураганы, смерчи, сильный ветер; жара; засуха) периодически достигают катастрофического уровня. Для одного явления (овражной термоэрозии) не удалось собрать информацию по предложенным индикаторам, хотя наличие угрозы подтверждается по литературным источникам.

По подверженности и уязвимости опасным явлениям наблюдаются заметные различия между западной гористой частью округа (6%) и низкой выравненной основной территорией. По отношению к отдельным опасным гидрометеорологическим явлениям или их слабым проявлениям объекты на территории округа могут быть малоуязвимы, но по отношению ко всему комплексу угроз уязвимость ХМАО высока.

Климатические риски были описаны на качественном уровне, но выполнить количественные экономические расчеты по предложенным методикам и формулам не удалось в связи с отсутствием необходимых исходных данных. Для паспорта климатической безопасности была использована оценка ущербов от чрезвычайных ситуаций природного характера регионального и межрегионального уровня (Атлас природных и техногенных..., 2010). Их на территории ХМАО ежегодно происходит более двух, минимальный ущерб от каждого может затронуть свыше 50 человек, но не более 500 человек, либо материальный ущерб составляет свыше 5 млн руб., но не более 500 млн руб.

Для оценки рисков по методике Минэкономразвития была применена методика ГГО. Соответственно, возможный экономический ущерб ХМАО от погодно-климатических рисков составляет от 1. до 4. млрд руб. в год.

Прогнозы изменений климата по обеим методикам указывают на сохранение высокого уровня риска для явлений, связанных с осадками и снеготая-

нием, и даже возможное их увеличение при увеличении сезонного количества осадков. Одновременно увеличивается риск ущербов от опасных явлений, связанных с высокими температурами и засухливостью.

Результаты оценки климатических рисков по обеим методикам дополняют друг друга и закладывают основу для разработки мер по адаптации к изменениям климата на региональном уровне.

Трудности при использовании методик

Несогласованность методик между собой вынуждает проводить оценку климатических рисков и их компонентов (угроза-подверженность-уязвимость) дважды по разным индикаторам и в различных форматах.

В методике Минэкономразвития термин «подверженность» не согласуется с принятыми в климатологии классическими определениями. При этом в табличных формах подверженность территории выражается в % площади, на которой возможно проявление опасного явления, от общей площади территории региона, т.е. соответствует традиционному представлению.

В методике Минэкономразвития используются два набора климатических факторов (угроз) с разными индикаторами: опасные метеорологические явления в соответствии с перечнями и критериями региональных УГМС (Приложения 1 и 2) и опасные гидрометеорологические явления, а также их последствия со специально подобранными для данного документа индикаторами (Приложения 3 и 4).

Формат паспорта климатической безопасности вынуждает собирать информацию об объектах и процессах, связанных лишь косвенно с климатическими рисками (например, засоление почв, деградация лесов и земель, уменьшение биоразнообразия, изменение состояния популяций растений и животных, включенных в Красную книгу Российской Федерации, а также имеющих социально-экономическое значение и др.). Аналогичная информация должна отражаться в соответствующих докладах и других публикациях субъекта федерации, а не дублироваться, если климатический риск для данных объектов не подтвержден.

Степень детализации информации об угрозах, заложенная в обе методики, выходит за рамки информации, собираемой Росгидрометом, а также значительно превышает степень изученности регионов. Необходимы масштабные фундаментальные исследования по каждому из опасных явлений и их последствиям.

В обеих методиках исходно предполагается проводить оценку для конкретных объектов разного типа на основе данных об их состоянии и уязвимости по отношению к каждому из опасных гидрометеорологических явлений. Количество объектов высокой социальной и экономической значимости на территории каждого региона насчитывает несколько тысяч. Информация об их уязвимости и ущербах отсутствует. Для проведения детальной оценки климатических рисков необходимо внедрение системы сбора, обработки и хранения данных, начиная с уровня предприятий и муниципалитетов, а также инвентаризация объектов.

Отсутствие исходных данных об объектах, их стоимости и ущербах вынуждает вернуться к классическому определению климатического риска (угроза-подверженность-уязвимость) и выполнять оценку на качественном уровне.

Разработка региональных планов адаптации продемонстрировала острую нехватку квалифицированных специалистов, не только климатологов, но самых разных специальностей, которые могли бы компетентно оценивать климатические риски в их сферах деятельности во всех секторах экономики, на региональном и муниципальном уровнях.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Природнадзора ХМАО – ЮГРЫ в рамках НИР «Разработка паспорта климатической безопасности и оценка климатических рисков территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры», а также в рамках темы госзадания № АААА-А20-120070990079-6 ФГБУ «ИГКЭ».

Список литературы

Абатурова, И.В., Ковязин, И.Г., Тактуев, Е.М. (2013) Мониторинг природно-технической системы «Биатлонный комплекс» в г. Ханты-Мансийске, *Инженерная геология*, №. 1, с. 66-72.

Агаджанян, Н.А., Нотова, С.В. (2009) *Стресс, физиологические и экологические аспекты адаптации, пути коррекции*, Оренбург, ИПК ГОУ ОГУ, 274 с.

Алагулов, Д.А., Кузнецова, В.П., Середовских, Б.А. (2019) Влияние современного изменения климата на природные процессы (на примере территории ХМАО – Югры и стран Евросоюза), *XXI Всероссийская студенческая научно-практическая конференция Нижневартковского государственного университета*, Нижневартовск, Нижневартовский государственный университет, с. 26-32.

Антонов, С.Ю., Исаков, Г.Н. (2015) Динамика лесных пожаров и их экологических последствий на территории ХМАО – Югры, *Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ЕЛРПТ*, с. 10-13.

Арктик-Энерджи (2013) *Обследование водозащитных сооружений в населенных пунктах Ханты-Мансийского автономного округа – Югры с целью комплексной оценки состояния защиты населенных пунктов автономного округа в рамках реализации программы «Обеспечение экологической безопасности Ханты-Мансийского автономного округа – Югры в 2011-2013 годах»*. Итоговый отчет по государственному контракту от 14 июня 2011 г., 275 с.

Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций. Российская Федерация (2010) Под общ. ред. С.К. Шойгу, М., Дизайн, Информация, Картография, 696 с.

Атлас Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Природа и экология (2004) Под ред. Дикунец В.А. и др., Ханты-Мансийск, М., Роскартография, Мониторинг, т. 2, 152 с.

Биоразнообразие биомов России. Равнинные биомы (2020) Под ред. Г.Н. Огуревой, М., ИГКЭ, 623 с.

Богданович, А.Ю., Караваева, А.С. (2023) Оценка изменений основных метеорологических характеристик Ханты-Мансийского автономного округа – Югры по данным метеорологических станций, *Метеорология и гидрология*, в печати.

Большаник, П.В. (2014) Антропогенная трансформация рельефа природного парка г. Ханты-Мансийска, *Вестник Югорского государственного университета*, № 3 (34), с. 13-16.

Булыгина, О.Н., Веселов, В.М., Разуваев, В.Н., Александрова Т.М. (2022а) *Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России*. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549.

Булыгина, О.Н., Копылов, В.Н., Коршунова, Н.Н. (2013) Создание специализированной базы данных климатических характеристик региона на примере Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, *Вестник кибернетики*, № 12, с. 71-80.

Булыгина, О.Н., Разуваев, В.Н., Александрова, Т.М. (2022б) *Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТР)*, Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942.

Вавер, О.Ю. (2009) Анализ ресурсного потенциала формирования региональной территориальной рекреационной системы Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, *Вестник Нижневартковского государственного университета*, № 4, с. 23-40.

Васильев, М.П., Каширина, Е.В., Иванова, Е.В. (2017) Методология расчета погодно-климатических рисков в субъектах Российской Федерации с использованием реляционной базы данных, *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*, № 586, с. 21-33.

Васильев, М.П., Кобышева, Н.В. (2019) Об оценке погодно-климатических рисков в секторах экономики субъектов РФ, *Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации*, с. 525-527.

Глобальное изменение климата и Уральский федеральный округ. На пути к адаптации (2021) СПб, Климатический центр Росгидромета. *Научные технологии*, 12 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год (2022) М., 104 с.

Доклад об экологической ситуации в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре в 2020 году (2021), Ханты-Мансийск, 187 с.

Доклад об экологической ситуации в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре в 2021 году (2022), Ханты-Мансийск, 200 с.

Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации (2017), СПб, 106 с.

Доклад о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенции Росгидромета) (2020), Саратов, Амирит, 120 с.

Дегтярев, А.С., Драбенко, В.А., Драбенко, В.А. (2015) *Статистические методы обработки метеорологической информации. Учебник*, СПб, ООО «Андреевский издательский дом», 225 с.

Единая межведомственная методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификации и учета чрезвычайных ситуаций (2004) МЧС России, 118 с.

Елохина, С.Н., Елохин, В.А., Сеньюта, Т.Е. (2012) Экзогенные геологические процессы на территории Уральского федерального округа и оценка активности их проявления, *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 2, с. 173-177.

Информационный бюллетень «О состоянии недр территории Уральского федерального округа Российской Федерации за 2021 год» (2022) Екатеринбург, Роснедра, Гидроспецгеология, УРЦ ГМСН, 345 с.

Кобышева, Н.В., Акентьева, Е.М., Галюк, Л.П. (2015) *Климатические риски и адаптация к изменениям и изменчивости климата в технической сфере*, СПб, «Кириллица», 214 с.

Коркин, С.Е. (2014) *Экзогенная геодинамика в долинных ландшафтах таежной зоны восточной части территории Хмао – Югры*, Работа выполнена в рамках исполнения базовой части государственного задания № 2014/801 Минобрнауки России.

Коркин, С.Е., Исыпов, В.А. (2019) Геоэкологический анализ береговых зон населенных пунктов, расположенных на широтном участке Средней Оби, *Проблемы региональной экологии*, № 2, с. 43-47.

Коркин, С.Е., Кугушева, Д.А. (2018) Береговая эрозия на широтном участке Средней Оби, *Географические науки и образование*, с. 133-137.

Куплевацкий, С.В., Шабалина, Н.Н. (2020) Лесные пожары в Уральском федеральном округе и их влияние на экологию, *Леса России и хозяйство в них*, № 4 (75), с. 4-12.

Материалы в ежегодный Государственный доклад о состоянии защиты населения и территорий Ханты-Мансийского автономного округа – Югры

от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2020 г. (2021) Ханты-Мансийск, МЧС, 128 с.

Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем (2012) М., Росгидромет, 510 с.

Мурашко, Ю.А., Ширыкова, А.А., Пятова, П.Н., Наконечный, Н.В. (2020) Состояние атмосферы на территории ХМАО – Югры по данным исследования снега за период с 2016 по 2020 год, в кн.: *Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2020*, сборник статей по материалам международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2020» (14-17 сентября 2020 г.), под ред. Г.В. Кучерик, Ю.А. Омельчук, Севастополь, СевГУ, с. 394-398.

Национальный атлас России (2007) Т. 2, Природа. Экология, М., Роскартография, 495 с.

Национальный план мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года (2019) Утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 25 декабря 2019 г. № 3183-р.

О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре в 2021 году, Государственный доклад (2022), Ханты-Мансийск, Управление Роспотребнадзора по Ханты-Мансийскому автономному округу – Югре, ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре».

Отчет Обь-Иртышского УГМС «Расчет основных климатических характеристик для определения изменения климата на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры» в рамках государственной программы «Обеспечение экологической безопасности Ханты-Мансийского автономного округа – Югры на 2018-2025 годы и на период до 2030 года» (2018) Ханты-Мансийск, 42 с.

Пашнин, А.С., Ключ, И.В., Берестин, Д.К., Умаров, Э.Д. (2013) Компарментно-кластерная теория биосистем, *Сложность. Разум. Постнеклассика*, № 2, с. 57-76.

Перечень и критерии опасных природных явлений, действующие на территории деятельности ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС». Утверждено приказом ФГБУ «Обь-Иртышское УГМС» от 17.04.2014 № 93, Официальный сайт Обь-Иртышского УГМС: <http://omsk-meteo.ru/index.php/ru/home/opasnyeyavleniya/perechen-opasnykh-yavlenij>.

Постановление Правительства РФ № 1946 от 16.11.2021 г. «Об утверждении перечня районов Крайнего Севера и местностей, приравненных к районам Крайнего Севера, в целях предоставления государственных гарантий и компенсаций для лиц, работающих и проживающих в этих районах и местностях, признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации и признании не действующими на территории Российской Федерации некоторых актов Совета Министров СССР».

Постановление Правительства Ханты-Мансийского автономного округа – Югры от 26.12.2014 г. № 506-п «Об утверждении Схемы территориального планирования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры» (с изменениями на 1 октября 2021 года).

Правительство Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (2022) распоряжение от 27 мая 2022 г. «Об итогах социально-экономического развития Ханты-Мансийского автономного округа – Югры за 2021 год».

Приказ Министерства экономического развития РФ от 13 мая 2021 г. № 267 «Об утверждении методических рекомендаций и показателей по вопросам адаптации к изменениям климата».

Природно-климатические условия и социально-географическое пространство России (2018) Под ред. А.Н. Золотокрылина, В.В. Виноградова, О.Б. Глезер, М., Институт географии РАН, 154 с.

Проект OpenStreetMap. Гинсометрическая карта, URL: <https://www.openstreetmap.org/#map=9/61.3256/60.2902&layers=Y>.

Распоряжение Минприроды России № 16-р от 19.05.2021 «Об утверждении Типового паспорта климатической безопасности территории субъекта Российской Федерации».

РД 52.27.724 (2019) Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения, М., ФГБУ «Гидрометцентр России», 72 с.

РД 52.88.699 (2008) Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений, М., Росгидромет, 31 с.

Ревич, Б.А., Малеев, В.В., Смирнова, М.Д. (2019) Изменение климата и здоровье: оценки, индикаторы, прогнозы. Под ред. Ревича Б.А., Кокорина А.О, М., ИНП РАН, 196 с.

Росстат (2021) Численность населения Российской Федерации по полу и возрасту на 1 января 2021 года. Статистический бюллетень, М., Росстат, 443 с.

Русак, С.Н., Буров, И.Г., Митющенко, Н.А. (2013) Хаотическая динамика метеофакторов в условиях азиатского Севера РФ (на примере ХМАО – Югры), Сложность. Разум. Постнеклассика, № 3, с. 13-20.

Соколов, С.Н., Кузнецова, Э.А. (2019) Оценка условий жизни населения Хмао – Югры по биоклиматическим индексам, в кн.: Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы, т. 2. Под общ. редакцией С.А. Куролапа, Л.М. Акимова, В.А. Дмитриевой, Воронеж, Издательство «Цифровая полиграфия», с. 390-394.

Справочник по опасным природным явлениям в республиках, краях и областях Российской Федерации (1997) СПб, Гидрометеиздат, 588 с.

Ткачев, Б.П. (2015) Гидродинамические процессы устьевых областей реки Иртыш, Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, № 4, с. 44-52.

Ткачев, Б.П., Досанов, С.С. (2020) Экстремальные наводнения на реках Югры, *Успехи современного естествознания*, № 4, с.157-162.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2022) СПб Научно-технологические технологии, 676 с.

Федеральный закон «О гидрометеорологической службе» от 19.07.1998 № 113-ФЗ. 1998.

Характеристика лесного фонда Ханты-Мансийского автономного округа – Югры на 1 января 2022 года. Электронный ресурс. URL: <https://depprirod.admhmao.ru/deyatelnost/lesnoe-khozyaystvo-/760090/kharakteristika-lesnogo-fonda-khanty-mansiyskogo-avtonomnogo-okruga-yugry-na-1-yanvaryaya-2019-goda/>.

Шамин, С.И., Бухонова, Л.К., Санина, А.Т. «Сведения об опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлениях, которые нанесли материальный и социальный ущерб на территории России». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019621326.

Шерстюков, Б.Г. (2021) Лесные пожары на территории России и их связь с изменяющимися метеорологическими условиями, *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, вып. 188, с. 30-40.

Шишконокова, Е.А., Аветов, Н.А., Березина, Н.А., Толпышева, Т.Ю., Шведчикова, Н.К. (2016) Проявления регрессивных процессов на болотах южной части природного парка Нумто (Ханты-Мансийский автономный округ – Югра), *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический*, т. 121, № 3, с. 39-50.

IPCC (2014) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.

IPCC (2021) Gutiérrez, J.M., R.G. Jones, G.T. Narisma, L.M. Alves, M. Amjad, I.V. Gorodetskaya, M. Grose, N.A.B. Klutse, S. Krakovska, J.Li, D. Martínez-Castro, L.O. Mearns, S.H. Mernild, T. Ngo-Duc, B. van den Hurk, and J.-H. Yoon, 2021: Atlas. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R.Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. Interactive Atlas available from <http://interactive-atlas.ipcc.ch/>.

References

- Abaturova, I.V., Kovyazin, I.G., Taktuev, E.M. (2013) Monitoring prirodno-tekhnicheskoy sistemy «Biatlonnyy kompleks» v g. Khanty-Mansiyske [Monitoring of the natural and technical system "Biathlon Complex" in Khanty-Mansiysk], *Inzhenernaya geologiya*, vol. 1, pp. 66-72.
- Agadzhanyan, N.A., Notova, S.V. (2009) *Stress, fiziologicheskiye i ekologicheskiye aspekty adaptatsii, puti korrektsii* [Stress, physiological and environmental aspects of adaptation, ways of correction], Orenburg, Russia, IPK GOU OGU, 274 p.
- Alagulov, D.A., Kuznetsova, V.P., Seredovskikh, B.A. (2019) Vliyaniye sovremennogo izmeneniya klimata na prirodnyye protsessy (na primere territorii KHMAO – Yugry i stran Yevrosoyuza) [The impact of modern climate change on natural processes (on the example of the territory of Khanty-Mansi autonomous okrug – Yugra and the EU countries)], *XXI Vserossiyskaya studencheskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta*, Nizhnevartovsk, Nizhnevartovskiy gosudarstvennyy universitet, Russia, pp. 26-32.
- Antonov, S.YU., Isakov, G.N. (2015) Dinamika lesnykh pozharov i ikh ekologicheskikh posledstviy na territorii KHMAO – Yugry [Dynamics of forest fires and their environmental consequences on the territory of Khanty-Mansi autonomous okrug – Yugra], *Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti promyshlennno-transportnykh kompleksov ELPIT*, pp. 10-13.
- Arctic Energy (2013) *Obsledovaniye vodozashchitnykh sooruzheniy v naseleennykh punktakh Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry s tsel'yu kompleksnoy otsenki sostoyaniya zashchity naseleennykh punktov avtonomnogo okruga v ramkakh realizatsii programmy «Obespecheniye ekologicheskoy bezopasnosti Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry v 2011-2013 godakh»*. [Inspection of water protection structures in the settlements of the Khanty-Mansiysk autonomous okrug – Yugra with the aim of a comprehensive assessment of the state of protection of the settlements of the autonomous okrug within the framework of the program "Ensuring the environmental safety of the Khanty-Mansiysk autonomous okrug – Yugra in 2011-2013"], Itogovyy otchet po gosudarstvennomu kontraktu ot 14 iyunya 2011 g., Russia, 275 p.
- Atlas prirodnykh i tekhnogennykh opasnostey i riskov chrezvychaynykh situatsiy. Rossiyskaya Federatsiya* (2010) [Atlas of natural and man-made hazards and emergency risks. Russian Federation] In. S.K. Shoigu. (ed), Dizayn, Informatsiya, Kartografiya, Moscow, Russia, 696 p.
- Atlas Hanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry. Priroda i ekologiya* (2004) [Atlas of Khanty-Mansiysk autonomous okrug – Yugra. Nature and ecology] In Dikunets V.A. and others (eds.), Roskartografiya, Monitoring, vol. 2, Moscow, Russia, 152 p.
-

Bioraznoobraziye biomov Rossii. Ravninnyye biomy (2020) [Biodiversity of biomes in Russia. Plain biomes] In G.N. Ogureeva (ed), IGCE, Moscow, Russia, 623 p.

Bogdanovich, A.Yu., Karavaeva, A.S. (2023) Otsenka izmeneniy osnovnykh meteorologicheskikh kharakteristik Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry po dannym meteorologicheskikh stantsiy [Assessment of changes in major meteorological characteristics of Khanty-Mansi autonomous okrug – Yugra using data of meteorological stations], *Meteorologiya i gidrologiya*, in press.

Bol'shanik, P.V. (2014) Antropogennaya transformatsiya rel'efa prirodnogo parka g. Hanty-Mansijska [Anthropogenic transformation of the relief of the natural park of Khanty-Mansiysk], *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*, no. 3 (34), pp. 13-16.

Bulygina, O.N., Veselov, V.M., Razuvayev, V.N., Aleksandrova, T.M. (2022a). Opisaniye massiva srochnykh dannykh ob osnovnykh meteorologicheskikh parametrakh na stantsiyakh Rossii [Description of the array of regular data on the main meteorological parameters at the stations of Russia], *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2014620549*.

Bulygina, O.N., Kopylov, V.N., Korshunova, N.N. (2013) Sozdanie specializirovannoy bazy dannykh klimaticheskikh harakteristik regiona na primere Hanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry [Creation of a specialized database of climatic characteristics of the region on the example of Khanty-Mansi autonomous okrug – Yugra], *Vestnik kibernetiki*, no. 12, pp. 71-80.

Bulygina, O.N., Razuvayev, V.N., Aleksandrova, T.M. (2022b) Opisaniye massiva dannykh sutochnoy temperatury vozdukha i kolichestva osadkov na meteorologicheskikh stantsiyakh Rossii i byvshego SSSR (TTTR) [Description of the data array of daily air temperature and precipitation at meteorological stations in Russia and the former USSR (TTTR)], *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2014620549*.

Vaver, O.Yu. (2009) Analiz resursnogo potentsiala formirovaniya regional'noj territorial'noj rekreacionnoj sistemy Hanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry [Analysis of the resource potential of the formation of the regional territorial recreational system of the Khanty-Mansi autonomous okrug of Yugra], *Vestnik Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta*, no. 4, pp. 23-40.

Vasil'yev, M.P., Kashirina, Ye.V., Ivanova, Ye.V. (2017) Metodologiya rascheta pogodno-klimaticheskikh riskov v sub"ektah Rossijskoj Federacii s ispol'zovaniem relyacionnoj bazy dannykh [Methodology for calculating weather and climate risks in the regions of the Russian Federation using a relational database], *Trudy Glavnoj geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voejkova*, no. 586, pp. 21-33.

Vasil'yev, M.P., Kobysheva, N.V. (2019) Ob ocenke pogodno-klimaticheskikh riskov v sektorah ekonomiki sub"ektov RF [On the assessment of weather and climate risks in the sectors of the economy of the constituent entities of the Russian Federation], *Sovremennye problemy gidrometeorologii i ustojchivogo razvitiya Rossijskoj Federacii*, pp. 525-527.

Global'noye izmeneniye klimata i Ural'skiy federal'nyy okrug. Na puti k adaptatsii (2021) [Global climate change and the Ural Federal District. On the way to adaptation], Klimaticheskii sentr Rosgidrometa, Naukoyemkiye tekhnologii, St. Peterburg, Russia, 12 p.

Doklad o klimaticheskikh riskakh na territorii Rossiyskoy Federatsii (2017) [Report on climate risks in the Russian Federation], St. Peterburg, Russia, 106 p.

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2021 god (2022) [Report on climate features in the territory of the Russian Federation for 2021], Moscow, Russia, 104 p.

Doklad ob ekologicheskoy situatsii v Khanty-Mansiyskom avtonomnom okruge – Yugre v 2020 godu (2021) [Report on the environmental situation in the Khanty-Mansi autonomous okrug – Yugra in 2020], Khanty-Mansiysk, Russia, 187 p.

Doklad ob ekologicheskoy situatsii v Khanty-Mansiyskom avtonomnom okruge – Yugre v 2021 godu (2022) [Report on the environmental situation in the Khanty-Mansi autonomous okrug – Yugra in 2020], Khanty-Mansiysk, Russia, 200 p.

Degtyarev, A.S., Drabenko, V.A., Drabenko, V.A. (2015) *Statisticheskiye metody obrabotki meteorologicheskoy informatsii* [Statistical methods of meteorological information processing], ООО «Andreyevskiy izdatel'skiy dom», St. Peterburg, Russia, 225 p.

Yedinaya mezhvedomstvennaya metodika otsenki ushcherba ot chrezvychaynykh situatsiy tekhnogenogo, prirodnogo i terroristicheskogo kharaktera, a takzhe klassifikatsii i ucheta chrezvychaynykh situatsiy (2004) [A unified interdepartmental methodology for assessing damage from emergencies of a man-made, natural and terrorist nature, as well as for classifying and accounting for emergencies], MCHS Rossii, Russian Emergency Situations Ministry, Russia, 118 p.

Yelokhina, S.N., Yelokhin, V.A., Senyuta, T.Ye. (2012) *Ekzogennyye geologicheskie processy na territorii Ural'skogo federal'nogo okruga i ozenka aktivnosti ih proyavleniya* [Exogenous geological processes on the territory of the Ural Federal District and assessment of the activity of their manifestation], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy, Gornyy zhurnal*, no. 2, pp. 173-177.

Informatsionnyy byulleten' «O sostoyanii neдр territorii Ural'skogo federal'nogo okruga Rossiyskoy Federatsii za 2021 god» (2022) [Information bulletin "On the state of the subsoil of the territory of the Ural Federal District of the Russian Federation for 2021"], Yekaterinburg, Rosnedra, Gidrospetsgeologiya, URTS GMSN, Yekaterinburg, Russia, 345 p.

Kobysheva, N.V., Akent'yeva, Ye.M., Galyuk, L.P. (2015) *Klimaticheskkiye riski i adaptatsiya k izmeneniyam i izmenchivosti klimata v tekhnicheskoy sfere* [Climate risks and adaptation to climate change and climate variability for technical systems], Kirillitsa, St. Peterburg, Russia, 214 p.

Korkin, S.Ye. (2014) *Ekzogennaya geodinamika v dolinnykh landshaftakh tayezhnoy zony vostochnoy chasti territorii Khmao – Yugry* [Exogenous geodynamics in the valley landscapes of the taiga zone in the eastern part of Khmao – Yugra territory], *Rabota vypolnena v ramkakh ispolneniya bazovoy chasti gosudarstvennogo zadaniya № 2014/801 Minobrnauki Rossii* – The work was carried out as part of the implementation of the basic part of the state task No. 2014/801 of the Ministry of Education and Science of Russia.

Korkin, S.Ye., Isypov, V.A. (2019) *Geoekologicheskij analiz beregovykh zon naselennykh punktov, raspolozhennykh na shirotnom uchastke srednej Obi* [Geoecological analysis of coastal zones of settlements located on the latitudinal section of the middle Ob'], *Problemy regional'noj ekologii*, no. 2, pp. 43-47.

Korkin, S.Ye., Kugusheva, D.A. (2018) *Beregovaya eroziya na shirotnom uchastke Srednej Obi* [Coastal erosion in the latitudinal section of the Middle Ob], *Geograficheskie nauki i obrazovanie*, pp. 133-137.

Kuplevatskiy, S.V., Shabalina, N.N. (2020) *Lesnyye pozhary v Ural'skom federal'nom okruge i ikh vliyaniye na ekologiyu* [Forest fires in the Ural Federal District and their impact on the environment], *Lesn Rossii i khozyaystvo v nikh*, no. 4 (75), pp. 4-12.

Materialy v yezhegodnyy gosudarstvennyy doklad o sostoyanii zashchity naseleniya i territoriy Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry ot chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera v 2020 g. (2021) [Materials in the annual state report on the state of protection of the population and territories of the Khanty-Mansiysk autonomous okrug – Yugra from natural and man-made emergencies in 2020], Khanty-Mansiysk, MCHS, Russia, 128 p.

Metody otsenki posledstviy izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem [Methods for assessing the consequences of climate change for physical and biological systems] (2012) M., Russia, Rosgidromet, 510 s.

Murashko, Yu.A., Shirykova, A.A., Pyatova, P.N., Nakonechny, N.V. (2020) *Sostoyanie atmosfery na territorii HMAO – Yugry po dannym issledovaniya snega za period s 2016 po 2020 god, V kn.: Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bezopasnost' – 2020: sbornik statej po materialam mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bezopasnost' – 2020» (14–17 sentyabrya 2020 g.)* [The state of the atmosphere on the territory of Khanty-Mansi autonomous okrug – Yugra according to snow studies for the period from 2016 to 2020. –Ecological, industrial and energy security – 2020: collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference "Environmental, industrial and energy security – 2020" (September 14-17, 2020)], Pod red. G.V. Kucherik, YU.A. Omel'chuk, Sevastopol, Russia, SevGU, pp. 394-398.

Natsional'nyy atlas Rossi (2007) [National Atlas of Russia], T. 2. Priroda, Ekologiya, Roskartografiya, Moscow, Russia, 495 p.

Natsional'nyy plan meropriyatiy pervogo etapa adaptatsii k izmeneniyam klimata na period do 2022 goda (2019) [National action plan for the first stage of adaptation to climate change for the period up to 2022], Utverzhden Rasporyazheniyem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 25 dekabrya 2019 g. № 3183-r.

O sostoyanii sanitarno-epidemiologicheskogo blagopoluchiya naseleniya v Khanty-Mansiyskom avtonomnom okruge – Yugre v 2021 godu: Gosudarstvennyy doklad (2022) [On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population in the Khanty-Mansi autonomous okrug – Yugra in 2021: State report], Khanty-Mansiysk, Upravleniye Rospotrebnadzora po Khanty-Mansiyskomu avtonomnomu okrugu – Yugre, Russia.

Otchet Ob'-Irtyskogo UGMS «Raschet osnovnykh klimaticheskikh kharakteristik dlya opredeleniya izmeneniya klimata na territorii Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry» v ramkakh gosudarstvennoy programmy «Obespecheniye ekologicheskoy bezopasnosti Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry na 2018-2025 gody i na period do 2030 goda» (2018) [Report of Ob-Irtysk UGMS "Calculation of the main climatic characteristics to determine climate change in the Khanty-Mansi autonomous okrug – Yugra" within the framework of the state program "Ensuring the environmental safety of the Khanty-Mansi autonomous okrug – Yugra for 2018-2025 and for the period up to 2030"], Khanty-Mansiysk, Russia, 42 p.

Pashnin, A.S., Klyus, I.V., Berestin, D.K., Umarov, E.D. (2013) Kompartimentno-klasternaya teoriya biosystem [Compartment-cluster theory of biosystems], *Slozhnost'. Razum. Postneklassika*, № 2, pp. 57-76.

Perechen' i kriterii opasnykh prirodnykh yavleniy, deystvuyushchiye na territorii deyatel'nosti FGBU «Ob'-Irtyskoye UGMS» [The list and criteria of natural hazards in force on the territory of the FSBI "Ob-Irtysk UGMS". Approved by order of the Federal State Budgetary Institution "Ob-Irtysk UGMS" dated April 17]. Utverzhdeno prikazom FGBU «Ob'-Irtyskoye UGMS» ot 17.04.2014 № 93 – Approved by order of the Federal State Budgetary Institution "Ob-Irtysk UGMS" dated April 17, 2014, no. 93. – Official website of the Ob-Irtysk UGMS, <http://omsk-meteo.ru/index.php/ru/home/opasnye-yavleniya/perechen-opasnykh-yavlenij>.

Postanovleniye Pravitel'stva RF № 1946 ot 16.11.2021 g. «Ob utverzhdenii perechnya rayonov Kraynego Severa i mestnostey, priravnennykh k rayonam Kraynego Severa, v tselyakh predostavleniya gosudarstvennykh garantiy i kompensatsiy dlya lits, rabotayushchikh i prozhivayushchikh v etikh rayonakh i mestnostyakh, priznaniiy utrativshimi silu nekotorykh aktov Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii i priznaniiy ne deystvuyushchimi na territorii Rossiyskoy Federatsii nekotorykh aktov Soveta Ministrov SSSR» [Decree of the Government of the Russian Federation No. 1946 of November 16, 2021 "On approval of the list of regions of the Far North and localities equated to regions of the Far North, in order to provide state guarantees and compensations for persons working and living in these regions and localities, recognizing as invalid some acts of the Government of the Russian

Federation and the recognition of certain acts of the Council of Ministers of the USSR as invalid on the territory of the Russian Federation], Russia.

Postanovleniye Pravitel'stva Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry № 506-p ot 26.12.2014 g. «Ob utverzhdenii Skhemy territorial'nogo planirovaniya Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry» (s izmeneniyami na 1 oktyabrya 2021 goda) [Decree of the Government of the Khanty-Mansiysk autonomous okrug – Yugra No. 506-p dated December 26, 2014 "On Approval of the Spatial Planning Scheme of the Khanty-Mansiysk autonomous okrug – Yugra" (as amended on October 1, 2021)], Russia.

Pravitel'stvo Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry (2022) Rasporyazheniye ot 27 maya 2022 g. «Ob itogakh sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry za 2021 god» [Order of May 27, 2022 "On the results of the socio-economic development of the Khanty-Mansiysk autonomous okrug – Yugra for 2021", Russia].

Prikaz Ministerstva ekonomicheskogo razvitiya RF ot 13 maya 2021 g. N 267 «Ob utverzhdenii metodicheskikh rekomendatsiy i pokazateley po voprosam adaptatsii k izmeneniyam klimata» [Order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation of May 13, 2021, no. 267 "On approval of methodological recommendations and indicators on adaptation to climate change"], Russia.

Prirodno-klimaticheskiye usloviya i sotsial'no-geograficheskoye prostranstvo Rossii (2018) [Natural and climatic conditions and the socio-geographical space of Russia], in: A.N. Zolotokrylin, V.V. Vinogradova, O.B. Glezer (eds.), Institut geografii RAN, Moscow, Russia, 154 p.

Proyekt OpenStreetMap. Gipsometricheskaya karta [The OpenStreetMap project. Hypsometric map]. Electronic resource. URL: <https://www.openstreetmap.org/#map=9/61.3256/60.2902&layers=Y>.

Rasporyazheniye Minprirody Rossii № 16-r ot 19.05.2021 «Ob utverzhdenii Tipovogo pasporta klimaticheskoy bezopasnosti territorii sub'yekta Rossiyskoy Federatsii» [Decree of the Ministry of Natural Resources of Russia No. 16-r from 19 May 2021 "On Approval of the Model Climate Safety Passport for the Territory of a Subject of the Russian Federation"], Russia.

RD 52.27.724-2019 (2019) *Nastavleniye po kratkosrochnym prognozam pogody obshchego naznacheniya. 2019* [Manual on short-term weather forecasts for general purposes], FGBU «Gidromettsentr Rossii», Moscow, Russia, 72 p.

RD 52.88.699-2008 (2008) *Polozheniye o poryadke deystviy uchrezhdeniy i organizatsiy pri ugroze vozniknoveniya i vozniknovenii opasnykh prirodnykh yavleniy. 2008* [Regulations on the procedure for actions of institutions and organizations in the event of a threat of occurrence and occurrence of hazardous natural phenomena], Rosgidromet, Moscow, Russia, 31 p.

Revich, B.A., Maleyev, V.V., Smirnova, M.D. (2019) *Izmeneniye klimata i zdorov'ye: otsenki, indikatory, prognozy* [Climate Change and Health:

Assessments, Indicators, Forecasts], in: B.A. Revich and A.O. Kokorin (eds), INP RAN, Moscow, Russia, 196 p.

Rosstat (2021) *Chislennost' naseleniya Rossiyskoy Federatsii po polu i vozrastu na 1 yanvarya 2021 goda. Statisticheskiy byulleten'* [Population of the Russian Federation by sex and age as of January 1, 2021. Statistical Bulletin], M., Rosstat, Russia, 443 p.

Rusak, S.N., Burov, I.G., Mityushchenko, N.A. (2013) Khaoticheskaya dinamika meteofaktorov v usloviyakh aziatskogo Severa RF (na primere KHMАО – Yugry) [Chaotic dynamics of meteorological factors in the conditions of the Asian North of the Russian Federation (on the example of Khanty-Mansi autonomous okrug – Yugra)], *Slozhnost'. Razum. Postneklassika*, № 3, pp. 13-20.

Sokolov, S.N., Kuznetsova, E.A. (2019) Ocenka uslovij zhizni naseleniya Hmao – Yugry po bioklimaticheskim indeksam, v kn.: *Global'nye klimaticheskie izmeneniya: regional'nye efekty, modeli, prognozy* [Assessment of the living conditions of Khmao – Yugra to people by bioclimatic indices. – Global climate change: regional effects, models, forecasts], in S.A. Kurolap, L.M. Akimov, V.A. Dmitriev (eds), *Tsifrovaya poligrafiya*, vol. 2, Voronezh, Russia, pp. 390-394.

Spravochnik po opasnym prirodnyim yavleniyam v respublikakh, krayakh i oblastiakh Rossiyskoy Federatsii (1997) [Reference book on hazardous natural phenomena in the republics, territories and regions of the Russian Federation], Gidrometeoizdat, St. Peterburg, Russia, 588 p.

Tkachev, B.P. (2015) Gidrodinamicheskie processy ust'evykh oblastej reki Irtysh [Hydrodynamic processes of the mouth areas of the Irtysh River], *Vodnoe khozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, no. 4, pp. 44-52.

Tkachev, B.P., Dosanov, S.S. (2020) Ekstremal'nye navodneniya na rekah Yugry [Extreme floods on the Yugra rivers], *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, no. 4, pp. 157-162.

Tretiy otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii (2022) [Third Assessment Report on Climate Change and its Consequences in the Territory of the Russian Federation], Naukoyemkiye tekhnologii, Peterburg, Russia, 676 p.

Federal'nyy zakon «O gidrometeorologicheskoy sluzhbe» (1998) [Federal law "On the Hydrometeorological Service"] ot 19.07.1998 г. N 113-ФЗ, Russia.

Kharakteristika lesnogo fonda Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry na 1 yanvarya 2022 goda [Characteristics of the forest fund of the Khanty-Mansiysk autonomous okrug – Yugra on January 1, 2022]. Electronic resource. URL: <https://depprirod.admhmao.ru/deyatelnost/lesnoe-khozyaystvo-/760090/kharakteristika-lesnogo-fonda-khanty-mansiyskogo-avtonomnogo-okruga-yugry-na-1-yanvarya-2019-goda/>.

Rosstat (2021) *Chislennost' naseleniya Rossiyskoy Federatsii po polu i vozrastu na 1 yanvarya 2021 goda. Statisticheskiy byulleten'* [Population of the

Russian Federation by sex and age as of January 1, Statistical bulletin], Rosstat, Moscow, Russia, 443 p.

Shamin, S.I., Bukhonova, L.K., Sanina, A.T. «Svedeniya ob opasnykh i neblagopriyatnykh gidrometeorologicheskikh yavleniyakh, kotoryye nanesli material'nyy i sotsial'nyy ushcherb na territorii Rossii» ["Information about dangerous and unfavorable hydrometeorological phenomena that caused material and social damage on the territory of Russia"]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2019621326 – Certificate of state registration of the database No. 2019621326.*

Sherstyukov, B.G. (2021) Lesnyye pozhary na territorii Rossii i ikh svyaz' s izmenyayushchimisya meteorologicheskimi usloviyami [Forest fires in Russia and their relationship with changing meteorological conditions], *Trudy VNIIGMI-MTSD*, Obninsk, Russia, vyp. 188, pp. 30-40.

Shishkonakova, E.A., Avetov, N.A., Berezina, N.A., Tolpysheva, T.Yu., Shvedchikova, N.K. (2016) Proyavleniya regressivnykh processov na bolotah yuzhnoj chasti prirodnogo parka Numto (Hanty-Mansijskiy avtonomnyy okrug – Yugra) [Manifestations of regressive processes in the swamps of the southern part of the Numto Natural Park (Khanty-Mansi autonomous okrug – Yugra)], *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelej prirody. Otdel biologicheskij*, vol. 121, no. 3, pp. 39-50.

IPCC (2014) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.

IPCC (2021) Gutiérrez, J.M., R.G. Jones, G.T. Narisma, L.M. Alves, M. Amjad, I.V. Gorodetskaya, M. Grose, N.A.B. Klutse, S. Krakovska, J. Li, D. Martínez-Castro, L.O. Mearns, S.H. Mernild, T. Ngo-Duc, B. van den Hurk, and J.-H. Yoon, 2021: Atlas. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. Interactive Atlas available from Available from <http://interactive-atlas.ipcc.ch/>.

Статья поступила в редакцию (Received): 09.03.2023.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 20.03.2023.

Принята к публикации (Accepted): 20.05.2023.

Адаптация к изменению климата как путь снижения рисков для бизнеса

О.А. Анисимов^{1),2)}, И.В. Гайда^{2),3)}, А. Му⁴⁾*

¹⁾Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Государственный гидрологический институт»,
Россия, 199053, г. Санкт Петербург, 2-ая линия В.О., д. 23

²⁾Сколковский институт науки и технологий,
Россия, 143005, Московская обл., Инновационный центр Сколково,
Большой бульвар, д. 30, стр. 1

³⁾Компания Новатэк,
Россия, 119415, г. Москва, ул. Удальцова, 2

⁴⁾Институт им. Ф. Нансена,
Норвегия, 1366, Лисакер

*Адрес для переписки: Anisimov.travel@gmail.com

Реферат. В статье рассматривается эволюция проблемы изменения климата в России и ее трансформация из сферы академических исследований в область принятия управленческих и инвестиционных решений государства и бизнеса. Анализируются механизмы государственного регулирования адаптации к изменению климата и примеры их применения в России за последнее десятилетие. Исследуются механизмы инвестиционного регулирования бизнес-проектов и конкурентоспособности компаний и предприятий с учетом принципов ESG (Environment, Society, Governance). Рассматривается дилемма бизнеса по максимизации прибыли и затратам на адаптацию к изменению климата в целях устойчивого развития. Обосновывается вывод о том, что адаптация предприятий и компаний к изменению климата на основе принципов ESG в средне- и долгосрочной перспективе ведет к снижению экономических рисков, увеличению конкурентоспособности на мировых рынках и прибыли.

Ключевые слова. Изменение климата, риски, адаптация, бизнес, устойчивое развитие, ESG.

Adaptation to climate change as a factor of lowering business risks

O.A. Anisimov^{1),2)}, I.V. Gayda^{2),3)}, A. Moe⁴⁾*

¹⁾State Hydrological Institute,
23, Second Line V.O., 199053, Saint-Petersburg, Russian Federation

²⁾Skolkovo institute of science and technology,
30, Grand Boulevard, 143005, Moscow region, Russian Federation

³⁾NOVATEK company,
2, Udaltsova str., 119415, Moscow, Russian Federation

⁴⁾Fridtjof Nansen Institute,
1366, Lysaker, Norway

*Correspondence address: *Anisimov.travel@gmail.com*

Abstract. The paper is focused on the evolution of the problem of climate change in Russia and its transition from academic research to decision making and investment policies of the Government and business. The mechanisms of state regulation of adaptation to climate change and examples of their application in Russia over the past decade are analyzed. The mechanisms of investment regulation of business projects and the competitiveness of companies and enterprises are studied, taking into account the principles of ESG (Environment, Society, Governance). The business dilemma of maximizing profits and costs of adapting to climate change for sustainable development is considered. The conclusion is substantiated that the adaptation of enterprises and companies to climate change based on the principles of ESG in the medium and long term leads to a reduction in economic risks, an increase in competitiveness in world markets and profits.

Keywords. Climate change, risks, adaptation, business, sustainable development, ESG.

Введение

Изменение климата во многих регионах России уже привело к экономическим потерям, поскольку некоторые виды природопользования, инфраструктура и эксплуатационные нормативы не были на них рассчитаны. На это указывают как последние, так и достаточно давние исследования, которые исследуют причины катастрофических наводнений в Ленске (2001), на Кубани (2012) и на Амуре (2013); аварии трубопроводов, разрушения домов, автомобильных и железных дорог, вызванные деградацией и уменьшением несущей способности многолетней мерзлоты (Анисимов, 2010; Анисимов и др., 2014; Гребенец, 2007; Гребенец, Ухова, 2008; Стрелецкий и др., 2012); лесные пожары, болезни и гибель леса от вредителей (Шерстюков, Шерстюков, 2013). В отличие от многих стран, в России изменение климата несет не только потери и риски, но и открывает новые потенциальные возможности (Anisimov, 2016). Уже в ранних исследованиях отмечается увеличение водных ресурсов на большей части территории России (за исключением южных регионов, (Шикломанов и др., 2005; Шикломанов, Шикломанов, 2003); улучшение агроклиматического потенциала в ряде регионов и расширение к северу границы устойчивого земледелия (Гордеев, Кирюшин, 2012; Павлова, 2013; Павлова, Сиротенко, 2012; Сиротенко и др., 2011); увеличение продуктивности растительности в бореальной зоне и смещение к северу границы леса

(Чебакова, Парфенова, 2006; Чебакова и др., 2003); улучшение условий навигации вдоль северного морского пути (Мохов, Хон, 2008; Хон, Мохов, 2010). Сочетание многочисленных климатических рисков и потенциальных выгод от изменения климата не только значительно осложняет разработку однозначной общегосударственной климатической политики в России, но и порождает множество неопределенностей для планирования развития бизнеса, основанного на природопользовании, и предприятий в регионах, где изменения климата и природной среды выражены наиболее сильно. Между тем, без такой политики Россия и ее бизнес-сообщество даже в отсутствие неблагоприятных геополитических факторов не смогут занимать значимые ниши в международном экономическом пространстве, поскольку в нем климатическая повестка уже продолжительное время является одной из основных.

В статье проблема изменения климата, последствия этих изменений и вопросы формирования климатической политики России рассматриваются в контексте проблем, возникающих в этой связи перед бизнес-сообществом. Для бизнеса проблема является достаточно новой, но значение ее постоянно растет по трем причинам. Первая наиболее важная причина, закреплённая рядом недавних постановлений Правительства РФ и иных регламентирующих документов, – официальная позиция государства по вопросам климата, которая предусматривает разработку и реализацию министерствами и регионами России конкретных мер по адаптации. Вторая причина – изменение климата непосредственно влияет на производственную инфраструктуру, технологии и ресурсную базу для многих видов деятельности. Канонический пример – инфраструктура топливно-энергетического комплекса в районах Крайнего Севера, подверженная деструктивному воздействию таяния многолетней мерзлоты. Еще один пример – климатообусловленные изменения растительной зональности и биопродуктивности, которые меняют ресурсную базу лесной промышленности в традиционных районах лесозаготовительной и перерабатывающей деятельности. И немаловажная третья причина – изменение политики крупнейших международных инвестиционных компаний, при которой одним из важнейших критериев оценки проектов является соответствие их принципам устойчивого развития окружающей среды, общества и государства (Environment, Society, Governance, далее в статье ESG).

Статья междисциплинарна не только по содержанию, но и по авторскому коллективу. В него входят представители российской академической науки (О.А. Анисимов, ГГИ, Росгидромет), крупного бизнеса (И.В. Гайда, член совета директоров «Новатэк») и норвежского института изучения глобальной экологической политики и энергетических проблем (А. Му, Институт Нансена). Притом, что авторы старались придерживаться стандартной для журнала рубрикации, статья имеет значительный уклон в сторону социально-экономических, политических и финансовых механизмов формирования климатической политики. Это обуславливает использование соответствующих нетрадиционных для климатологии исходных данных и методов исследования, широко применяемых в общественных науках, а также непривычный для читателей формат статьи, в котором доминирующую роль играет дискуссия и

обсуждение не столько результатов количественного анализа конкретных данных, сколько документов, позиционирующих государство по проблеме изменения климата, и их значение для бизнеса.

Методологические замечания

В качестве первичных данных в статье используются знаковые научные события, документы, постановления Правительства РФ и государственные соглашения с участием России за последнее десятилетие, регламентирующие политику страны в отношении адаптации к изменению климата. Они сопоставляются с хронологией аналогичных событий на международном уровне.

Впервые вопрос о климатическом позиционировании страны на государственном уровне был сформулирован в Климатической доктрине России, принятой в декабре 2009 г. Следующим знаковым событием стала первая в России международная конференция "Проблемы адаптации к изменениям климата" (ПАИК-2011). Она была организована в ноябре 2011 года по поручению Правительства РФ Росгидрометом при участии РАН, Всемирной метеорологической организации, Всемирного банка и других институтов. Труды этой конференции дали исчерпывающую картину изученности проблемы в стране, свидетельствуя о ее высокой актуальности и наличии запросов со стороны общества, государства и бизнеса, с одной стороны, а с другой, – о некотором отставании от «мирового графика». На конференции были сформулированы приоритетные задачи по устранению этого отставания, которые предусматривали трехуровневый подход, а именно: (1) детализация и уменьшение неопределенности климатических проекций для территории России (2) изучение влияния изменения климата на природные системы и отрасли экономики с получением количественных оценок и выявлением опасных уровней воздействия и (3) разработка стратегий адаптации к изменениям различного уровня.

По ряду причин эти задачи во многом все еще остаются актуальными. Имеющиеся в России профильные исследовательские группы разобщены не только на уровне ведомств, но и научных коллективов. Между учреждениями Росгидромета, РАН и университетами, где ведутся исследования по определенным аспектам проблемы, нет систематического взаимодействия. Из-за этого отсутствует согласованное понимание исходных научных предпосылок, в частности возможностей и ограничений гидродинамических моделей, по которым строятся климатические проекции; нет единой методической базы решения даже тех задач, которые на международном уровне уже давно отработаны; из-за специализации коллективов на отдельных видах задач и недостатке междисциплинарного опыта отсутствует комплексность в подходе и понимание того, что всегда имеет место баланс между климатообусловленными потерями и потенциальными выгодами, которые для России могут быть ощутимы, особенно при небольших уровнях потепления.

Заметным шагом вперед стал анализ экономической составляющей изменения климата для России, который впервые был дан в монографии (Кат-

цов, Порфирьев, 2011а) (доступен на веб-портале, <http://voeikovmgo.ru/download/publikacii/2011/Mokryk.pdf>). Ее расширенное резюме дано в публикации (Катцов, Порфирьев, 2011б). Эта основополагающая работа объединила усилия профессиональных климатологов и экономистов, в результате удалось сформулировать ряд важных рекомендаций по конкретным способам адаптации к изменению климата. Вместе с тем, она отчасти «опередила время», появившись до того, как были получены оценки воздействия изменений климата на весь комплекс ключевых природных и социально-экономических процессов по показателям, на основе которых выбираются меры адаптации. Притом, что такие исследования ведутся и уже получены отдельные результаты, до настоящего времени нет комплексных оценок соотношения потерь и потенциальных выгод, неясен вопрос о критических уровнях воздействия на природные и социально-экономические системы и вероятности их превышения в XXI веке. Фактически это затрудняет начало широкой реализации эффективных мер адаптации, общие принципы которых с учетом специфики России были сформулированы в (Катцов, Порфирьев, 2011а).

Некоторые зарубежные исследования подчеркивают, что из двух обсуждаемых в мире взаимодополняющих реакций на изменения глобального климата – ограничение антропогенного воздействия на климат и адаптации к изменению климата – первое направление развито слабее в России (Korproo, 2020; Moe et al., 2022) и часто подвергается общественной критике вследствие своего рода «климатического скептицизма и фатализма». Вера в то, что изменения климата неизбежны и в них значительную роль играют не антропогенные, а природные факторы и естественная цикличность, действительно иногда наблюдается в среде неспециалистов. Это часто затрудняет принятие своевременных управленческих решений.

Основополагающий научный принцип, положенный в основу политики адаптации в западных странах, состоит в том, что стоимость адаптации не должна превышать ущерба от предотвращенных потерь. Такого рода оценки были получены в недавних российских и зарубежных исследованиях последствий изменения климата для арктической инфраструктуры. Для ряда отраслей и регионов оценивался потенциальный ущерб от изменения климата без адаптации (Анисимов, Бадина, 2022; Лексин, Порфирьев, 2019; Мельников и др., 2021; Порфирьев и др., 2019, 2021; Streletskiy et al., 2019; Suter et al., 2019). Наиболее показателен пример многомиллиардного ущерба для инфраструктуры, обусловленного деградацией многолетней мерзлоты к середине XXI века.

На международном уровне уже в середине 1990-х годов были пройдены этапы осмысления неизбежности дальнейшего изменения климата, неотвратимости последствий для природных, экономических и социальных систем. Это нашло отражение в многочисленных научных статьях, которые были обобщены в 2001 г. в Третьем оценочном докладе Межправительственной Группы Экспертов по Изменению Климата (МГЭИК). В 2000-х наступил этап анализа дилеммы между адаптацией к предстоящему изменению климата и его ограничением, в первую очередь посредством уменьшения эмиссии парниковых газов. Это породило серию научных проектов по изучению климати-

ческого влияния на природные системы, сектора экономики и крупные регионы (например, Средиземноморский, Скандинавский и т.п.).

В 2008 комиссии Евросоюза был представлен научный отчет (EU Climate change..., 2008), в котором анализировались последствия изменения климата для природных и социально-экономических систем стран Западной Европы при различных уровнях потепления. Кроме того, в международном научном климатическом сообществе всегда было понимание того, что в наиболее неблагоприятной ситуации окажутся развивающиеся страны с более низким, чем в Европе, адаптационным потенциалом. Все эти соображения были приняты во внимание при определении целевого показателя Парижского соглашения 2015 г. по климату (<https://theconversation.com/1-5-c-where-the-target-came-from-and-why-were-losing-sight-of-its-importance-195745>). При этом, что полученные научные оценки содержали большую неопределенность, на их основе была сформулирована стратегическая цель по ограничению глобального потепления уровнем 2°C, а лучше 1.5°C.

За этими цифрами стоят исследования, показавшие, что превышение этих показателей многократно увеличивает экономические, социальные, экологические и иные риски и в развитых, и в развивающихся странах.

Для России критические уровни изменения климата пока достаточно полно не исследованы ни для отраслей промышленности, ни для регионов и федеральных округов. По ряду показателей для северной страны умеренное потепление несет больше потенциальных выгод, чем рисков и потерь. Поэтому и соответствующие критические уровни потепления могут быть выше, что теоретически можно учитывать в национальной политике адаптации. Иной подход, который сейчас наиболее распространен в России, состоит в том, чтобы рассматривать проблему на глобальном уровне. Очевидно, что климатические риски неодинаковы для разных стран. Россия хоть и подвержена им, но имеет значительный адаптационный потенциал, в состоянии управлять многими рисками и может даже получить некоторые выгоды от умеренного потепления.

Последние годы ознаменовались переходом проблемы изменения климата и адаптации к нему в России из сферы академической науки в сферу государственного управления и бизнеса. Принятые за два года постановления Правительства РФ обозначили процесс формирования климатической политики страны. Несмотря на эти позитивные сдвиги, Россия еще значительно отстает от многих развитых стран, где некоторые меры по ограничению воздействия на климат и адаптации к его изменениям приняты на законодательном уровне. Наиболее яркими примерами являются введение углеродного налога, дотации и государственное субсидирование мер по увеличению энергоэффективности и развитию возобновляемой энергетики (например, солнечная энергетика), отказ от углеводородного топлива (массовый переход на производства электромобилей) – все то, что получило название ESG-принципы управления.

В июле 2022 года Правительством РФ были утверждены 10 планов адаптации различных видов экономической деятельности и 7 регионов России к

изменениям климата и определены приоритетные мероприятия на основе оценки климатических рисков (опубликованы https://www.economy.gov.ru/material/news/v_rossii_zavershena_razrabotka_otraslevykh_planov_adaptacii_k_izmeneniyam_klimata.html). Это стало первым этапом системных действий Правительства и министерств РФ, направленных на разработку мер по адаптации к изменению климата. Последующие этапы планируется осуществлять с периодичностью в 3 года. Утвержденные отраслевые планы отражают текущее понимание руководящими органами оперативных и долгосрочных мер адаптации в транспортной отрасли, ТЭК, строительстве и ЖКХ, АПК и рыболовстве, природопользовании, здравоохранении, Арктической зоне, гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций, промышленного комплекса и внешней торговли, а также в области обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения. Во многих регионах планы адаптации находятся на различной стадии разработки. По состоянию на декабрь 2022 г., число регионов, имеющих такие планы, достигло 21. Эти документы использовались нами в качестве исходных данных для анализа планируемых руководящими органами адаптационных действий в секторах экономики и регионах России.

Научную основу для разработки системы мер по адаптации дают периодические оценочные доклады об изменении климата и его последствиях на территории России. К настоящему времени опубликованы три таких доклада (2007, 2014 и 2022 г.). Их структура аналогична оценочным докладам первой и второй рабочих групп МГЭИК. Они дают исчерпывающую актуальную информацию о наблюдаемых на территории России и прогнозируемых изменениях климата, а также о том, как они повлияли или могут повлиять на основные природные и социально-экономические процессы. Таким образом, в настоящее время можно говорить о наличии в России системы планирования адаптационных действий и системы их научного обеспечения. В контексте рассматриваемых в статье вопросов важно понять, помогут ли, разрабатываемые на федеральном и региональном уровнях адаптационные планы справиться с новыми климатическими вызовами российскому крупному бизнесу или же он должен будет в большей степени ориентироваться на собственные интересы, развивая соответствующую корпоративную климатическую политику.

Результаты и обсуждение

Анализ многих опубликованных документов показал, что тема адаптации к изменению климата для отраслей и регионов является новой. Неудивительно, что планы пока не в полной мере отражают научное понимание проблемы и далеко не всегда учитывают мировые «лучшие практики». Например, в них не учтены ограничения, обусловленные неопределенностью и вероятностно-статистической природой климатических прогнозов, отсутствием необходимых для оценки климатических рисков моделей и банков данных. Это отражает имеющуюся пока некоторую разобщенность органов управления и науки как в методических, так и в информационных вопросах.

В разработанных десятью федеральными министерствами планах дается различное видение климатических рисков, приводится перечень главных обуславливающих их факторов климатического воздействия и формулируется запрос на метеорологические и климатические данные, необходимые для количественной оценки. Ниже указываются некоторые недостатки этих планов, которые, надеемся, будут устранены на начавшемся в 2023 г. втором этапе планирования.

Минвостокразвития РФ. Главным тезисом является необходимость создания системы мониторинга многолетнемерзлых грунтов. При этом остался не освещенным вопрос о том, как на основе таких данных можно оценить геокриологические риски, какие для этого нужны математические модели и какие практические меры можно принять для уменьшения негативных последствий.

Минздрав РФ. Планом предусмотрено получение сведений о прогнозируемых метеорологических, климатических, геокриологических и иных изменениях природной среды, однако не указано, как эти сведения будут использованы для оценки климатообусловленных рисков здоровью населения и какие меры адаптации возможны для их уменьшения. Заметим, что значительную часть запрашиваемых сведений можно получить из опубликованных трех Оценочных докладов Росгидромета об изменении климата и его последствиях на территории РФ, а также из Ежегодных докладов Росгидромета об особенностях климата конкретных лет.

Минприроды РФ. В плане дано описание рисков, связанных с отдельными метеорологическими и климатическими явлениями, причем особое внимание уделено Арктике, ее шельфу и криолитозоне (многолетнемерзлым грунтам и северной растительности).

Минпромторг сообщает о готовности рассмотреть информацию о предстоящих изменениях климата, не указывая, о какого рода данных идет речь. При этом в плане приводится классификация подведомственных отраслей по подверженности климатическим рискам, несопоставимая с принятой в научной среде.

Минсельхоз запрашивает информацию о предстоящем изменении климата по ряду параметров, влияющих на сельское хозяйство. Значительная часть таких сведений содержится в трех опубликованных Оценочных докладах Росгидромета об изменении климата и их последствиях на территории Российской Федерации.

Минстрой РФ запрашивает сведения о предстоящих изменениях климата по ряду конкретных показателей, большинство из которых до настоящего времени не оценивались. **Минтранс РФ** запрашивает сведения о предстоящих изменениях температуры, осадков и параметров вечной мерзлоты. **Минэнерго РФ**, как и **Минприроды РФ**, не запрашивает данные об изменении климата, а предлагает свое видение мер по адаптации к ним.

Показательны материалы МЧС, в которых запрашиваются сведения о прогнозируемых изменениях климата и климатозависимых процессов для районов расположения 5 инфраструктурных объектов министерства. Пред-

ставляется, что перечень параметров для оценки климатических рисков, а главное упреждающих мероприятий по их минимизации, должен быть значительно более обширным.

Перечисленные выше инициативы Правительства РФ можно рассматривать как попытку формирования и развития климатической политики методом Top-down. Между тем, бизнес-сообщество все более утверждает в возможности альтернативного решения этого вопроса методом Bottom-up, опираясь на собственные конкретные шаги. Согласованные международные планы по введению углеродного налога, декарбонизации и разработка принципов ESG с необходимостью требуют позиционировать бизнес-сообщество по проблеме изменения климата, поскольку в любых геополитических условиях Россия останется одним из ключевых игроков в осуществлении международной политики адаптации и ограничения изменения климата.

Крупный бизнес всегда уделяет значительное внимание построению стратегии своего устойчивого развития. Закономерен вопрос, какое место в этом процессе уделено климатической повестке, связанным с ней рискам и возможностям. По этому показателю компании значительно различаются. Более консервативные рассматривают ее только в рамках управления рисками (физическими, например, сохранение инфраструктуры, и регуляторными, например, реализуемые через инвестиции в «зеленые» и «нетрадиционные» проекты) и соответственно работают в основном с позиции минимизации затрат. Наиболее прогрессивные компании связывают с климатической повесткой возможности развития, создания новых продуктов и рынков, получения устойчивого конкурентного преимущества.

В соответствии с мировой практикой и во многом под давлением проводящих ее инвестиционных институтов компании выделяют две составляющие климатической стратегии – адаптацию и декарбонизацию.

Стратегия адаптация – снижение подверженности и уязвимости бизнеса в ответ на фактические или ожидаемые климатические изменения требует региональной кооперации бизнес-сообщества, органов государственной власти и общественных организаций в регионах присутствия компании.

Стратегия декарбонизации – снижения углеродного следа производства и продукции – отвечает на запрос финансового сообщества, потребителей продукции и регуляторов и требует кооперации по цепочке создания стоимости. Углеродный след компании учитывается от производства сырья, до окончания жизненного цикла производимой продукции. От него в новых реалиях рынка в значительной степени зависит прибыль компании, остающаяся после уплаты углеродного налога.

Анализ климатических рисков в меняющихся экономических условиях показал, что можно выделить 5 направлений создания акционерной стоимости бизнесом в связи с повесткой устойчивого развития (Климатические риски..., 2022; Суховерхов, 2022). Ниже приведено их краткое описание с фокусом на возможностях адаптации. Фактически это поясняет, почему адаптация к изменению климата в конечном счете выгодна для бизнеса.

1. Увеличение доходов бизнеса за счет создания новых продуктов и выхода на новые рынки. Примерами новых продуктов, применительно к стратегии адаптации, могут быть новые виды страхования, резервные источники питания, информационные системы и стройматериалы, позволяющие более эффективно (с меньшими затратами) проходить волны жары (или холода) и т. д. Также увеличение доходов может произойти благодаря получению привилегированного доступа к ресурсам, за счет укрепления взаимодействия с региональными органами государственной власти и местными сообществами – именно такое взаимодействие необходимо для формирования региональной стратегии адаптации.

2. Сокращение расходов может быть связано со снижением затрат на финансирование и страхование, так как бизнесы, более адаптированные к климатическим изменениям, могут претендовать на более высокие оценки кредитных и страховых рейтингов. Эти вопросы детализированы в ряде опубликованных недавно обобщающих докладов, прежде всего в докладе ЦБ РФ (Климатические риски..., 2022; Суховерхов, 2022). Резюмируя содержание этих документы, можно отметить следующее.

В последние годы инвестиционное сообщество все более пристально отслеживает не только удельные показатели эмиссий парниковых газов компаниями, но и достаточность динамики показателей с точки зрения оптимальных траекторий Science Based Targets Initiative. Компании, не демонстрирующие достаточно быстрое улучшение климатических показателей, могут ограничиваться в доступе к финансированию или получать его по существенно более высоким рыночным ставкам. Кроме того, в рамках реализации климатической стратегии, компании, как правило, реализуют целый комплекс мероприятий по энерго- и ресурсо-эффективности, сокращению потерь и т.д., что также положительно сказывается на динамике расходов.

Российские компании, несмотря на ограничения в доступе к международному рынку капитала, продолжают взаимодействовать с крупнейшими банками и институтами развития. И ВЭБ, и Сбербанк, и Газпромбанк, и другие финансовые институты продолжают развивать линейку зеленых продуктов. Кроме того, ESG регулирование на рынках Китая, Индии, Ближнего Востока динамично развивается и зачастую становится более жестким, чем соответствующее регулирование ЕС или США.

3. Оптимизация регуляторной нагрузки и получение государственных субсидий. Даже на фоне пандемии и энергетического кризиса, регуляторы во многих странах активно продвигали программы государственной поддержки в области климата. До настоящего момента эта поддержка в большей степени фокусировалась на стратегии декарбонизации, однако можно ожидать и расширение мер поддержки инициатив в области адаптации. В России даже в 2022 году, на фоне беспрецедентной волны санкций, продолжалась работа по созданию климатического регулирования и формирования рынка углеродных единиц. Вопросы климата остаются в сфере внимания энергоемких и экспортно-ориентированных компаний, которые понимают, что климатический эффект их деятельности остается фактором конкурентоспособности на меж-

дународных рынках даже при переориентации с рынков G7 на рынки развивающихся стран.

4. Повышение производительности труда за счет роста вовлеченности сотрудников. Этот фактор особенно существенен для компаний, оперирующих на международных рынках труда, особенно в странах G7. Именно в этих странах, особенно среди молодежи, выражена высокая озабоченность антропогенным изменением климата и готовность ограничивать личное потребление для сокращения углеродного следа. Хотя, судя по социологическим опросам, в России изменения климата заботит население меньше, чем другие экологические проблемы, среди молодого поколения меньше климатических скептиков, чем в среднем по стране (Анисимов и др., 2019, 2020; Anisimov, Ortung, 2018). Компании, бренд которых ассоциируется с ответственным отношением к климату, будут иметь конкурентное преимущество на рынке труда.

5. Портфельная оптимизация. Понимание климатических рисков и возможностей особенно актуально при работе с инвестиционными проектами длинных горизонтов планирования – именно этот подход позволит избежать вложений в активы, которые могут оказаться обесцененными или существенно менее доходными вследствие изменения физических или регуляторных климатических факторов.

Заключение

Правительство Российской Федерации своим распоряжением от 11 марта 2023 г. N 559-р утвердило Национальный план мероприятий второго этапа адаптации к изменениям климата до 2025 г. Этот документ содержит мероприятия по формированию системы адаптации к изменению климата в РФ, включая развитие научно-методической базы. Последнее будет способствовать научному обоснованию мероприятий и корректной оценке их эффективности.

Объективно оценивать эффективность адаптации крайне сложно, поскольку речь идет о некоторых будущих событиях, обусловленных изменением климата. Более корректно говорить о готовности к адаптации, т.е. о том, что может быть сделано и делается для того, чтобы меры по адаптации в будущем сработали. Базовые показатели готовности к адаптации включают соответствующее институциональное развитие, финансирование пилотных исследовательских проектов, инвестирование в развитие новых технологий устойчивого развития в условиях изменения климата.

Крупный бизнес демонстрирует многие такие показатели, действуя при этом в первую очередь в интересах собственного устойчивого развития и используя с выгодой для себя законодательные инициативы, принимаемые правительством страны. Собственные корпоративные стратегии устойчивого развития, основанные на понимании корпоративных интересов, не противоречат государственной политике. Они могут как дополнять эту политику, так и развиваться независимо от нее даже в ее отсутствие.

Многие критерии оценки текущей деятельности, планов развития и рыночного потенциала существующих компаний, привлекательности новых инвестиционных проектов напрямую зависят от их углеродного следа, энергоэффективности и соответствия принципам ESG. Бизнес-сообщество не только России, но и других стран хорошо это понимает, на что указывают ежегодные отчеты крупных компаний. Даже в отсутствие других мотиваторов это с неизбежностью приводит к выводу о необходимости и целесообразности, в том числе финансовой, конкретных шагов бизнеса по реализации корпоративной и общегосударственной политики адаптации к изменению климата.

Список литературы

Анисимов, О.А. (2010) *Основные природные и социально-экономические последствия изменения климата в районах распространения многолетне-мерзлых пород: прогноз на основе синтеза наблюдений и моделирования*, М., Гринпис, 44 с.

Анисимов, О.А., Бадина, С.В. (2022) Инфраструктура в зоне многолетней мерзлоты, в кн.: *Третий оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*, под ред. С.М. Семенова, В.М. Катцова, Санкт-Петербург, Научно-технологические исследования, с. 417-426.

Анисимов, О.А., Гребенец, В.И., Стрелецкий, Д.А. (2014) Хозяйственные объекты, расположенные на вечной мерзлоте, в кн.: *Второй оценочный доклад об изменении климата и его последствиях на территории России*, под ред. С.М. Семенова, В.М. Катцова, М., Росгидромет, с. 410-458.

Анисимов, О.А., Жильцова, Е.Л., Шаповалова, К.О., Ершова, А.А. (2019) Анализ индикаторов изменения климата. Часть 1. Восточная Сибирь, *Метеорология и гидрология*, № 12, с. 31-42.

Анисимов, О.А., Жильцова, Е.Л., Шаповалова, К.О., Ершова, А.А. (2020) Анализ индикаторов изменения климата. Часть 2. Северо-Западный регион, *Метеорология и гидрология*, № 1, с. 23-35.

Гордеев, А.В., Кирюшин, В.И. (2012) *Биоклиматический потенциал России: продуктивность и рациональное размещение сельскохозяйственных культур в условиях изменения климата*, М., Россельхозакадемия, 202 с.

Гребенец, В.И. (2007) Деформации объектов в криолитозоне при прогнозируемых изменениях сложных инженерно-геокриологических условий оснований, *Инженерная геология*, № 3, с. 17-20.

Гребенец, В.И., Ухова, Ю.А. (2008) Снижение геотехнической надежности при ухудшении мерзлотных условий оснований, *Основания, фундаменты и механика грунтов*, № 5, с. 24-28.

Катцов, В.М., Порфирьев, Б.Н. (2011а) *Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу*, М., ООО РИФ "Д'АРТ", 254 с.

Катцов, В.М., Порфирьев, Б.Н. (2011б) Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу (резюме доклада), в сб.: *Труды главной геофизической обсерватории*, ред. В.М. Катцов, В.П. Мелешко, Санкт-Петербург, с. 7-59.

Климатические риски в меняющихся экономических условиях (2022) Доклад для общественных консультаций, М., Банк России, 51 с.

Лексин, В.Н., Порфирьев, Б.Н. (2019) Российская Арктика: логика и парадоксы перемен, *Проблемы прогнозирования*, № 6 (177), с. 4-21.

Мельников, В.П., Осипов, В.И., Брушков, А.В., Бадина, С.В., Дроздов, Д.С., Дубровин, В.А., Железняк, М.Н., Садуртдинов, М.Р., Сергеев, Д.О., Остарков, Н.А., Фалалеева, А.А., Шелков, Я.Ю. (2021) Оценка ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям при изменении температур и оттаивании многолетнемерзлых грунтов в Арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века, *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*, № 1, с. 14-31.

Мохов, И.И., Хон, В.Ч. (2008) Оценка перспектив Северного морского пути при изменениях климата на основе расчетов с ансамблем климатических моделей, в кн.: *Природные процессы в полярных областях Земли*, ред. В.М. Котляков, М., ИГ РАН, с. 20-27.

Павлова, В.Н. (2013) Агроклиматические ресурсы и продуктивность сельского хозяйства России при реализации новых климатических сценариев в XXI веке, *Труды ГГО им. А.И. Воейкова*, вып. 569, с. 20-37.

Павлова, В.Н., Сиротенко, О.Д. (2012) Наблюдаемые изменения климата и динамика продуктивности сельского хозяйства России, *Труды ГГО им. А.И. Воейкова*, вып. 565, с. 132-151.

Порфирьев, Б.Н., Елисеев, Д.О., Стрелецкий, Д.А. (2019) Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменения климата для дорожной инфраструктуры в Российской Арктике, *Вестник Российской академии наук*, № 12, с. 1228-1239.

Порфирьев, Б.Н., Елисеев, Д.О., Стрелецкий, Д.А. (2021) Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты для жилищного сектора Российской Арктики, *Вестник Российской академии наук*, № 2, с. 105-114.

Сиротенко, О.Д., Клещенко, А.Д., Павлова, Т.В., Абашина, Е.В., Семендяев, А.К. (2011) Мониторинг изменений климата и оценка последствий глобального потепления для сельского хозяйства, *Агрофизика*, № 3, с. 31-39.

Стрелецкий, Д.А., Шикломанов, Н.И., Гребенец, В.И. (2012) Изменение несущей способности мерзлых грунтов в связи с потеплением климата на севере Западной Сибири, *Криосфера Земли*, № 1, с. 22-32.

Суховерхов, К. (2022) *Перспективы «зеленого» перехода России в условиях санкционного давления стран Запада*, Доклад Российского совета по международным делам, 38 с.

Хон, В.Ч., Мохов, И.И. (2010) Климатические изменения в Арктике и возможные условия арктической морской навигации в XXI веке, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, № 1, с. 19-25.

Чебакова, Н.М., Парфенова, Е.И. (2006) Прогноз продвижения границ леса при изменении климата к концу XX века в Средней Сибири, *Вычислительные технологии*, № 3, с. 77-86.

Чебакова, Н.М., Рейфельдт, Д., Парфенова, Е.И. (2003) Перераспределение растительных зон и популяций лиственницы сибирской и сосны обыкновенной в Средней Сибири при потеплении климата, *Сибирский экологический журнал*, № 6, с. 677-686.

Шерстюков, Б.Г., Шерстюков, А.Б. (2013) Лесные пожары при потеплении климата в XXI веке, в сб.: *Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем*, ред. Ю.А. Израэль, т. 25, М., "Планета", с. 300-313.

Шикломанов, А.И., Георгиевский, В.Ю., Шалыгин, А.Л. (2005) Влияние климатических условий на сток рек бассейна Лены, в кн.: *Современные проблемы экологической метеорологии и климатологии*, СПб., Наука, с. 218-231.

Шикломанов, И.А., Шикломанов, А.И. (2003) Изменение климата и динамика притока речных вод в Северный Ледовитый океан, *Водные ресурсы*, № 6, с. 645-654.

Anisimov, O.A. (2016) Challenges of the Changing Climate: A Case Study of Russia, *Russian Analytical Digest*, no. 185, pp. 2-5.

Anisimov, O., Orttung, R. (2018) Climate change in Northern Russia through the prism of public perception, *Ambio*, no. 6, pp. 661-671.

EU Climate change expert group "EG Science". The 2 C target. Information reference document (2008) p. 55.

Korppoo, A. (2020) Domestic frames on Russia's role in international climate diplomacy, *Climate Policy*, no. 1, pp. 109-123.

Korppoo, A. (2022) Russian discourses on benefits and threats from international climate diplomacy, *Climatic Change*, no. 25, pp. 83-96, available at: <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03299-3>.

Moe, A., Lamazhapov, E., Anisimov, O. (2022) Russia's expanding adaptation agenda and its limitations, *Climate Policy*, no 2, pp. 184-198, available at: <https://doi.org/10.1080/14693062.2022.2107981>.

Streletskiy, D.A., Suter, L., Shiklomanov, N.I., Porfiriev, B.N., Eliseev, D.O. (2019) Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost, *Environmental Research Letters*, no. 2, p. 025003.

Suter, L., Streletskiy, D., Shiklomanov, N. (2019) Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic, *Polar Geography*, no. 4, pp. 267-286.

References

Anisimov, O.A. (2010) *Osnovnye prirodnye i social'no-ekonomicheskie posledstviya izmeneniya klimata v rajonah rasprostraneniya mnogoletnemerzlykh porod: prognoz na osnove sinteza nablyudenij i modelirovaniya* [Main environmental and socio-economical impacts of climate change in permafrost regions: forecast based on synthesis of observations and modelling], Grinpis, Moscow, Russia, 44 p.

Anisimov, O.A., Badina, S.V. (2022) Infrastruktura v zone mnogoletnej merzloty [Infrastructure in permafrost regions], *Tretij ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii* [The third assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation], in S.M. Semenov, V.M. Katcov, Moscow, Russia, pp. 417-426.

Anisimov, O.A., Grebenec, V.I., Streleckij, D.A. (2014) Hozyajstvennye ob"ekty, raspolozhennye na vечноj merzlotte [Engineering structures in permafrost regions], *Vtoroj ocenochnyj doklad ob izmenenii klimata i ego posledstviyah na territorii Rossii* [The second assessment report on climate change and its consequences in Russia], in S.M. Semenov, V.M. Katcov, Moscow, Russia, pp. 410-458.

Anisimov, O.A., Zhiltcova, Ye.L., Shapovalova, K.O., Yershova, A.A. (2019) Analiz indikatorov izmeneniya klimata. Chast 1. Vostochnaya Sibir [Analysis of climate change indicators. Part 1. West Siberia], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 12, pp. 31-42.

Anisimov, O.A., Zhiltcova, Ye.L., Shapovalova, K.O., Yershova, A.A. (2020) Analiz indikatorov izmeneniya klimata. Chast 2. Severo-Zapadnyi region [Analysis of climate change indicators. Part 2. North-Western region], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 1, pp. 23-35.

Gordeev, A.V., Kiryushin, V.I. (2012) *Bioklimaticheskij potencial Rossii: produktivnost' i racional'noe razmeshchenie sel'skohozyajstvennykh kul'tur v usloviyah izmeneniya klimata* [Bioclimatic potential of Russia: productivity and optimal distribution of agricultural plants under the conditions of the changing climate], Rossel'hozakkademiya, Moscow, Russia, 202 p.

Grebenec, V.I. (2007) Deformacii ob"ektov v kriolitozone pri neprognoziruemykh izmeneniyah slozhnykh inzhenerno-geokriologicheskikh uslovij osnovanij [Deformation of structures in permafrost regions under non-predictable changes of complex engineering and cryosperic conditions of the foundations], *Inzhenernaya geologiya*, no. 3, pp. 17-20.

Grebenec, V.I., Uhova, Yu.A. (2008) Snizhenie geotekhnicheskoy nadezhnosti pri uhudshenii merzlotnykh usloviy osnovanij [Loving on geotechnical safety under changing permafrost conditions of foundations], *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov*, no. 5, pp. 24-28.

Katcov, V.M., Porfir'ev, B.N. (2011a) *Ocenka makroekonomicheskikh posledstviy izmenenij klimata na territorii Rossijskoj Federacii na period do 2030 g. i dal'nejshuyu perspektivu* [Evaluation of macroeconomical consequences of climate change in the Russian Federation until the 2030 and longer period], OOO RIF "D'ART", Moscow, Russia, 254 p.

Katcov, V.M., Porfir'ev, B.N. (2011b) *Ocenka makroekonomicheskikh posledstviy izmenenij klimata na territorii Rossijskoj Federacii na period do 2030 g. i dal'nejshuyu perspektivu (rezyume doklada)* [Evaluation of macroeconomical consequences of climate change in the Russian Federation until the 2030 and longer period. Summary of the report], *Trudy glavnoj geofizicheskoy observatorii* [Proceedings of the main geophysical observatory], in V.M. Katcov, V.P. Meleshko (eds.), S.Peterburg, Russia, pp. 7-59.

Klimaticheskie riski v menyayushchihsya ekonomicheskikh usloviyah. Doklad dlya obshchestvennykh konsul'tacij [Climate risks in the changing economical conditions. Report for public consultations] (2022) Bank Rossii, Moscow, Russia, 51 p.

Leksin, V.N., Porfir'ev, B.N. (2019) *Rossijskaya Arktika: logika i paradoksy peremen* [Russian Arctic: logic and paradoxes of changes], *Problemy prognozirovaniya*, no. 6(177), pp. 4-21.

Mel'nikov, V.P., Osipov, V.I., Brushkov, A.V., Badina, S.V., Drozdov, D.S., Dubrovin, V.A., Zheleznyak, M.N., Sadurtdinov, M.R., Sergeev, D.O., Ostarkov, N.A., Falaleeva, A.A., Shelkov, Y.Y. (2021) *Ocenka ushcherba zhilym i promyshlennym zdaniyam i sooruzheniyam pri izmenenii temperatur i ottaivanii mnogoletnemerzlykh gruntov v Arkticheskoy zone Rossijskoj Federacii k seredine XXI veka* [Evaluation of damages of the residential and industrial buildings and constructions under changing temperature and thawing permafrost in the Russian Arctic by mid-XXI century], *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya*, no. 1, pp. 14-31.

Mohov, I.I., Hon, V.Ch. (2008) *Ocenka perspektiv Severnogo morskogo puti pri izmeneniyah klimata na osnove raschetov s ansamblem klimaticheskikh modelej* [Evaluation of the Northern Sea Route developments under changin climate using results from the ensemble of climate models], *Prirodnye processy v polyarnykh oblastyah Zemli* [Natural processes in the polar regions of the Earth], in V.M. Kotlyakov (ed.), IG RAN, Moscow, Russia, pp. 20-27.

Pavlova, V.N. (2013) *Agroklimaticheskie resursy i produktivnost' sel'skogo hozyajstva Rossii pri realizacii novykh klimaticheskikh scenariy v XXI veke* [Agroclimatic resources and agricultural productivity in Russia under the new climate scenarios for the XXI century], *Trudy glavnoj geofizicheskoy observatorii* [Proceedings of the GGO them. A.I. Voeikova], issue 569, pp. 20-37.

Pavlova, V.N., Sirotenko, O.D. (2012) Nablyudaemye izmeneniya klimata i dinamika produktivnosti sel'skogo hozyajstva Rossii [Observed climate change and dynamics of agricultural productivity in Russia], *Trudy glavnoj geofizicheskoy observatorii* [Proceedings of the GGO them. A.I. Voeikova], issue 565, pp. 132-151.

Porfir'ev, B.N., Eliseev, D.O., Streleckij, D.A. (2019) Ekonomicheskaya ocenka posledstvij degradacii vechnoj merzloty pod vliyaniem izmeneniya klimata dlya dorozhnoj infrastruktury v Rossijskoj Arktike [Economical estimate of the consequences of permafrost degradation under changing climate for the road infrastructure in the Russian Arctic], *Vestnik Rossijskoj akademii nauk*, no. 12, pp. 1228-1239.

Porfir'ev, B.N., Eliseev, D.O., Streleckij, D.A. (2021) Ekonomicheskaya ocenka posledstvij degradacii vechnoj merzloty dlya zhilishchnogo sektora rossijskoj Arktiki [Economical estimate of the consequences of permafrost degradation under changing climate for the residential buildings in the Russian Arctic], *Vestnik Rossijskoj akademii nauk*, no. 2, pp. 105-114.

Sirotenko, O.D., Kleshchenko, A.D., Pavlova, T.V., Abashina, E.V., Semendyaev, A.K. (2011) Monitoring izmenenij klimata i ocenka posledstvij global'nogo potepleniya dlya sel'skogo hozyajstva [Climate change monitoring and evaluation of the impacts of global warming on agriculture], *Agrofizika*, no. 3, pp. 31-39.

Streleckij, D.A., Shiklomanov, N.I., Grebenec, V.I. (2012) Izmenenie nesushchej sposobnosti merzlyh gruntov v svyazi s potepleniem klimata na severe Zapadnoj Sibiri [Changes of permafrost bearing capacity due to climatic warming in the North of the West Siberia], *Kriosfera Zemli*, no. 1, pp. 22-32.

Suhoverhov, K. (2022) *Perspektivy «zelenogo» perekhoda Rossii v usloviyah sankcionnogo davleniya stran Zapada* [Perspective of the “green” transition in Russia under the pressure of the economical sanctions of the western countries], Doklad Rosijskogo sovet po mezhdunarodnym delam [Report of the Russian International Affairs Council], 38 p.

Hon, V.Ch., Mohov, I.I. (2010) Klimaticheskie izmeneniya v Arktike i vozmozhnye usloviya arkticheskoy morskoy navigacii v XXI veke [Climate change in the Arctic and possible conditions of the Arctic sea navigation in the XXI century], *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, no. 1, pp. 19-25.

Chebakova, N.M., Parfenova, E.I. (2006) Prognoz prodvizheniya granic lesa pri izmenenii klimata k koncu XXI veka v Srednej Sibiri [Prediction of the tree line shift in the Middle Siberia under climate change by the end of the XXI century], *Vychislitel'nye tekhnologii*, no. 3, p. 77-86.

Chebakova, N.M., Rejfel'dt, D., Parfenova, E.I. (2003) Pereraspredelenie rastitel'nyh zon i populyacij listvennicy sibirskoj i sosny obyknovennoj v Srednej Sibiri pri poteplenii klimata [Redistribution of the vegetation zones and larch and pine populations in the Middle Siberia under climate warming], *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, no. 6, pp. 677-686.

Sherstyukov, B.G., Sherstyukov, A.B. (2013) Lesnye pozhary pri poteplenii klimata v XXI veke [Forest fires under climatic warming in the XXI century], *Problemy ekologicheskogo modelirovaniya i monitoringa ekosistem* [Problems of ecological modeling and monitoring of ecosystems], in Yu.A. Izrael', "Planeta", Moscow, Russia, vol. 25, pp. 300-313.

Shiklomanov, A.I., Georgievskij, V.Yu., Shalygin, A.L. (2005) Vliyanie klimaticheskikh uslovij na stok rek bassejna Leny [Impact of climatic conditions on river runoff in the Lena basin], *Sovremennye problemy ekologicheskoy meteorologii i klimatologii* [Modern problems of ecological meteorology and climatology], Nauka, SPb., Russia, pp. 218-231.

Shiklomanov, I.A., Shiklomanov, A.I. (2003) Izmenenie klimata i dinamika pritoka rechnyh vod v Severnyj Ledovityj okean [Climate change and dynamics of the river discharge to the Arctic Ocean], *Vodnye resursy*, no. 6, pp. 645-654.

Anisimov, O.A. (2016) Challenges of the Changing Climate: A Case Study of Russia, *Russian Analytical Digest*, no. 185, pp. 2-5.

Anisimov, O., Orttung, R. (2018) Climate change in Northern Russia through the prism of public perception, *Ambio*, no. 6, pp. 661-671.

EU Climate change expert group "EG Science". The 2 C target. Information reference document (2008) p. 55.

Korppoo, A. (2020) Domestic frames on Russia's role in international climate diplomacy, *Climate Policy*, no. 1, pp. 109-123.

Korppoo, A. (2022) Russian discourses on benefits and threats from international climate diplomacy, *Climatic Change*, no. 25, pp. 83-96, available at: <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03299-3>.

Moe, A., Lamazhapov, E., Anisimov, O. (2022) Russia's expanding adaptation agenda and its limitations, *Climate Policy*, no 2, pp. 184-198, available at: <https://doi.org/10.1080/14693062.2022.2107981>.

Streletskiy, D.A., Suter, L., Shiklomanov, N.I., Porfiriev, B.N., Eliseev, D.O. (2019) Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost, *Environmental Research Letters*, no. 2, p. 025003.

Suter, L., Streletskiy, D., Shiklomanov, N. (2019) Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic, *Polar Geography*, no. 4, pp. 267-286.

Поступила в редакцию: 29.01.2023.

Доработана после рецензирования: 17.04.2023.

Принята к публикации: 24.02.2023.

Для цитирования / For citation:

Анисимов, О.А., Гайда, И.В., Му А. (2023) Адаптация к изменению климата как путь снижения рисков для бизнеса, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 2, с. 224-242, doi:10.21513/2410-8758-2023-2-224-242.

Anisimov, O.A., Gayda, I.V., Moe, A. (2023) Adaptation to climate change as a factor of lowering business risks, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 2, pp. 224-242, doi:10.21513/2410-8758-2023-2-224-242.