

ISSN 2410-8758



Фундаментальная и прикладная климатология

Fundamental and
Applied Climatology

том 9 № 4

2023

Фундаментальная и прикладная климатология том 9 № 4 / 2023 г.

Federal Service
for Hydrometeorology
and Environmental
Monitoring (Roshydromet)

ISSN 2410-8758

**FUNDAMENTAL AND APPLIED
CLIMATOLOGY**

Volume 9 № 4

Moscow 2023

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ

КЛИМАТОЛОГИЯ

Том 9 № 4 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: 11,71

Тираж 150 экз.

Заказ № 3118.7.

Свидетельство о регистрации СМИ:

ПИ № ФС77-74294

Подписано в печать 01.12.2023.

Отпечатано в типографии ООО «Принт».

426035, г. Ижевск, ул. Тимирязева, 5.

Федеральная служба
по гидрометеорологии и мониторингу
окружающей среды
(Росгидромет)

ISSN 2410-8758

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ
КЛИМАТОЛОГИЯ**

Том 9 № 4

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), М.Ю. Бардин (заместитель главного редактора), В.М. Катцов (заместитель главного редактора), К.Н. Анахаев, А.С. Астахов, Р.В. Бекряев, Е.М. Володин, В.А. Гинзбург, В.Б. Геннадинник, А.В. Елисеев, А.Н. Золотокрылин, А.Л. Иванов, А.В. Кислов, А.В. Клепиков, А.Г. Костяной, В.Н. Крупчатников, С.А. Лавров, Е.С. Нестеров, Л.А. Прохорова (ответственный секретарь), Э.Я. Ранькова, В.А. Семенов, Ю.Б. Скачков, А.М. Стерин, 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), M.Yu. Bardin (Deputy Editor-in-Chief), V.M. Kattsov (Deputy Editor-in-Chief), K.N. Anakhaev, A.S. Astakhov, R.V. Bekryaev, E.M. Volodin, V.A. Ginzburg, V.B. Gennadinnik, A.V. Eliseev, A.N. Zolotokrylin, A.L. Ivanov, A.V. Kislov, A.V. Klepikov, A.G. Kostianoy, V.N. Krupchatnikov, S.A. Lavrov, E.S. Nesterov, L.A. Prokhorova (Executive Secretary), E.Ya. Rankova, V.A. Semenov, Yu.B. Skachkov, A.M. Sterin, 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

35 лет Межправительственной группе экспертов по изменению климата (МГЭИК).....	373
---	-----

ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБЗОРЫ

Анахаев К.Н., Беликов В.В.

О моделировании склонового стока на горных и предгорных водосборах....	386
--	-----

Башмаков И.А., Мышак А.Д., Башмаков В.А., Башмаков В.И., Борисов К.Б., Дзедзичек М.Г., Лунин А.А., Лебедев О.В., Шишкина Т.Б.

Оценка вклада технологического фактора в повышение энергоэффективности и динамику выбросов парниковых газов в секторе «энергетика» России.....	403
--	-----

Лубков А.С., Воскресенская Е.Н., Марчукова О.В.

Новый подход к использованию нейронных сетей для долгосрочного прогноза Эль-Ниньо и Ла-Нинья.....	432
--	-----

Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н.

Пространственная неоднородность летнего турбулентного теплообмена на равнинах России.....	467
--	-----

МОНИТОРИНГ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Алдухов О.А., Черных И.В.

Сезонные и географические особенности вертикальной структуры трендов температуры в атмосфере Земли (в слое 0-30 км), оцененные по данным радиозондирования.....	482
---	-----

Хохлова А.В.

Повторяемость слабых и сильных ветров в пограничном слое атмосферы на территории Российской Федерации, оцененная по данным многолетних аэрологических наблюдений.....	506
---	-----

CONTENTS

EVENTS AND COMMEMORATIVE DATES

35th anniversary of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).....373

STUDIES AND REVIEWS

Anakhaev K.N., Belikov V.V.

On the modeling of slope runoff at mountain
and foothill catchments.....386

**Bashmakov I.A., Myshak A.D., Bashmakov V.A., Bashmakov V.I.,
Borisov K.B., Dzedzichek M.G., Lunin A.A., Lebedev O.V., Shishkina T.B.**

Assessing the contribution from technological factor to energy
efficiency improvement and to the evolution of energy related
emissions of greenhouse gases in Russia.....403

Lubkov A.S., Voskresenskaya E.N., Marchukova O.V.

An innovative approach to long-term prediction
of El Niño and La Niña using neural networks.....432

Titkova T.B., Zolotokrylin A.N.

The spatial heterogeneity of the summer turbulent heat
exchange on the plains of Russia.....467

CLIMATE SYSTEM MONITORING

Aldukhov O.A., Chernykh I.V.

Seasonal and geographical features of the vertical structure
of temperature trends in the Earth's atmosphere (in the 0-30 km layer)
assessed using radiosonde data.....482

Khokhlova A.V.

The frequency of weak and strong winds in the atmospheric
boundary layer on the territory of the Russian Federation assessed
from data of long-term aerological observation.....506

СОБЫТИЯ И ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ

35 лет Межправительственной группе экспертов по изменению климата (МГЭИК)¹⁾

В этом году исполнилось 35 лет Межправительственной группе экспертов по изменению климата (МГЭИК). В связи с этой датой Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля (ИГКЭ) и Научный совет РАН по проблемам климата Земли организовали 18 сентября 2023 г. заседание Круглого стола «35 лет МГЭИК: участие России – история и перспективы».



Зал заседания

С приветствиями к собравшимся обратились заместитель руководителя Росгидромета В.В. Соколов, директор ИГКЭ, член-корреспондент РАН А.А. Романовская, сопредседатели Научного совета РАН по проблемам климата Земли академики РАН В.Г. Бондур и И.И. Мохов, директор департамента конкуренции, энергоэффективности и экологии Минэкономразвития И.А. Петрунина. Заседание вел научный руководитель ИГКЭ, представитель России в МГЭИК, член-корреспондент РАН С.М. Семенов.

В работе Круглого стола участвовали ученые, которые в разное время были авторами и редакторами-рецензентами докладов МГЭИК, были членами делегаций российских экспертов на сессиях МГЭИК. Это – специалисты в науке о климате и сопряженных разделах других наук, работающие в

¹⁾ Этот информационный материал подготовлен участниками собрания. Их список приведен в тексте. Фотографии – Анастасии Жуковой / «Научная Россия»

научно-исследовательских институтах Росгидромета и РАН, в учебных заведениях страны, в НКО.



Слева направо: В.В. Соколов, С.М. Семенов, А.А. Романовская,
В.Г. Бондур, И.И. Мохов



С.М. Семенов, А.А. Гладилицева



Е.М. Володин



В.М. Катцов



И.И. Мохов



С.К. Гулев



И.А. Башмаков



А.Н. Гельфан



Г.Э. Инсаров



М.Л. Гитарский, В.А. Гинзбург



О.Н. Липка, Е.М. Володин

В заседании также участвовали главные адресаты докладов МГЭИК в России, а именно: работники министерств и ведомств (МИД, Минэкономразвития, Минэнерго, Росгидромет), курирующие климатическую повестку, и климатические эксперты бизнес-структур (ПАО «Газпром», ВЭБ, ОК РУСАЛ).



И.А. Петрунина



Ш.Э. Магомедов, Т.М. Дмитриева



Слева направо: А.Н. Чайка, С.П. Семенцов



К.В. Романов

Работа Круглого стола освещалась порталом «Научная Россия». Участники приняли Общее заключение, которое приведено ниже.

ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) – международная, неополитическая, научная организация семейства ООН. Она образована Всемирной метеорологической организацией (ВМО) и Программой ООН по окружающей среде (ЮНЕП) в 1987-1988 гг. В нее входят 195 стран. Основная задача – периодически выполнять оценку научных знаний о величине и сроках изменений климата, об их последствиях для природных и социально-экономических систем и возможностях адаптации, о путях ограничения антропогенного воздействия на климатическую систему Земли. Над этими вопросами работают соответственно Рабочая группа I «Физическая научная основа», Рабочая группа II «Воздействия, адаптация и уязвимость» и Рабочая группа III «Смягчение изменения климата». Результаты представляются в виде научных докладов (книг). МГЭИК также систематизирует методы оценки антропогенных эмиссий и поглощения парниковых газов для составления ежегодных инвентаризаций (кадастров)

странами-участницами Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН). Этим занимается Целевая группа по кадастрам.

К настоящему времени прошло шесть циклов работы МГЭИК, каждый длительностью в 5-7 лет. В течение последнего цикла (2015-2023 гг.) были подготовлены основной, оценочный доклад в трех томах, три специальных доклада, а также актуализированная версия «Руководящих принципов национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК», т.е. руководства по составлению кадастров. Эти доклады подготавливаются экспертами (авторами и редакторами-рецензентами), отобранными по конкурсу из кандидатов, выдвинутых странами-членами МГЭИК и профильными международными организациями. Эти эксперты работают на волонтерских основаниях, на безгонорарной основе. Доклады МГЭИК готовятся на основе существующих публикаций в научной литературе, а также архивов данных мониторинга и моделирования.

Основные выводы и заключения МГЭИК, формулируемые в Резюме для политиков, считаются наиболее авторитетным источником научных данных для международного переговорного процесса по климату, для выработки климатической политики министерствами и ведомствами на национальном уровне, а также для научных экспертов бизнес-структур, определяющих свой подход к ограничению влияния хозяйственной деятельности на климат Земли.

По случаю 35-летия организации МГЭИК Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля» (ФГБУ «ИГКЭ») Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) и Научный совет РАН по проблемам климата Земли организовали Круглый стол – встречу авторов и редакторов-рецензентов докладов МГЭИК с главными адресатами этих докладов в России, а именно, с работниками министерств и ведомств (МИД, Минэкономразвития, Минэнерго, Росгидромет), курирующими климатическую повестку, и климатическими экспертами бизнес-структур (ПАО «Газпром», ВЭБ, ОК РУСАЛ). Список участников – приведен ниже.

К участникам с приветствиями обратились заместитель Руководителя Росгидромета В.В. Соколов, сопредседатели Научного совета РАН по проблемам климата Земли академики РАН В.Г. Бондур и И.И. Мохов, директор ИГКЭ член-корреспондент РАН А.А. Романовская и директор департамента конкуренции, энергоэффективности и экологии Минэкономразвития И.А. Петрунина.

Вводное сообщение «Эволюция МГЭИК и итоги деятельности» сделал научный руководитель ИГКЭ, представитель России в МГЭИК, член-корреспондент РАН С.М. Семенов. В сообщении были кратко изложены цели организации МГЭИК, охарактеризована ее структура и принципы работы, в обобщенной форме суммированы основные прикладные (важные для разработки климатической политики) выводы ее научных докладов и представлено новое руководство МГЭИК, избранное на срок седьмого цикла работы МГЭИК в июле 2023 г. Были также сформулированы темы, по которым далее состоялась заинтересованная дискуссия. Модератор – С.М. Семенов. Результаты дискуссии можно суммировать следующим образом.

Опыт участия российских авторов и редакторов-рецензентов в подготовке научных докладов МГЭИК

Участие российских экспертов в подготовке научных докладов МГЭИК способствует повышению качества докладов, поскольку российские эксперты являются высококвалифицированными специалистами в науке о климате и сопряженных разделах других наук.

Для самих экспертов, особенно в начале и в середине карьеры, такая работа способствует творческому росту, приобретению навыков работы в международном коллективе, становлению научных контактов с иностранными учеными, расширению доступа к самой современной научной литературе, методологии и данным мониторинга и моделирования. Это также важный опыт работы по организации междисциплинарных исследований. Сам принцип планирования и организации работы в авторских коллективах МГЭИК впоследствии с успехом применялся российскими авторами на национальном уровне. Научные подходы, используемые в МГЭИК, широко применяются в работе российских ученых. Многие российские ученые, работавшие в начале карьеры над докладами МГЭИК, сейчас имеют высокие ученые звания и являются в своих областях знания лидерами отечественной науки. Участие российских ученых в работе МГЭИК – безусловно позитивная традиция.

Роль МГЭИК в жизни современного научного сообщества

Наука о климате с учетом сопряженных разделов других наук охватывает колоссальный объем знаний и развивается сейчас значительными темпами. Выраженный современный тренд – усиление междисциплинарных исследований и ориентация на прикладные вопросы. В силу этого такие традиционные суммирующие издания как энциклопедии, которые издаются нечасто (раз в десятки лет и реже), необходимо дополнять более часто издаваемыми суммирующими изданиями. В них отражались бы продвижения, в особенности имеющие прикладное значение, в различных областях науки о климате и сопряженных разделах других наук, за периоды до 10 лет. Эту функцию в значительной мере выполняют научные доклады МГЭИК. По замыслу они ориентированы на разработчиков климатической политики. Но и в жизни научного сообщества они играют важную роль, суммируя и оценивая результаты самых современных научных исследований, тем самым формируя и поддерживая актуализированную доказательную научную базу для обоснованных представлений о динамике климатической системы Земли, о последствиях изменения климата, о возможностях смягчения изменений климата и приспособления к этим изменениям. Эти знания впоследствии распространяются среди научных экспертов и в обществе в целом, в том числе среди профильных общественных организаций, учащихся, заинтересованной общественности. Этому способствует доступность научных докладов МГЭИК – их полные версии можно найти на сайте организации (www.ipcc.ch).

Глоссарии МГЭИК широко используются на национальном и международном уровнях при формировании современной понятийной базы и терминологии в науке о климате и сопряженных разделах других наук.

Следует отметить, что за время существования МГЭИК в ее докладах возрастает объем прикладной информации. Так, в Шестом оценочном докладе разработан интерактивный Атлас, который является весьма полезным пользовательским инструментом.

Значение МГЭИК для ее основной целевой аудитории – разработчиков климатической политики на национальном и международном уровнях

Проблема современных и будущих изменений глобального климата, последствий и возможных ответных стратегий имеет очень существенную научную составляющую. Необходима объективная научная информация, на которую могут опираться политические решения на национальном, региональном и глобальном уровнях, направленные на предотвращение нежелательных изменений и/или на адаптацию к ним. Формирование, поддержание и актуализация соответствующей научной базы – задача МГЭИК.

«Принципы, управляющие работой МГЭИК» – основной процедурный документ, регулирующий работу этой организации. В нем приведены, в частности, процедуры выдвижения и отбора авторов и редакторов-рецензентов для докладов, рецензирования промежуточных и окончательных проектов докладов, приемки докладов на сессиях МГЭИК. Все эти процедуры имеют межправительственный характер. Именно эти процедуры, в том числе требующие профессионального и географического баланса авторских коллективов, использования только качественных научных источников информации, а также стремление к консенсусу при одобрении докладов на сессиях МГЭИК являются основой доверия правительств стран-членов МГЭИК к результатам докладов этой научной организации.

Результаты научных докладов МГЭИК использовались и используются в международном переговорном процессе, в том числе при разработке и принятии международных климатических соглашений – Рамочной конвенции ООН об изменении климата (1992 г.), Киотского протокола (1997 г.) и Парижского соглашения (2015 г.).

«Глобальное подведение итогов» (global stocktake), т.е. оценка того, насколько согласованные сторонами РКИК ООН сокращения выбросов парниковых газов обеспечат достижение глобальной климатической цели, заявленной в Парижском соглашении (ограничение превышения доиндустриальных уровней глобальной температуры 1.5-2°C), основывается на результатах научных докладов МГЭИК.

Методические рекомендации по оценке антропогенных выбросов и поглощения парниковых газов, изложенные в «Руководящих принципах национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК», широко используются странами, являющимися сторонами РКИК ООН, в ежегодной отчетности стран по выбросам и поглощению парниковых газов (кадастры).

Для разработчиков климатической политики на национальном уровне научные доклады МГЭИК прежде всего демонстрируют современный уровень в постановке задач, в методах и средствах их решения и в форме представления результатов, которые им целесообразно ожидать от своих научных экспертов.

Коррективы в деятельности МГЭИК, которые целесообразны в связи с текущим состоянием науки и потребностями климатической политики в научной информации

За 35 лет своей работы МГЭИК стала наиболее авторитетной организацией в своей области. Ее деятельность была высоко оценена присуждением Нобелевской премии мира в 2007 г. Принципы ее организации и деятельности в целом обеспечивают стабильную работу, соответствующую исходному мандату ООН.

Однако к настоящему времени в ее деятельности обозначился ряд проблем, разрешение которых требует повышенного внимания МГЭИК к нескольким структурным и функциональным аспектам.

Хотя в последнем, шестом цикле работы кооперация между Рабочими группами МГЭИК усилилась, в частности при совместной подготовке трех специальных докладов, она все же нуждается в дальнейшем усилении. Об этом свидетельствует как различие в подходах Рабочей группы I и Рабочей группы III к построению сценариев антропогенных эмиссий парниковых газов, так и явная необходимость в участии Рабочей группы I в совершенствовании методов оценки антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов, которые представлены Целевой группой по кадастрам в «Руководящих принципах национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК». Целесообразно усиление координации в деятельности Рабочих групп МГЭИК и Целевой группы по кадастрам.

Необходимо обратить серьезное внимание на использование в научных докладах МГЭИК литературы на иных языках в дополнение к англоязычной. В настоящее время последняя явно доминирует при цитировании.

Дополнительного внимания требует качество переводов докладов МГЭИК на основные языки ООН, в том числе на русский. Для повышения качества целесообразно привлекать к переводу профессиональных ученых, а также назначать научных редакторов переводов.

Давно назрела проблема унификации методологии обобщения данных и их оценки, которой пользуются авторские коллективы глав научных докладов МГЭИК. Хотя по своему мандату МГЭИК не проводит оригинальных научных исследований, она использует некоторые собственные методологии для обобщения опубликованных результатов научных исследований и данных мониторинга и моделирования. Эти методологии нуждаются в унификации, рассмотрении и утверждении на уровне сессии МГЭИК. Пользователи докладов МГЭИК должны иметь доступ к данным, на которых основаны доклады. Необходима прозрачность в отношении происхождения данных и процедур их обработки. Все это будет способствовать дальнейшему укреплению доверия к результатам обобщения со стороны пользователей, прежде всего – пра-

вительств. При этом, возможно, более полный учет информации из имеющихся научных источников – самый первый необходимый шаг в этом направлении.

В настоящее время авторскими группами МГЭИК в ряде случаев самостоятельно решаются следующие задачи:

- атрибуция изменений климата и их последствий;
- количественная и качественная оценка неопределенности результатов;
- оценка риска для различных систем от изменения климата с учетом и последствий и вероятности воздействия и представление результатов в виде так называемых «диаграмм тлеющих углей» (burning ember diagrams).

По оценке неопределенности существует Руководство 2010 года (Mastrandrea, M.D., C.B. Field, T.F. Stocker, O. Edenhofer, K.L. Ebi, D.J. Frame, H. Held, E. Kriegler, K.J. Mach, P.R. Matschoss, G.-K. Plattner, G.W. Yohe, and F.W. Zwiers, 2010: Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties), разработанное под эгидой МГЭИК, но формально не утвержденное сессией МГЭИК. По методам атрибуции и оценке риска методологическая информация разбросана по разным частям Пятого и Шестого оценочных докладов МГЭИК. Руководство пока не разработано.

Следует отметить, что Рабочая группа I и Рабочая группа II используют разные подходы к оценке неопределенностей – соответственно базирующийся на понятии «вероятности» (likelihood) и понятии «уверенности» (confidence). Необходима методологическая работа по выработке унифицированного подхода.

Для расширения возможностей использования научной и методической продукции МГЭИК широкими кругами пользователей – преподавателями и студентами, общественными организациями и другими – была бы полезна публикация отдельными брошюрами адаптированных изданий, например, «Ответов на часто задаваемые вопросы» (такие разделы включены в научные доклады МГЭИК шестого цикла работы).

На указанные выше проблемы целесообразно обратить внимание уже в начале седьмого цикла работы МГЭИК, поскольку их нерешенность затрудняет практическое использование результатов оценок МГЭИК при разработке климатической политики.

Дальнейшее участие российских экспертов в деятельности МГЭИК: возможности, проблемы и перспективы

В шестом цикле работы МГЭИК (2015-2023 гг.) российские эксперты участвовали в подготовке всех научных и методологического докладов этой организации. В июле 2023 г. на 59-й сессии МГЭИК было избрано новое руководство этой организации и начался седьмой цикл работы. В предыдущем цикле уже было решено подготовить специальный доклад о климате городов и методологический доклад о короткоживущих климатических факторах. Согласно традиции, вскоре МГЭИК определит остальные доклады, которые

будут подготовлены в этом цикле, и сроки их подготовки. Затем на постановочных совещаниях будет согласована структура каждого из докладов, и после их утверждения на сессии МГЭИК последует призыв к странам-членам МГЭИК выдвигать кандидатов в авторы и редакторы-рецензенты этих докладов.

В настоящее время многие из российских экспертов, участвовавших в подготовке предыдущих докладов МГЭИК, занимают в стране руководящие научные позиции. Сейчас необходимо привлечение к этой работе также нового поколения ученых. Молодые ученые, привлекаемые к этой работе, могли бы на первом этапе ассистировать ведущим авторам и координирующим ведущим авторам, быть авторами-контрибьютерами докладов МГЭИК.

Следует расширить масштабы рецензирования промежуточных и окончательных версий докладов МГЭИК в России. К этому желательно привлекать не только научных работников, но и сотрудников министерств и ведомств, а также экспертов из бизнес-структур. В этом могли бы активно участвовать и молодые ученые, что способствовало бы как приобретению ими полезного опыта, так и повышению качества докладов.

Специалисты, выдвигаемые для работы над докладами МГЭИК, должны обладать высокой профессиональной эрудицией, иметь публикации в солидных научных изданиях, уметь работать на английском языке и, что обязательно, иметь желание работать над докладами МГЭИК. Последнее имеет большое значение, поскольку эта работа выполняется на волонтерских основаниях (до настоящего времени) и требует значительных затрат сил и времени. В связи с этим целесообразно безотлагательно обратиться к руководству российских учреждений, ведущих научно-исследовательскую и методическую работу в науке о климате и сопряженных разделах других наук, с просьбой рекомендовать таких специалистов.

Целесообразно существенно увеличить число российских экспертов, выдвигаемых для работы авторами, редакторами-рецензентами и рецензентами докладов МГЭИК, для участия в семинарах МГЭИК, а также для работы в руководящих органах МГЭИК.

Российским авторам и редакторам-рецензентам докладов МГЭИК необходимо обеспечить оперативный доступ к профильным отечественным и международным научным изданиям. Целесообразно принять меры к обеспечению технической поддержки этого доступа. Нужно учитывать авторство в докладах МГЭИК при оценке эффективности работы российских ученых.

Представитель России в МГЭИК осуществляет функции национального координатора по вопросам МГЭИК в стране, в том числе:

- формирует и актуализирует базу данных потенциальных кандидатов в авторы и редакторы-рецензенты докладов МГЭИК;
- организует рецензирование промежуточных и окончательных проектов докладов МГЭИК;
- организует распространение информации о важнейших результатах этих докладов среди различных групп потенциальных пользователей.

Учитывая большой и все возрастающий объем работы по этим направлениям, целесообразно просить Росгидромет (головное ведомство по работе с

МГЭИК в России) разрешить создать для обеспечения этой работы небольшую группу поддержки в Институте глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля.

Назрел вопрос о финансовой и организационной поддержке со стороны государства российских экспертов, отобранных МГЭИК для работы над научными и методологическими докладами. Было бы своевременно начать проработку этого вопроса с соответствующими органами.

Для большего учета достижений отечественной науки при подготовке докладов МГЭИК целесообразно увеличить возможности перевода и публикации научных статей, брошюр и книг российских авторов по тематике МГЭИК на английском языке.

Для активизации процесса распространения информации о результатах работы МГЭИК (outreach) целесообразно периодически проводить конференции, на которые приглашались бы ученые, работники министерств и ведомств и представители бизнес-сообщества России, других стран СНГ и ЕАЭС и ученые из других стран.

Участники выразили признательность российским ученым, которые участвовали в качестве авторов, редакторов-рецензентов и рецензентов в подготовке научных докладов МГЭИК и методологической работе Целевой группы по кадастрам.

Участники отметили своевременность и полезность организации данного Круглого стола и в связи с этим выразили благодарность организаторам – Институту глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля и Научному совету РАН по проблемам климата Земли.

Список участников

Приветствия и вводные замечания:

Соколов Владимир Владимирович, заместитель руководителя Росгидромета

Бондур Валерий Григорьевич, академик РАН, сопредседатель Научного совета РАН по проблемам климата Земли

Мохов Игорь Иванович, академик РАН, сопредседатель Научного совета РАН по проблемам климата Земли

Романовская Анна Анатольевна, член-корреспондент РАН, директор ИГКЭ

Российские авторы и редакторы-рецензенты докладов МГЭИК

Башмаков Игорь Алексеевич, доктор экономических наук, генеральный директор Центра энергоэффективности-XXI век (ЦЭНЭФ-XXI)

Володин Евгений Михайлович, профессор РАН, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН

Гельфан Александр Наумович, член-корреспондент РАН, заведующий отделом гидрологии речных бассейнов Института водных проблем РАН

Гинзбург Вероника Александровна, кандидат географических наук, заместитель директора Института глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля

Гитарский Михаил Леонидович, доктор биологических наук, директор проекта Департамента валидации и верификации ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России

Гулев Сергей Константинович, член-корреспондент РАН, заведующий Лабораторией взаимодействия океана и атмосферы и мониторинга климатических изменений Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, профессор кафедры океанологии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

Елисеев Алексей Викторович, профессор РАН, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры физики атмосферы физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, главный научный сотрудник Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

Золина Ольга Геннадиевна, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории взаимодействия океана и атмосферы и мониторинга климатических изменений Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

Инсаров Григорий Эммануилович, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории биогеографии Института географии РАН

Катцов Владимир Михайлович, доктор физико-математических наук, директор Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова Росгидромета

Кокорин Алексей Олегович, кандидат физико-математических наук, международный эксперт по вопросам РКИК ООН, Региональный экологический центр Центральной Азии

Липка Оксана Николаевна, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник Института глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля

Семенов Сергей Михайлович, член-корреспондент РАН, научный руководитель ИГКЭ, представитель России в МГЭИК

***Сотрудники министерств и ведомств,
курирующие вопросы климатической повестки***

Дмитриева Татьяна Михайловна, кандидат географических наук, начальник отдела международного сотрудничества ФКУ «Гидрометсервис»

Дыган Михаил Михайлович, кандидат технических наук, директор проектов ФГБУ "Российское энергетическое агентство" Минэнерго России

Магомедов Шугаиб Эльдарович, первый секретарь, Департамент международных организаций, Министерство иностранных дел Российской Федерации

Петрунина Ирина Анатольевна, директор департамента конкуренции, энергоэффективности и экологии Минэкономразвития

Климатические эксперты бизнес-структур

Романов Константин Владимирович, кандидат экономических наук, начальник отдела ПАО «Газпром», генеральный директор ООО «Газпром водород»

Семенцов Сергей Павлович, кандидат экономических наук, заместитель руководителя Центра устойчивого развития Института экспертизы ВЭБ

Чайка Андрей Николаевич, независимый эксперт

Честной Сергей Юрьевич, кандидат экономических наук, официальный представитель ОК РУСАЛ по внешним связям

Организационная группа

Гладильщикова Анна Артемьевна, кандидат химических наук, ученый секретарь ИГКЭ

Шушпанов Виктор Сергеевич, техническое модерирование, Лаборатория информационных технологий ИГКЭ

О моделировании склонового стока на горных и предгорных водосборах

К.Н. Анахаев^{1,2)}, В.В. Беликов^{2)**}*

¹⁾ Институт прикладной математики и автоматизации
Кабардино-Балкарского научного центра
Российской академии наук (ИПМА КБНЦ РАН),
Россия, Кабардино-Балкарская Республика, 360000, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89А

²⁾ Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН),
Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3

Адрес для переписки: * *anaha13@mail.ru*, ** *belvv@bk.ru*

Реферат. В условиях высотной изменчивости климатических и географических характеристик горных и предгорных территорий проблема изучения склонового (дождевого) стока имеет важное значение для определения параметров как паводковых, так и селевых потоков. Горные территории отличаются сложной геоморфологией, малыми площадями водосборов, большими уклонами русел водотоков, наличием наносоводных и селевых потоков с заторно-волновым характером их движения и др. Поэтому оценка паводковой и селевой опасности горных водотоков является важным и актуальным вопросом в обеспечении безопасности жизнедеятельности на данных территориях. Эта оценка создает основу для геофизического моделирования склонового стока. В работе представлены расчетные результаты максимальных значений ливневого и селевого расходов для региона Центрального Кавказа (с основными реками Баксан, Чегем, Черек), показывающие достаточно близкое соответствие (со средней погрешностью + 4.6%) с известными базовыми значениями ливневых расходов для 16 водотоков, а также с независимыми данными МГУ им. М.В. Ломоносова для р. Ашамба Краснодарского края. Впервые вычислены также указанные параметры еще для 16 водотоков – притоков основных рек региона. Предложена зависимость для нахождения максимального (волнового) расхода селевого потока с учетом 16 гидрогеоморфологических особенностей водосборного бассейна и селевого русла водотока, учитывающая их изменения во времени.

Ключевые слова. Моделирование, горные водотоки, водосборная площадь, длина реки, дождевой сток, максимальный ливневый расход, расход селевого потока.

On the modeling of slope runoff at mountain and foothill catchments

K.N. Anakhaev^{1,2)}, V.V. Belikov²⁾***

¹⁾ Institute of Applied Mathematics and Automation of the Kabardino-Balkarian Scientific Center
of the Russian Academy of Sciences (IPMA KBNC RAS),
89A, Shortanova st., 360000, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russian Federation

²⁾ Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (IVP RAS),
3, Gubkina str., 119333, Moscow, Russian Federation

Correspondence address: **anaha13@mail.ru*, ***belvv@bk.ru*

Abstract. In conditions of high-altitude variability of climatic and geographical characteristics of mountainous and foothill territories, the problem of studying slope (rain) runoff is important for determining the parameters of both flood and mudflow flows. Mountain territories are characterized by complex geomorphology, small catchment areas, large slopes of watercourses, the presence of sediment and mudflow flows with a sluggish-wave nature of their movement, etc. Therefore, the assessment of flood and mudflow hazards of mountain watercourses is an important and urgent issue in ensuring the safety of life in these territories. This assessment forms the basis for geophysical modeling of slope runoff. The paper presents the calculated results of the maximum values of stormwater and mudflow flows for the Central Caucasus region (with the main rivers Baksan, Chegem, Cherek), showing a fairly close correspondence (with an average error of + 4.6%) with the known basic values of stormwater flows for 16 watercourses, as well as with independent data from Lomonosov Moscow State University for the Ashamba river of the Krasnodar Territory. For the first time, these parameters were also calculated for another 16 watercourses – tributaries of the main rivers of the region. A dependence is proposed for finding the maximum (wave) flow rate of a mudflow, taking into account 16 hydrogeomorphological features of the catchment basin and the mudflow channel of the watercourse, taking into account their changes over time.

Keywords. Modeling, mountain watercourses, catchment area, river length, rain flow, maximum storm flow rate, mudflow rate.

Введение

В условиях высотной изменчивости климатических и географических характеристик горных и предгорных территорий проблема изучения склонового (дождевого) стока имеет важное значение для определения параметров как паводковых, так и селевых потоков. Множество работ, посвященных данной проблеме, относятся, как правило, к равнинным местностям (Иогансон, 1959), горные же водосборные территории отличаются рядом особенностей, в том числе:

– относительно малыми площадями водосборов и большими уклонами русел (и склонов) водотоков-притоков 1 и 2 порядка основных рек (Непорожний, 1947) и возможностями возникновения в них паводковых и селевых потоков;

– более быстрым поступлением расходов воды в замыкающие створы;
– возможностью выпадения дождевых осадков заданной обеспеченности одновременно на всей водосборной территории водотока;

– большой (иногда предельной) насыщенностью наносоводных и селевых потоков твердой (грунтовой) составляющей и заторно-волновым характером их движения;

– наличием водопадов (уступов) и резко изменяющимися уклонами русла водотока;

– значительными размывами дна и оснований береговых склонов с оползаниями и обрушениями последних и др.

В связи с интенсивным освоением горных районов (промышленным, сельскохозяйственным, дорожным, рекреационным, спортивным) и необходимостью обеспечения при этом безопасности жизнедеятельности в них особую актуальность приобретают вопросы оценки паводковой и селевой опасности данных территорий, что неразрывно связано с определением геоморфологических, гидрологических и селевых характеристик их водотоков.

Методы и материалы

Рассматривая изложенные положения применительно к решению практических территориальных задач в регионе Центрального Кавказа (в бассейнах основных рек Баксан, Чегем, Черек-Безенгийский, Черек-Балкарский), значения максимальных расходов ливневых (дождевых) потоков Q_{max} будем определять как расходы 1% обеспеченности (вероятности превышения) $Q_{1\%}$, то есть $Q_{max} = Q_{1\%}$.

При этом, следует отметить, что, несмотря на достаточно большое количество опубликованных работ по селевой проблематике данного региона (например, только по бассейну р. Герхожан – более 200 (Запороженко, 2003)), гидрогеоморфологические характеристики водотоков-притоков 1 и 2 (в особенности) порядка основных рек остаются большей частью практически неизученными.

Как известно (СП 33-101-2003, 2004), одним из основных методов определения дождевых (ливневых) расходов воды в бассейнах водотоков с неизученными гидрологическими характеристиками является использование данных рек-аналогов (при наличии).

Учитывая чрезвычайно разнообразные гидрогеоморфологические и географические особенности горных водотоков, их относительно небольшие водосборные площади ($\leq 200 \text{ км}^2$), а также отсутствие изученных рек-аналогов, величину максимального ливневого расхода определяем с учетом территориальных условий (Гегиев, Чигирова, 2022) в соответствии с известной методикой для максимального срочного расхода воды 1% обеспеченности

($Q_{1\%}$ м³/с) по формуле предельной интенсивности (тип III) (СП 33-101-2003, п. 7.44, 2004; Гегиев, Чигирова, 2022; СНиП 2.01.14-83, п. 4.18, 1985)

$$Q_{1\%} = q_{1\%} \varphi H_{1\%} \delta F, \quad (1)$$

где F (км²) – водосборная площадь водотока; $q_{1\%}$ максимальный модуль стока ежегодной вероятности превышения 1%, выраженный в долях от произведения $\varphi H_{1\%}$ при δ , определяемый по (СНиП 2.01.14-83, прил. 21, 22, 1985) в зависимости от гидрогеоморфологической характеристики русла водотока Φ_p (2) и продолжительности склонового добегания $\tau_{ск}$ (мин) (СНиП 2.01.14-83, п. 4.20, 1985) (см. ниже); φ – сборный коэффициент стока, зависящий от особенностей геоморфологии водосбора, русла водотока и типа почв по (СНиП 2.01.14-83, прил. 27, 1985), приближенное значение которого для горных районов Кавказа может быть принято равным $\varphi \approx 0.2-0.6$ (меньшие значения для горно-лесных и супесчаных почв, большие – для горно-луговых суглинистых почв); $H_{1\%}$ (мм) – суточный слой осадков 1% обеспеченности (по данным ближайшей метеостанции), максимальное значение которого для большей части верховьев бассейнов основных рек рассматриваемого региона может быть принято (с учетом селеносности притоков с некоторым запасом (Казаков, 2019)) $H_{1\%} = 120$ мм (Запороженко, 2003; Гегиев, Чигирова, 2022; Кидяева и др., 2018; Инюхин и др., 2013); δ – поправочный коэффициент влияния озерности бассейна водотока на сток – для рассматриваемых условий $\delta = 1$.

Результаты

Значение гидрогеоморфологической характеристики русла водотока Φ_p находится по формуле (СП 33-101-2003, п. 7.44, 2004; СНиП 2.01.14-83, п. 4.19, 1985)

$$\Phi_p = \frac{1000L}{m_p J_u^m \sqrt[4]{F \varphi H_{1\%}}}, \quad (2)$$

в которой L (км) – длина водотока; J_u (‰) – уклон водотока, значение которого для рассматриваемых территориальных условий горных водотоков предлагается определять по усовершенствованной зависимости (3) – как средний уклон нижней половины русла водотока (до вершины конуса выноса), где формируется завершающая структура склонового потока,

$$J_u = \frac{\nabla_m - \nabla_k}{0.5L - l_k} 1000, \quad (3)$$

где ∇_m , ∇_k (м) – абсолютные отметки средней (по длине реки) части и вершины конуса выноса русла водотока, определяемые натурными измерениями, либо по топографическим картам или дистанционно-геофизическими методами; l_k (км) – длина конуса выноса водотока. При отсутствии

последнего (или его незначительности – менее 0.1 км) (Непорожний, 1947; Запороженко, Каменев, 2011) в формулу (3) вместо $\bar{V}_k$ подставляется отметка устья притока $\bar{V}_k = \bar{V}_u$, а значение l_k приравнивается $l_k \approx 0$; m_p , m – гидравлические параметры состояния и шероховатости русла, принимаемые для водотоков со средними уклонами $J_u \geq 35\%$ по (СП 33-101-2003, табл. Б8, 2004; СНиП 2.01.14-83, прил. 18, 1985), равными, соответственно, $m_p = 10$ м/мин., $m = 1/7 = 0.143$.

При этом, продолжительность склонового добега $\tau_{ск}$ (мин) для данных горных районов на основе (СНиП 2.01.14-83, п. 4.20, 1985) приближенно принимается равным $\tau_{ск} = 10$ мин.

С учетом изложенного, территориальное значение максимального модуля расхода $q_{1\%}$ для Северного склона Большого Кавказа с высотами более 1500 м (СНиП 2.01.14-83, прил. 22, район № 30, 1985) в зависимости от подсчитанной по формуле (2) величины Φ_p и принятого значения $\tau_{ск}$ определяются по таблице (СНиП 2.01.14-83, прил. 21, 1985), либо – по предлагаемой новой аппроксимирующей зависимости $q_{1\%} = f(|\Phi_p|)$ в виде:

$$q_{1\%} = (0.5\gamma^3 - 3.7\gamma^2 - 1.43\gamma + 38.4) \cdot 10^{-2}, \quad (4)$$

в которой $\gamma = \ln |\Phi_p|$, где $|\Phi_p|$ принимает значения по модулю (без учета размерности) формулы (2).

Для удобства практических расчетов величину коэффициента φ в формуле (1) предлагается определять аналитически по предлагаемой новой упрощенно-приближенной эмпирической формуле, в зависимости от обратной величины формы бассейна (L^2/F) (Смирнов и др., 1968), в виде:

$$\varphi = 0.15 (1 + 0.5L^2/F). \quad (5)$$

В следующей табл. 1 приводится сравнение максимальных значений ливневых расходов $Q_{max} = Q_{1\%}$, подсчитанных на основе вышеприведенных формул (1) - (5), с известными базовыми значениями для 16 различных водотоков-притоков 1 порядка основных рек Баксана, Чегема, Черека при принятом максимальном значении суточных осадков, равном $H_{1\%} = 120$ мм.

Как следует из табл. 1, результаты расчетов максимальных ливневых расходов Q_{max} , подсчитанных на основе использования предложенных эмпирических зависимостей в общей формуле (1) для 16 различных водотоков-притоков 1 порядка бассейнов основных рек Центрального Кавказа с известными базовыми значениями при максимальных суточных осадках $H_{1\%} = 120$ мм, дают достаточно приемлемое соответствие (с среднеарифметической погрешностью +4.6%) с известными базовыми значениями указанных расходов (Схема..., 1987; Сейнова, Золотарев, 2001). Аналогичное значение максимального ливневого расхода $Q_{1\%} = 379.19$ м³/с, подсчитанное для р. Ашамба Краснодарского края при: $F = 44.3$ км²; $L = 11.4$ км; $l_k = 0$; $\delta = 1$; $m_p = 10$ м/мин; $m = 0.143$; $\bar{V}_m = 130$ м; $\bar{V}_k = \bar{V}_u = 110$ м; $H_{1\%} = 253$ мм, близко (~ 5.2%) согласуется с данными МГУ (~ 400 м³/с) по независимому источнику (Архипкин и др., 2013).

Таблица 1. Сравнение подсчитанных максимальных ливневых расходов $Q_{max} = Q_{1\%}$ с базовыми значениями при суточных осадках $H_{1\%} = 120$ мм
Table 1. Comparison of calculated maximum storm water costs $Q_{max} = Q_{1\%}$ with baseline values at daily precipitation $H_{1\%} = 120$ mm

Название водотока, отметки $\nabla_m = \nabla_k$ (м)	Площадь водосбора, F (км ²)	Длина реки (конуса выноса), l_k (км)	Уклон нижнего течения, J_n (‰)	Коэффициент стока, φ	Максимальный расход = (м ³ /с)		
					Базовое (Зап.2003; Сх.,1987; Зап-Док, 2019)	по автограм	%
1	2	3	4	5	6	7	8
Бассейн основной реки Баксан							
Гижгит (до хвосто-хранилища) 1990/1270	136.0 (Гегиев К.А. и др., 2022)	24.8	58	0.49	100.0 (Запорожченко Э.В. и др.,2019; Гегиев К.А. и др., 2022)	99.0	-1.0
Камык 2080/1350	24.2 (Сейнова И.Б. и др., 2001)	8.5(0.5) (Сейнова И.Б. и др., 2001)	196	0.37	40.0 (Запорожченко Э.В., 2003)	42.2	+5.6
Герхожан 2180/1330	74.1 (Схема..., 1987)	11.8(0.6) (Схема..., 1987)	160	0.29	61.4 (Схема..., 1987)	81.0	+31.9
Кестанты 1640/1080	133.0 (Схема..., 1987)	25.0(1.5) (Схема, 1987)	51	0.50	96.0 (Схема..., 1987)	97.6	+1.6
Боклу-Ырхы, с. Лашкута 1020/840	4.2 (Схема..., 1987)	3.0(0.7) (Кадастр, 2001)	225	0.31	13.0 (Схема..., 1987)	12.6	-3.1
Бассейн основной реки Чегем							
Джылгы-суу 2160/1500	39.4 (Схема..., 1987)	10.8 (Кадастр, 2001)	120	0.36	47.0 (Схема..., 1987)	52.0	+10.6
Булунгу-суу 2400/1700 (Рис. 1, а)	43.8 (Схема..., 1987)	10.0(0.7)	163	0.32	50.0 (Схема..., 1987)	58.2	+16.5
Сылык-суу 2240/1585 (Сейнова И.Б. и др., 2001) (Рис. 1, б)	11.3 (Схема..., 1987)	5.8	225	0.37	23.0 (Схема..., 1987)	26.5	+15.2
Ырхы-кол с. Н.Чегем 1030/910	4.7 (Схема..., 1987)	2.2(0.6)	240	0.23	14.0 (Схема..., 1987)	13.4	-4.6
Бассейн основной реки Черек							
Нальчик, г. Нальчик 990/550	278.0 (Схема, 1987)	34.0 (Схема, 1987)	26	0.46	237.0 (Схема, 1987)	192.4	-18.8
Хеу 820/550	94.6 (Схема, 1987)	25.4	21	0.66	78.0 (Схема, 1987)	89.0	+14.2

Продолжение таблицы 1.

1	3	4	5	6	7	8	9
Бассейн основной реки Черек-Безенгийский							
Хумалан-суу с. Кара-су (Анахаев К.Н. и др., 2016)1190/1000	3.8 (Схема..., 1987)	1.8(0.2)	271	0.21	12.0 (Схема..., 1987)	11.5	-3.7
Кара-суу 1410/980	83.8 (Схема..., 1987)	13.5	64	0.31	73.0 (Схема..., 1987)	66.6	-6.1
Кышлык-суу 1840/1380	17.2 (Схема..., 1987)	5.2	175	0.27	29.0 (Схема..., 1987)	32.7	+12.7
Жидре-суу с. Безенги (Анахаев К.Н. и др., 2016)1700/1300	1.8 (Схема..., 1987)	2.0	400	0.21	7.8 (Схема..., 1987)	7.2	-7.7
Бассейн основной реки Черек-Балкарский							
Хашха-суу 1370/1180	12.7 (Схема..., 1987)	3.0	110	0.20	24.0 (Схема..., 1987)	26.7	+11.2

Примечание: Значения длин рек (в курсиве) и отметок получены из топографической карты



а



б

Рисунок 1. Завал жилых домов в с. Булунгу селевыми выносами рек
а) р. Булунгу-суу, 2007 г. (табл. 1, п. 7); б) р. Сылык-суу, 2010 г. (табл. 1, п. 8). Селевые потоки изменили направление в сторону жилых домов при остановках валунов (3-4 м) на вершинах конусов выноса

Figure 1. Blockage of residential buildings in the village of Bulungu by mudflows of rivers
a) the Bulungu-suu river, 2007 (Table 1, item 7); b) the Sylyk-suu river, 2010 (Table 1, item 8). Mudflows changed direction towards residential buildings when boulders stopped (3-4 m) on the tops of the removal cones

На основе полученных значений $Q_{1\%}$ по формуле (6) определяются также ливневые расходы реки для других обеспеченностей $Q_{p\%}$:

$$Q_{p\%} = Q_{p\%} \cdot \gamma_{p\%} \tag{6}$$

в котором значение переходного коэффициента $\gamma_{p\%}$ для рассматриваемых горных и предгорных территорий находится по табличным данным (СНиП 2.01.14-83, прил. 19, 20, 1985) для района № 13 со средней высотой

водосбора более 1000 м, либо по предлагаемой новой аппроксимирующей зависимости:

$$\gamma_{p\%} = 1 - 0.173 \cdot \ln(p\%), \quad (7)$$

где $p\%$ – значение требуемой обеспеченности (вероятности превышения) ливневых расходов.

В табл. 2 приводятся впервые полученные по предлагаемой методике расчетные значения максимальных ливневых расходов $Q_{max} = Q_{1\%}$ для ряда водотоков-притоков 1 порядка основных рек Центрального Кавказа при суточной интенсивности ливневых осадков $H_{1\%} = 120$ мм и заданных значениях водосборной площади.

Таблица 2. Максимальные ливневые расходы Q_{max} , рассчитанные по предлагаемой методике для притоков 1 порядка основных рек Баксан, Чегем, Черек

Table 2. Maximum stormwater costs Q_{max} , calculated according to the proposed methodology for tributaries of the 1st order of the main rivers Baksan, Chegem, Cherek

Название водотока, $V_m = V_k$ (м)	Площадь водосбора, F (км ²)	Длина реки (и конуса выноса l_k), (км)	Уклон нижнего течения реки, J_n (‰)	Коэффициент стока, φ	Ливневый расход, Q_{max} (м ³ /с)
1	2	3	4	5	6
Бассейн основной реки Баксан					
Кырткы (до конуса выноса) 2320/1590	125.0 (Сейнова И.Б. и др., 2001)	17.8	82	0.34	90.6
Сылтран-суу (до конуса выноса) 3360/1590	12.8 (Кадастр..., 2001)	7.5	472	0.48	35.7
Челмас 2500/1500	3.2 (Кадастр..., 2001)	2.8(0.3) (Кадастр..., 2001)	1110	0.33	13.1
Кубасанты (до конуса выноса) 2480/1800	11.8 (Сейнова И.Б. и др., 2001; Инс. 1976)	6.0 (Инструкция..., 1976)	243	0.34	27.2
Бассейн основной реки Чегем					
Кам-суу 1920/1550	10.7 (Кадастр..., 2001)	3.1	239	0.22	25.3
Кардан 1970/1480	26.3 (Кадастр..., 2001)	8.4	117	0.35	39.6
Бассейн основной реки Черек-Безенгийский					
Шыкы-суу 1900/1550	15.8 (Кадастр..., 2001)	3.4 (0.3)	250	0.20	35.1
Беккам-суу 2500/1750 (Рис. 2)	4.6 (Кадастр..., 2001)	3.6	417	0.36	15.5

Продолжение таблицы 2.

1	2	3	4	5	6
Урель-суу 2500/1920	4.9 (Кадастр..., 2001)	3.0 (0.6)	682	0.29	16.2
Думала 2300/1620	82.7 (Схема..., 1987)	13.3 (0.8)	116	0.31	78.8
Удур-суу 1900/1100	15.6 (Схема..., 1987)	8.6 (0.4)	257	0.51	36.4
Шиле 2800/1900	19.2 (Схема..., 1987)	7.8 (0.3)	250	0.39	38.6
Ушхар 2500/1550	30.8 (Схема..., 1987)	9.9	162	0.39	47.2
Бассейн основной реки Черек-Балкарский					
Чайнашки 3240/2000	62.0 (Схема..., 1987)	15.5 (0.7)	175	0.44	73.3
Гюльчи 3240/2000	11.1 (Схема..., 1987)	3.7 (0.6)	360	0.24	27.0
Рцывашки 2120/1280	54.2 (Схема..., 1987)	14.0 (1.3)	147	0.42	64.8

Примечание: Значения длин рек (в курсиве) и отметки получены из топографической карты



Рисунок 2. Селевое русло р. Беккам-суу (табл. 2, п. 8)
а) на спаде селевого потока 09.08.17 г. (видео Анаева А.Т.); б) после прохождения селея 11.07.20 г. (фото Анаева М.Т.)

Figure 2. Mudflow channel of the Beckam-suu river (Table 2, item 8):
a) on the decline of the mudflow on 09.08.17 (video by A.T. Anaev); b) after passing the mudflow on 11.07.20 (photo by M.T. Anaev)

Для определения максимальных паводковых расходов рек Q_{pav} необходимо дополнительно учитывать также текущие расходы в русле реки Q_{rus} (Шафиев, 2014) и расходы волн возможного прорыва вышерасположенных озер (водоемов) Q_{pro} (Кидяева и др., 2018):

$$Q_{pav} = Q_{max} + Q_r + Q_{pro} \tag{8}$$

в которой значение прорывного расхода озер (водоемов) определяется по соответствующим зависимостям (например, по (Шафиев, 2014)), при этом величиной текущего расхода реки Q_{rus} можно пренебречь при относительной ее незначительности ($Q_r < 0.01Q_{max}$).

В случаях селеносности рассматриваемых водотоков-притоков 1 порядка бассейнов основных рек возникает вопрос об определении возможных расходов селевого потока. При этом, значение приведенного (условно-равномерного по длине водотока (Иогансон, 1959)) расхода селевого потока Q_c , соответствующее максимальному паводковому расходу Q_{pav} , может быть определено по аналогии с (Смирнов и др., 1968; Флейшман, 1978; Байнатов, 1992; Перов, 2012):

$$Q_c = (1 + \beta)Q_{pav}, \quad (9)$$

где β – весовое наносоводное отношение, выражаемое на основе (Соколовский, 1947) в виде:

$$\beta = \frac{P\gamma_s}{(100-P)\gamma_w} \quad (10)$$

γ_s и γ_w – соответственно, объемные веса наносов и воды; P – процент (%) весового содержания наносов, значение которого может быть найдено по формуле Херхеулидзе И.И. (Иогансон, 1959; Херхеулидзе, 1947), в зависимости от уклона водотока:

$$P = 80 \cdot i^{0.4}, \quad (11)$$

в последней уклон водотока, равный $i = 0.001 \cdot j_u$, выражен в долях единицы.

Дискуссия

Основной особенностью прохождения максимально-пиковых значений волнового селевого расхода Q_c^w в виде селевого вала является ее кратковременность (Флейшман, 1978; Соколовский, 1947), равная времени прохождения волны (несколько секунд). Величина указанного расхода Q_c^w зависит от гидрогеоморфологических особенностей водосбора и селевого русла (наличия прорывоопасных озер и заторных водоемов, поворотов и извилистости русла, обвальных и оползневых береговых склонов и др.) и может намного (в несколько раз) превышать величину приведенного (условно-равномерного (Иогансон, 1959)) расхода селя Q_c , определяемого по (9). Значение Q_c^w для водотока-притока 1 порядка предлагается определять с учетом возможности его максимального проявления (Казаков, 2019), в том числе при заторности селевого русла (Гегиев, Чигирова, 2022; Флейшман, 1978; Байнатов, 1992; Перов, 2012; Смирнов, 1959; Виноградов, 1978), по зависимости:

$$Q_c^w = Q_c \xi + \Delta Q_{rus}, \quad (12)$$

в которой ΔQ_{rus} – часть текущего расхода реки Q_{rus} (включая застойные и водоворотные зоны), захватываемая (присоединяемая) селевым валом из русла реки за счет опережающей скорости движения селя, определяемая по (Смирнов, 1959; Кавецкий, Смирнов, 1957); ξ – параметр, учитывающий заторные гидрогеоморфологические особенности водосбора и селевого русла, значения которого предлагается определять по новой оценочной формуле:

$$\xi = 1 + \sum_{i=1}^{i=16} k_i, \quad (13)$$

где коэффициенты k_i учитывают также и временные изменения состояния селевого русла, в том числе:

k_1 – наличие в русле водотока прорывоопасного заторного водоема (Кавецкий, Смирнов, 1957), принимается $k_1 = 1.0$ при незначительном (менее половины) и $k_1 = 2.0$ при существенном (более половины) его заполнения;

k_2 – наличие «скупенности» (грушевидной, веерообразно-цирковидной (Непорожний, 1947; Смирнов и др., 1968; Смирнов, 1959) устьев притоков 2 порядка (2-3 и более) в русле водотока 1 порядка, принимается $k_2 = 0.8-1.0$;

k_3 – выход в русло водотока устья бокового селевого притока 2 порядка, принимается $k_2 = 0.5$ для узких (менее 10 м) и $k_3 = 0.2$ для широких (более 10 м) водотоков;

k_4 – встречный выход с противоположных береговых склонов в русло водотока в едином створе устьев селевых притоков 2 порядка, принимается $k_4 = 1.0$;

k_5 – наличие береговых оползневых массивов, принимается $k_6 = 0.5$ при возможности полного перекрытия оползнем русла водотока, $k_6 = 0.3$ при частичном и $k_5 = 0.1$ при незначительном перекрытии русла;

k_6 – наличие повышенной сейсмичности рассматриваемого региона (6-8 баллов и более), принимается $k_6 = 0.2-0.4$;

k_7 – наличие береговых лесных массивов (Непорожний, 1947) русло водотока стволов деревьев (длиной до 8-10 м и более), принимается отрицательное значение $k_7 = -(0.1-0.2)$;

k_8 – наличие в русле водотока узких (менее 0.6-0.8 ширины водотока) «скальных ворот» (Непорожний, 1947; Шафиев, 2014), принимается $k_7 = -(0.8-1.0)$;

k_9 – наличие в русле водотока крупных (размерами 2-3 м) «скатывающиеся» валунов, принимается $k_9 = -(0.2-0.3)$;

k_{10} – наличие в русле участков (длиной 100 м) с резким расширением (4-5 раз) ширины водотока (Шафиев, 2014; Смирнов, 1959), принимается $k_{10} = -(0.1-0.2)$;

k_{11} – наличие в русле участков с резким расширением ширины водотока и уменьшением его уклона (менее 0.04-0.06) (Смирнов, 1959), принимается $k_{11} = -(0.2-0.3)$;

k_{12} – наличие в русле водотока извилистости и резких поворотов (до 60° - 90°) (Непорожний, 1947; Шафиев, 2014; Соколовский, 1947; Смирнов, 1959; Кавецкий, Смирнов, 1957), принимается $k_{12} = -(0.1-0.3)$;

k_{13} – наличие в русле водотока уступов и водопадов (высотой до 6-8 м и более), принимается $k_{13} = -(0.4-0.5)$.

Для случаев гляциально-дождевых селей дополнительно учитываются:

k_{14} – наличие прорывоопасных приледниковых озер, принимается $k_{14} = 0.4-0.5$;

k_{15} – наличие внутриледниковых полостей и водоемов, принимается $k_{15} = 0.3-0.4$;

k_{16} – наличие в водосборе концевых выходов («языков») ледника, принимается $k_{16} = 0.1-0.2$.

Следует указать, что при значениях параметра $\xi \leq 1$ в формуле (13) величина его в (12) принимается равной $\xi = 1$, то есть в этом случае селевой поток переходит в паводково-наносоводный режим с расходом, равным $(Q_{pav} + \Delta Q_{rus})$.

Таким образом, формулы (1)-(13) позволяют определять для рассматриваемого региона Центрального Кавказа территориально максимальные ливневые расходы водотоков и прогнозируемые волновые расходы селевых потоков с учетом гидрогеоморфлогических особенностей водосборного бассейна и селевого русла. При этом значения параметров (площади водосбора, длины водотока, отметки и уклоны русла и др.), а также различные значения коэффициентов k_i , позволяющие учитывать изменения геоморфологии во времени, могут быть определены на основе данных натурных маршрутных обследований и дистанционных измерений, архивных и литературных источников и др.

Заключение

В условиях высотной изменчивости климатических и географических характеристик горных и предгорных территорий проблема изучения склонового (дождевого) стока имеет важное значение для определения параметров как паводковых, так и селевых потоков. Горные территории отличаются сложной геоморфологией, малыми площадями водосборов, большими уклонами русел водотоков, наличием наносоводных и селевых потоков с заторно-волновым характером их движения и др. Поэтому оценка паводковой и селевой опасности горных водотоков является важным и актуальным вопросом в обеспечении безопасности жизнедеятельности данных территорий, создающей основу для геофизического моделирования склонового стока.

В работе представлены расчетные результаты в виде аналитических зависимостей для определения максимальных территориальных значений ливневого и селевого расходов для региона Центрального Кавказа (с основными реками Баксан, Чегем, Черек), значения которых дают достаточно близкое соответствие (со среднеарифметической погрешностью $+4.6\%$) с известными базовыми значениями ливневых расходов для 16 водотоков, впервые просчитаны также указанные параметры еще для 16 водотоков данного реги-

она. Кроме этого, результаты предлагаемых формул для р. Ашамба Краснодарского края весьма близко (+5.2%) согласуются с независимыми данными МГУ (Архипкин, 2013). Предложена зависимость для нахождения максимального (волнового) расхода селевого потока с учетом 16 гидрогеоморфологических особенностей водосборного бассейна и селевого русла водотока.

Работа выполнена в рамках тем Государственного задания ИПМА КБНЦ РАН № 122041800015-8 и ИВП РАН № FMWZ-2022-0001.

Список литературы

Анахаев, К.Н. и др. (2016). *Методические рекомендации по обеспечению противоселевой безопасности объектов экономики*, ВГИ, Нальчик, 60 с.

Архипкин, В.С., Добролюбов, С.А., Мухаметов, С.С., Недоспасов, А.А., Самборский, Т.В., Самсонов, Т.Е., Серебренникова, Е.А., Суркова, Г.В. (2013) Экстремальный дождевой паводок в бассейне р. Ашамба и его влияние на рельеф дна и структуру вод моря в районе г. Геленджик, *Вестник Московского университета, Серия 5, География*, № 3, с. 27-34.

Байнатов, Ж.Б. (1992) *Защита от селевых потоков*, М., 79 с.

Виноградов, Ю.Б. (1978) Методы расчета основных характеристик селевых потоков, *Тезисы докладов XV Всесоюз. н.-тех. конф. по противоселевым мероприятиям*, 27-29 сентября 1978 г., г. Ташкент, вып. 2, с. 9-14.

Гегиев, К.А., Амшоков, Б.Х., Чигирова, Л.Б., Анахаев, А.А. (2022) Последствия антропогенного воздействия на бассейн р. Гижигит КБР, *Сб. науч. трудов Всерос. научно-практической конф., "Инновационные решения в строительстве, природообустройстве и механизации с/х производства"*, 2 июня 2022 г., КБГАУ, Нальчик, с. 37-42.

Гегиев, К.А., Чигирова, Л.Б. (2022) Методы определения максимальных значений гидрологических параметров малых горных рек Северного Кавказа (на примере КБР), *Грозненский естественнонаучный бюллетень*, т. 7, № 4 (30), с. 39-46.

Запороженко, Э.В. (2003) Селевые процессы ливневого генезиса на антропогенно-природном фоне, *Сб. научных трудов СКГВХ*, вып. 16, Пятигорск, с. 36-48.

Запороженко, Э.В., Докукин, М.Д. (2019) Тырныаузское хвостохранилище – объект повышенного экологического риска, *Устойчивое развитие горных территорий*, т. II, М., с. 224-237.

Запороженко, Э.В., Каменев, Н.С. (2011) Селевой поток по р. Сылык-Суу 20 июля 2010 г., *Мелиорация и водное хозяйство*, № 5, с. 6-9.

Инструкция по определению расчетных характеристик дождевых селей (1976) ВСН 03-76, ГМИ, Л., 29 с.

Инюхин, В.С., Макитов, В.С., Суслов, В.В. (2013) Сопоставительный

анализ данных радиолокационных и наземных измерений ливневых осадков, *Известия КБНЦ РАН*, № 1(51), с. 47-55.

Иогансон, В.Е. (1959) О гидрологическом изучении селевых бассейнов, *Материалы IV Всесоюзной конф. по селевым потокам*, Алма-Ата, с. 7-20.

Кавецкий, С.П., Смирнов, И.П. (1957) Селевые паводки неливневого происхождения, *Труды КазНИГМИ*, вып. 9, с. 43-52.

Кадастр лавинно-селевой опасности Северного Кавказа (2001) ВГИ, 112 с.

Казаков, Н.А. (2019) К вопросу о расчете селевых расходов и высших селевых горизонтов 1% и 5% обеспеченности, *Гидросфера. Опасные процессы и явления*, т. 1, вып. 2, с. 296-301.

Кидяева, В.М., Петраков, Д.А., Крыленко, И.Н., Алейников, А.А., Штоффел, М., Граф К. (2018) Опыт моделирования Башкаринских озер, *Геориск*, т. 12, № 2, с. 38-46.

Непорожний, П.С. (1947) *Защита гидроэлектростанций от селевых потоков*, М.-Л., ГЭИ, 164 с.

Перов, В.Д. (2012) *Селеведение*, МГУ, М., 271 с.

Сейнова, И.Б., Золотарев, Е.А. (2001) *Ледники и сели Приэльбрусья*, МГУ, М., 203 с.

Смирнов, И.П., Деговец, А.С., Жиркевич, А.Н. (1968) Методика расчета основных характеристик ливневых селей на территории Казахской ССР, *Доклады X Всесоюз. конф. по селевым потокам и горным русловым процессам*, АН Арм ССР, Ереван, с. 135-148.

Смирнов, И.П. (1959) О формировании и динамике селевых потоков, *Труды КазНИГМИ*, вып. 2, с. 52-61.

СНиП 2.01.14-83 (1985) Определение расчетных гидрологических характеристик, М., 36 с.

Соколовский, Д.Л. (1947) Селевые паводки, их гидрологические особенности и методика расчета, *Метеорология и гидрология*, с. 65-75.

СП 33-101-2003 (2004) *Определение основных расчетных гидрологических характеристик*, М., Госстрой России.

Схема инженерной защиты городов и населенных пунктов КБАССР от опасных геологических процессов (1987) Ч. III, СКГВХ, Пятигорск, 86 с.

Флейшман, С.М. (1978) *Сели*, Л., ГМИ, 312 с.

Херхеулидзе, И.И. (1947) *Овражные и селевые выносы*, М., Дориздат, 97 с.

Шафиев, Г.В. (2014) Природные угрозы, связанные с прорывоопасными озерами Горного Бадахшана в бассейне реки Шахдара (Таджикистан), *Геориск*, № 1, с. 40-45.

References

Anakhaev, K.N. et al. (2016) *Metodicheskiye rekomendatsii po obespecheniyu protivoselevoyn bezopasnosti ob'yektov ekonomiki* [Methodological recommendations for ensuring mudflow safety of economic facilities], WGI, Nalchik, Russia, 60 p.

Arkhipkin, V.S., Dobrolyubov, S.A., Mukhametov, S.S., Nedospasov, A.A., Samborsky, T.V., Samsonov, T.E., Serebrennikova, E.A., Surkova, G.V. (2013) Ekstremal'nyy dozhdevoy pavodok v basseynе r. Ashamba i yego vliyaniye na rel'yef dna i strukturu vod morya v rayone g. Gelendzhik [Extreme rain flood in the Ashamba River basin and its effect on the bottom relief and the structure of sea waters in the district of Gelendzhik], *Vestnik Moskovskogo Universiteta, Seriya 5, Geografiya*, no. 3, pp. 27-34.

Bainatow, J.B. (1992) *Zachita ot selevykh potokow* [Protection against mudflows], Moscow, 79 p.

Winogradov, J.B. (1978) Metodi rascheta osnovnich harakteristik selevykh potokow [Methods for calculating the main characteristics of mudflows], *Tezisy dokladov XV Vsesoyuznoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po protivoselevym meropriyatiyam, 27-29 sentyabrya 1978 g.* [Abstracts of the XV All-Union Scientific and Technical Conference on Anti-Mudflow Measures, September 27-29, 1978, Tashkent], vol. 2, USSR, pp. 9-14.

Gegiev, K.A., Amshokov, B.H., Chigirova, L.B., Anakhaev, A.A. (2022) Posledstviya antropogennogo vozdeystviya na basseyn r. Gizhgит KBR [Consequences of anthropogenic impact on the river basin Gizhgит KBR], *Sb. nauch. trudov Vseros. nauchno-prakticheskoy konf., "Innovatsionnyye resheniya v stroitel'stve, prirodoobustroytstve i mekhanizatsii s/kh proizvodstva", 2 iyunya 2022 g.* [Sat. scientific works of Vseros. scientific and practical conference, "Innovative solutions in construction, environmental management and mechanization of agricultural production", June 2, 2022], KBGAU, Nalchik, Russia, pp. 37-42.

Gegiev, K.A., Chigirova, L.B. (2022) Metody opredeleniya maksimal'nykh znacheniy gidrologicheskikh parametrov malyykh gornyykh rek Severnogo Kavkaza (na primere KBR) [Methods for determining the maximum values of hydrological parameters of small mountain rivers of the North Caucasus (using the example of the Kabardino-Balkarian Republic)], *Groznenskiy yestestvennonauchnyy byulleten'*, vol. 7, no. 4 (30), pp. 39-46.

Zaporogchenko, E.W. (2003) Selevyeye protsessy livnevoyn genezisa na antropogennno-prirodnom fone [Mudflow processes of storm genesis on an anthropogenic-natural background], *Sb. Nauchnich trudov SKGVH* [Sat. scientific works of SKGVH], vol. 16, Pyatigorsk, Russia, pp. 36-48.

Zaporogchenko, E.W., Dokukin, M.D. (2019) Tyrnyauzskoye khvostokhranilishche – ob'yekt povyshennogo ekologicheskogo riska, Ustoychivoye razvitiye gornyykh territoriy [Tyrnauz tailings dump is an object of

increased environmental risk], *Ustoichiwoe raswitie gornich territorij* [Sustainable development of mountain areas], vol. II, Moscow, Russia, pp. 224-237.

Zaporogchenko, E.W., Kamenev, N.S. (2011) Selevoy potok po r. Sylyk-Suu 20 iyulya 2010 g. [Debris flow along the river. Sylyk-Suu July 20, 2010], *Melioraziy I wodnoe hozjstwo*, no. 5, pp. 6-9.

Instruktsiya po opredeleniyu raschetnykh kharakteristik dozhdevykh seley [Instructions for determining the design characteristics of rain mudflows] (1976) VSN 03-76, GMI, Leningrad, Russia, 29 p.

Inyukhin, V.S., Makitov, V.S., Suslov, V.V. (2013) Sopostavitel'nyy analiz dannykh radiolokatsionnykh i nazemnykh izmereniy livnevnykh osadkov [Comparative analysis of data from radar and ground-based measurements of rainfall], *Izvestia KBSC RAS*, no. 1(51), pp. 47-55.

Ioganson, V.Ye. (1959) O gidrologicheskom izuchenii selevykh basseynov [On the hydrological study of mudflow basins], *Materialy IV Vsesyuznoykonf. po selevym potokam* [Materials of the IV All-Union Conference along mudflows], Alma-Ata, USSR, pp. 7-20.

Kavetsky, S.P., Smirnov, I.P. (1957) Selevyye pavodki nelivnogo proiskhozhdeniya [Mudflows of non-storm origin], *Trudy KazNIGMI* [Proceedings of KazNIGMI], vol. 9, pp. 43-52.

Kadastr lavinno-selevoy opasnosti Severnogo Kavkaza [Inventory of avalanche and mudflow hazard in the North Caucasus] (2001) VGI, Russia, 112 p.

Kazakov, N.A. (2019) K voprosu o raschete selevykh raskhodov i vysshikh selevykh gorizontov 1% i 5% obespechennosti [On the issue of calculating mudflow flows and higher mudflow horizons of 1% and 5% probability], *Gidrosfera. Opasnyye protsessy i yavleniya*, vol. 1, no. 2, pp. 296-301.

Kidyayeva, V.M., Petrakov, D.A., Krylenko, I.N., Aleinikov, A.A., Stoffel, M., Graf K. (2018) Opyt modelirovaniya Bashkarinskikh ozer [Experience in modeling the Bashkarinsky lakes], *Georisk*, vol. 12, no. 2, pp. 38-46.

Neporozhny, P.S. (1947) *Zashchita gidroelektrostantsiy ot selevykh potokov* [Protection of hydroelectric power plants from mudflows], SEI, Moscow-Leningrad, USSR, 64 p.

Perov, V.D. (2012) *Selevedeniye* [Agriculture studies], Moscow State University, Moscow, Russia, 271 p.

Seynova, I.B., Zolotarev, E.A. (2001) *Ledniki i seli Priel'brus'ya* [Glaciers and mudflows of the Elbrus region], Moscow State University, Moscow, Russia, 203 p.

Smirnov, I.P., Degovets, A.S., Zhirkevich, A.N. (1968) Metodika rascheta osnovnykh kharakteristik livnevnykh seley na territorii Kazakhskoy SSR [Methodology for calculating the main characteristics of storm mudflows on the territory of the Kazakh SSR], *Doklady X Vsesoyuz. konf. po selevym potokam i gornym ruslovym protsessam, AN Arm SSR* [Reports of the X All-Union. conf. on

mudflows and mountain channel processes], Academy of Sciences of the Armenian SSR, Yerevan, USSR, pp. 135-148.

Smirnov, I.P. (1959) O formirovani i dinamike selevykh potokov [On the formation and dynamics of mudflows], *Trudy KazNIGMI* [Proceedings of KazNIGMI], vol. 2, pp. 52-61.

SNiP 2.01.14-83 (1985) *Opredeleniye raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Determination of calculated hydrological characteristics], Moscow, Russia, 36 p.

Sokolovsky, D.L. (1947) Selevyye pavodki, ikh gidrologicheskiye osobennosti i metodika rascheta [Mudflows, their hydrological features and calculation methods], *Meteorologiya i gidrologiya*, pp. 65-75.

SP 33-101-2003 (2004) *Opredeleniye osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Determination of the main calculated hydrological characteristics], Gosstroy of Russia, Moscow, Russia.

Skhema inzhenernoy zashchity gorodov i naselennykh punktov KBASSR ot opasnykh geologicheskikh protsessov [Scheme of engineering protection of cities and settlements of the KBASSR from hazardous geological processes] (1987) Part III, SKGVH, Pyatigorsk, Russia, 86 p.

Fleishman, S.M. (1978) *Seli* [Seli], Leningrad, Russia, 312 p.

Kherkheulidze, I.I. (1947) *Ovrazhnyye i selevyye vynosy* [Gully and mudflows], Dorizdat, Moscow, Russia, 97 p.

Shafiev, G.V. (2014) Prirodnyye ugrozy, svyazannyye s proryvoopasnymi ozerami Gornogo Badakhshana v basseynе reki Shakh dara (Tadzhikistan) [Natural threats associated with outburst-hazardous lakes of Gorno-Badakhshan in the Shahdara river basin (Tajikistan)], *Georisk*, no. 1, pp. 40-45.

Поступила в редакцию: 15.09.2023 г.

Доработана после рецензирования: 27.10.2023 г.

Принята к публикации: 06.11.2023 г.

Для цитирования / Forcitation:

Анахаев, К.Н., Беликов, В.В. (2023) О моделировании склонового стока на горных и предгорных водосборах, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 4, с. 386-402, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-386-402.

Anakhaev, K.N., Belikov, V.V. (2023) About modeling of slope runoff on mountain and foothill catchments, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 4, pp. 386-402, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-386-402.

Оценка вклада технологического фактора в повышение энергоэффективности и динамику выбросов парниковых газов в секторе «энергетика» России

И.А. Башмаков^{1)}, А.Д. Мышак¹⁾, В.А. Башмаков¹⁾, В.И. Башмаков¹⁾,
К.Б. Борисов¹⁾, М.Г. Дзедзичек¹⁾, А.А. Лунин¹⁾, О.В. Лебедев¹⁾, Т.Б. Шишкина^{1,2)}*

¹⁾Центр энергоэффективности – XXI век,
РФ, 117418, г. Москва, ул. Новочеремушкинская, 61

²⁾ИОН РАНХиГС,
119571, Москва, пр. Вернадского, 82, стр. 1

*Адрес для переписки: *bashmako@co.ru*

Реферат. В данной статье представлены краткое описание и результаты использования российской системы учета повышения энергоэффективности и выбросов парниковых газов в секторе «энергетика» (МТФК-16-80-ПГ) за 2015-2022 гг. Эта разработанная и эксплуатируемая авторами на протяжении нескольких лет система предназначена для мониторинга прогресса в области энергоэффективности в 16 секторах и 80 видах экономической деятельности с оценкой вклада 7 факторов. Она также используется для мониторинга прогресса в сфере контроля за выбросами парниковых газов в секторе «энергетика» с оценкой вклада 9 факторов. Показано, что в 2022 г. технологический фактор не тормозил, а увеличивал объемы потребления энергии, а в 2015-2022 гг. его тормозящий эффект был ограниченным. Отсутствие прогресса в снижении энергоемкости ВВП наряду с ростом углеродоемкости используемой энергии привело к тому, что в России на смену «суперкаплингу» 2020-2021 гг. (практически полному совпадению динамики выбросов парниковых газов и ВВП) в 2022 г. пришел «обратный декаплинг» (рост выбросов парниковых газов при снижении ВВП).

Ключевые слова. Энергетический баланс, система учета энергоэффективности, показатели энергоэффективности, выбросы парниковых газов, факторный анализ, среднелогарифмический индекс Дивизиа.

Assessing the contribution from technological factor to energy efficiency improvement and to the evolution of energy related emissions of greenhouse gases in Russia

I.A. Bashmakov^{1)}, A.D. Myshak¹⁾, V.A. Bashmakov¹⁾, V.I. Bashmakov¹⁾,
K.B. Borisov¹⁾, M.G. Dzedzichuk¹⁾, A.A. Lunin¹⁾, O.V. Lebedev¹⁾, Shishkina T.B.^{1,2)}*

¹⁾Center for Energy Efficiency – XXI,
61, Novocheremushkinskaya st., Moscow, 117418, Russian Federation

Abstract. This article presents a brief description and the results of using the Russian energy efficiency improvement and energy related greenhouse gas emissions accounting system (MTFC-16-80-GHG) for 2015-2022. This system, as developed and operated by the authors for several years, is designed to monitor the energy efficiency progress in 16 sectors and 80 economic activities and to estimate the contributions from 7 factors. It is also used to monitor the progress to increase, rather than slowdown, energy consumption, and in 2015-2022 its inhibitory effect was limited. Lack of progress in bringing down GDP energy intensity, coupled with increased carbon intensity of energy, resulted in the fact that the supercoupling observed in Russia in 2020-2021 (i. e. nearly complete coincidence of the evolutions of greenhouse gas emissions and GDP) was replaced with the “reverse decoupling” in 2022 (i. e. greenhouse gas emission growth along with GDP reduction).

Keywords. Energy balance; energy efficiency accounting system; energy efficiency indicators; greenhouse gas emissions; factor analysis; log-mean Divisia index.

Введение

Для решения управленческих задач в сфере повышения энергоэффективности и декарбонизации важно не только знать, как изменилась энергоёмкость ВВП или выбросы парниковых газов (ПГ), но и выявить причины этих изменений. Такой подход позволяет оценивать эффекты от принятых мер госполитики на фоне многих прочих факторов, которые влияют на эти процессы, и правильно оценить успехи в низкоуглеродной технологической гонке (Башмаков и др., 2023а). Поэтому в последние годы во многих странах и международных организациях создано большое число таких систем мониторинга с выделением влияния экономической активности, структурных сдвигов в экономике, климата, изменения удельных расходов энергии, доли ископаемых топлив в потреблении энергии и удельных выбросов парниковых газов (ПГ) на единицу используемого топлива. Степень детализации анализа и число выделяемых факторов заметно различается от системы к системе. В 2012 году в России была создана первая такая система для анализа факторов динамики энергоёмкости ВВП и выбросов ПГ (Башмаков, Мышак, 2012; Bashmakov, Myshak, 2012; Bashmakov, Myshak, 2014). Затем в 2019 году она была заметно развита и оформлена приказом Минэкономразвития России от 1 августа 2019 г. № 471 (МЭР РФ, 2019) сначала только для формирования единого топливно-энергетического баланса (ЕТЭБ) и выявления вклада технологического фактора в динамику энергоёмкости ВВП. В 2022 году функции этой системы, по требованию Минэкономразвития РФ, были расширены, чтобы оценивать влияние факторов и динамику выбросов ПГ в секторе «энергетика» (Bashmakov et al., 2023). Такая работа проводится ежегодно, а ее результаты

отражаются в Государственном докладе о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности (Госдоклад, 2021).

В первом разделе статьи дан краткий анализ литературы по применению факторного анализа динамики энергопотребления и выбросов ПГ. Во втором разделе кратко описана действующая версия модели МТФК-16-80-ПГ. В третьем разделе показаны результаты ее применения для анализа динамики потребления энергии и энергоемкости ВВП России в 2015-2022 гг. В четвертом разделе показаны результаты ее применения для анализа динамики выбросов парниковых газов в секторе «энергетика». В пятом разделе кратко обсуждается влияние последних трендов выбросов ПГ на решение задачи достижения углеродной нейтральности в России к 2060 г.

Опыт факторного анализа динамики энергоемкости и выбросов ПГ

В мире накоплен довольно обширный опыт факторного анализа динамики энергоемкости и выбросов ПГ. Традиционной схемой декомпозиции выбросов ПГ является тождество Кайи (Kaia, 1990; Lamb et al., 2021; Dhakal et al., 2022), согласно которому выбросы ПГ равны произведению численности населения, ВВП на душу населения, энергоемкости ВВП и углеродоемкости энергии. МЭА создало базу данных, в которой по большинству стран мира отражена динамика всех составляющих этого тождества на горизонте 2000-2021 годов (IEA, 2023). Однако в этом тождестве фактор энергоэффективности отражает и структурные сдвиги, и изменение климата, а собственно технологический фактор в нем не выделяется. Более того, такой подход имеет ограниченную ценность при использовании для декомпозиции в отдельных секторах, где требуются более специализированные индикаторы. В них могут применяться модифицированные тождества, как, например, предложенное И. Башмаковым для промышленности (Bashmakov, 2021; Bashmakov et al., 2022a). Часто традиционный анализ на базе тождества Кайи показывает траектории движения основных драйверов без количественной оценки вклада каждого из них в динамику потребления энергии, энергоемкость или выбросы ПГ.

Для решения многих управленческих задач требуется переход от агрегированного анализа на уровне сектора в целом к анализу по отдельным входящим в него видам деятельности. Поэтому практически одновременно и параллельно стало развиваться второе направление детального анализа с использованием теории числовых индексов и особенно с применением метода LMDI – среднелогарифмического индекса Дивизиа (Ang, Choi, 1997; Ang, Choi, 2010; Ang, Choi, 2012; Bashmakov, Myshak, 2012; Bin, Ang, 2012; Cahill, Gallachóir, 2011; Koilakou et al., 2021; Lee, Kim, 2021). Обзор этих работ дан в Goh, Ang (2019). Более того, появились интерактивные инструменты для проведения такого анализа (Enerdata, 2022). При использовании такого подхода появляется новый драйвер – структурные сдвиги в экономике, которые очень заметно влияют как на динамику энергопотребления, так и на динамику выбросов ПГ. Инструменты управления структурными эффектами

другие – не столько технологическая, сколько структурная политика. Значительная часть изменения энергоемкости или выбросов ПГ порождается именно такими структурными сдвигами (Enerdata, 2022). Если эффект технологического фактора в основном является результатом повышения качества энергии, то есть роста доли более качественных и, следовательно, более дорогих энергоресурсов, то структурные сдвиги в большой степени порождаются ценовыми шоками, приводящими к избыточному удорожанию энергии (Bashmakov, 2023).

Применение подхода прямого агрегирования в LMDI ко всей экономике затруднительно, поскольку показатели активности во всех секторах имеют различную физическую природу, измеряются в разных единицах и поэтому не суммируются с общим индексом активности, для которого часто используется ВВП в качестве прокси. В российской системе показатели масштабов деятельности в различных секторах представлены в основном в физических единицах (m^2 , тонны, т-км, кВт-ч и т.д.), которые не могут быть агрегированы. Было продемонстрировано (Cahill, Gallachóir, 2011), что физические и денежные показатели выпуска могут использоваться совместно в декомпозиционном анализе, чтобы отразить взаимодействие показателей энергоэффективности, основанных как на физических единицах, так и на единицах добавленной стоимости. Lee, Kim (2021) применили декомпозиционный анализ к производственному сектору Южной Кореи и пришли к выводу, что вклад технологического фактора в эволюцию энергоэффективности «кажется переоцененным, если анализировать его без показателей физического объема производства». Они также пришли к выводу, что эффекты интенсивности намного ниже, когда используется первичное, а не конечное потребление энергии. Использование метода LMDI при подробной структуризации информации и выделении основных драйверов позволяет максимально приблизиться к оценке вклада именно технологического фактора в динамику энергопотребления и выбросов ПГ.

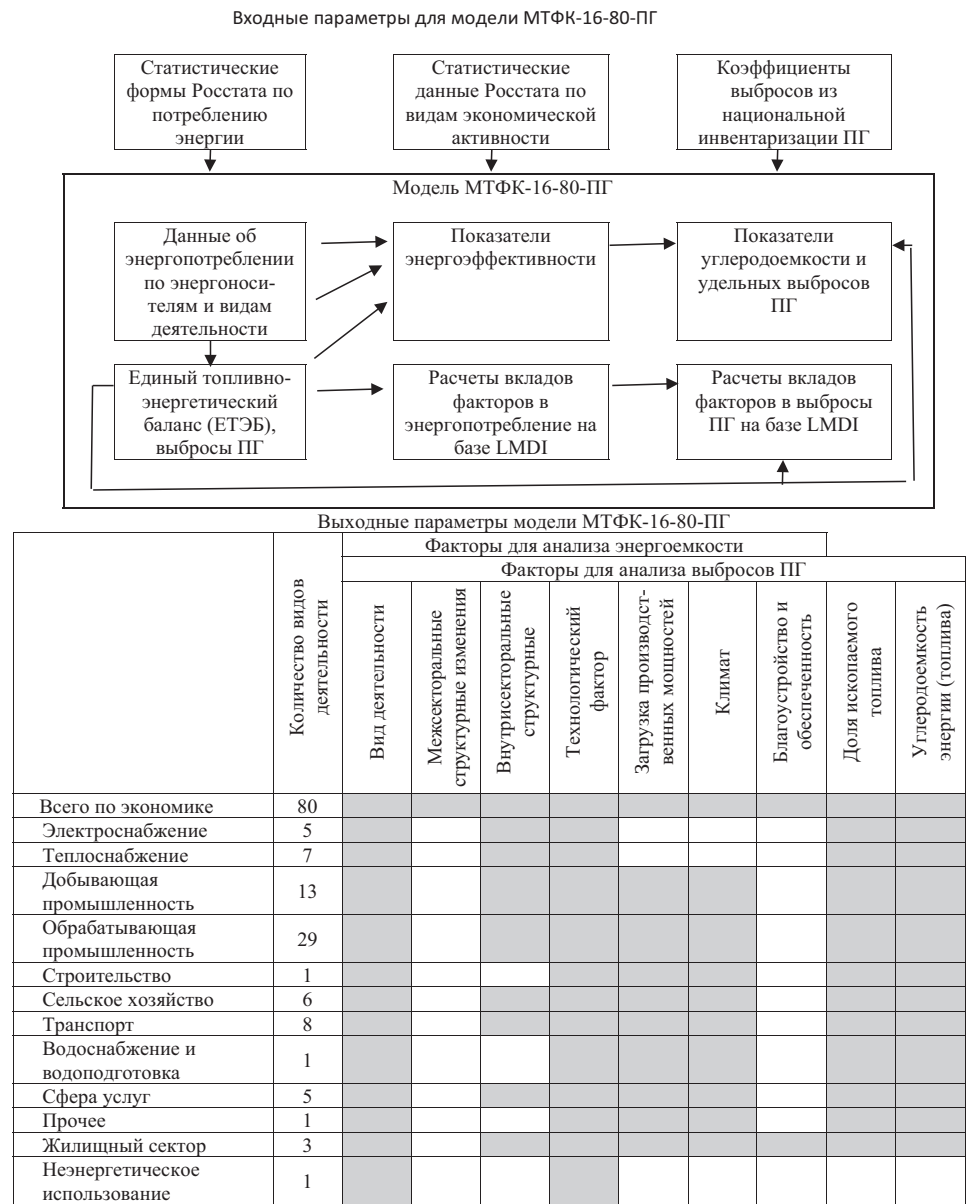
Системы факторного анализа динамики выбросов ПГ имеют один недостаток: они предполагают, что все используемые факторы независимы. Koilakou et al., (2021) подчеркнули, что дальнейшие исследования должны включать проверку причинно-следственных связей между факторами. Например, переход с угля на природный газ приводит к более низкому коэффициенту удельных выбросов ПГ и потенциально более высокой эффективности генерации, а проникновение солнечной и ветровой энергии снижает не только выбросы ПГ, но и термодинамические потери, поскольку они учитываются в первичной энергии как имеющие стопроцентную эффективность.

Модель МТФК-16-80-ПГ

Архитектура российской системы факторного анализа динамики энергоемкости и выбросов ПГ показана на рис. 1. Она формализована и запрограммирована как модель МТФК-16-80-ПГ, базирующаяся на LMDI.

Перечень видов экономической деятельности включает 16 секторов и 80 видов экономической деятельности (подсекторов). Некоторые отрасли, например, строительство, включают только один вид экономической деятельности. Только 12 видов деятельности (с выпуском большой номенклатуры продукции, например, производство электронного оборудования, производство продуктов питания, напитков и табака) представлены физическими индексами производства (2016 = 100). Остальные 68 видов деятельности представлены натуральными физическими показателями. В дополнение к секторам конечного использования энергии в МТФК-16-80-ПГ также рассматриваются все процессы преобразования энергии, включая производство электроэнергии и тепла, переработку топлива, собственное использование в энергетическом секторе, передачу и распределение топлива и энергии. Потребление энергии в этих секторах включает термодинамические потери, технологическое использование, физические потери при переработке топлива, потери при передаче и распределении электроэнергии и тепла. Когда все эти составляющие добавляются к конечному потреблению энергии, оценивается восходящее (*bottom-up*) использование первичной энергии. При использовании подхода сверху-вниз (*top-down*) суммарное потребление первичной энергии оценивается как сумма: потребления топлива (по видам), определяемого как разница объемов производства; нетто-экспорта топлива и изменения запасов топлива у производителей и потребителей; потребления первичной электрической и тепловой энергии от нетопливных источников (АЭС, ГЭС, ГеоТЭС и др. ВИЭ); сальдо баланса экспорта и импорта электроэнергии. При использовании подхода *bottom-up* суммарное потребление первичной энергии оценивается как сумма потребления по всем видам экономической деятельности. Разница в результатах использования этих двух подходов формирует статистическую невязку.

В МТФК-16-80-ПГ оценивается воздействие семи факторов на динамику суммарного энергопотребления и девяти факторов на динамику выбросов ПГ. Экономическая активность показывает, что изменение объемов производства промышленной продукции, услуг, числа автомобилей, площади зданий или других индикаторов экономической активности при прочих равных условиях приводит к изменению потребления энергии. Технологический фактор отражает изменение потребления энергии только за счет внедрения более энергоэффективного оборудования, технологических процессов или утепления зданий. Структурные сдвиги на уровне 16 секторов экономики показывают, что изменение доли сектора с более высокой энергоемкостью влечет за собой соответствующее изменение энергоемкости по экономике в целом. Структурные сдвиги на уровне подсекторов-видов экономической активности (например, различия в динамике выпуска отдельных видов промышленной продукции) дают аналогичный структурный эффект в рамках каждого из 16 секторов, в состав которых входят 80 анализируемых видов экономической деятельности.



* Еще 4 сектора включают собственные нужды на выработку электрической и тепловой энергии и потери в сетях электрической и тепловой энергии. Такое выделение необходимо для оценки косвенных выбросов ПГ

Рисунок 1. Архитектура российской системы МТФК-16-80-ПГ для оценки вклада отдельных факторов в динамику энергопотребления и энергоемкости ВВП
(Bashmakov et al., 2023a)

Figure 1. Architecture of the Russian MTFC-16-80-GHG system to assess the contributions from individual factors to the dynamics of energy consumption and GDP energy intensity
(Bashmakov et al., 2023a)

Климатический фактор отражен с помощью показателя ГСОП. Он влияет на потребность в тепловой энергии и топливе на цели отопления. 2022 год был более теплым, чем 2021 год, поэтому при прочих равных условиях снизился удельный расход тепловой энергии и топлива на цели отопления, а также суммарный показатель удельного расхода энергии. Но это не означает повышения эффективности ее использования. Для более полного отражения климатического фактора необходимо также оценивать градусо-сутки охлаждательного периода, однако российская статистика пока не позволяет выявить потребление энергии на цели кондиционирования. Загрузка производственных мощностей также влияет на изменение удельных расходов энергии. При снижении загрузки мощности предприятия условно-постоянные расходы энергии на нужды освещения и отопления цехов сохраняются на прежнем уровне. При определении удельного потребления энергии они будут соотнесены с меньшим объемом выпуска продукции, а значит, удельное потребление энергии вырастет при сохранении технологических параметров энергоэффективности всего используемого оборудования на прежнем уровне. Благоустройство и обеспеченность – этот фактор показывает, что рост потребления энергии за счет повышения благоустройства жилья (например, повышение обеспеченности централизованным теплоснабжением) или повышение обеспеченности населения бытовыми приборами не следует рассматривать как рост энергоемкости. Углеродоемкость энергии (углеродоемкость используемых топлив) – это отношение выбросов ПГ к объему потребления энергии (топлива). Оно меняется по мере изменения структуры потребляемых энергоносителей, которые имеют разную углеродоемкость. Доля ископаемого топлива в потреблении энергии меняется в зависимости от процессов электрификации и изменения доли тепловой энергии в сферах конечного потребления энергии.

Важным отличием *Методики* от расчета страновых показателей энергоемкости ВВП, используемой МЭА и другими аналитическими структурами, является выделение показателя использования топлива на неэнергетические нужды – сырье для производства химической и другой продукции (например, электроуглей). Такое использование топлива необходимо вычитать из его суммарного потребления, поскольку оно не сжигается и не используется на цели энергоснабжения. Энергоемкость ВВП определяется как традиционным методом (делением всего потребления первичной энергии на ВВП), так и как разность потребления первичной энергии и использования топлива на неэнергетические нужды, деленная на ВВП.

Математический аппарат расчетов по методу LMDI хорошо известен (см. (Ang, Choi, 1997; Ang, Choi, 2010; Ang, Choi, 2012; Bin, Ang, 2012; Cahill, Gallachóir, 2011; Koilakou et al., 2021; Lee, Kim, 2021), а особенности его применения в модели МТФК-16-80-ПГ описаны в (Башмаков, Мышак, 2012; Bashmakov, Myshak, 2012; Bashmakov, Myshak, 2014; МЭР РФ, 2019; Bashmakov et al., 2023a).

Информационной базой МТФК-16-80-ПГ являются данные форм статистической отчетности Росстата: «1-Натура»; «1-ТЕК»; «1-ТЕП»; «1-водопро-

вод»; «1-канализация»; «4-ТЭР»; «6-ТП» (с 2021 года аналог этой формы формируется не Росстатом, а Минэнерго); «22-ЖКХ»; «Электробаланс»; баланс продуктов переработки на обогатительных фабриках и установках Минэнерго; данные Росинформуголь о потерях угля и др. Данные по ГСОП за 2022 год получены из архивов сайта www.gr5.ru. Используются также данные Федеральной таможенной службы по экспорту и импорту отдельных видов топлива и энергии. Правда, по нефти и газу за 2022 год они не публикуются, поэтому данные получены из других источников, что снижает надежность оценки потребления первичной энергии. На основе всех этих данных формируется динамический единый топливно-энергетический баланс (ЕТЭБ) за 2015-2022 гг. с выделением 23 энергоносителей, агрегированных в семь групп: уголь, сырая нефть, продукты нефтепереработки, природный газ, другие виды твердого топлива, электроэнергия и тепло, которые затем суммируются для получения итогов. В ЕТЭБ добавляются еще два первичных энергоресурса – атомная энергия и возобновляемая (включая гидроэнергию) энергия. Вся эта информация структурируется по секторам и по 80 видам деятельности, что позволяет сформировать детальный ЕТЭБ. Информация в каждой ячейке ЕТЭБ на любом этапе обработки данных полностью прозрачна, и «родословная» каждой цифры может быть прослежена вплоть до исходных статистических данных, предоставленных Росстатом или другими источниками.

Важным преимуществом МТФК-16-80-ПП по сравнению с зарубежными аналогами являются: оперативность (появление результатов через 8-9 месяцев после окончания календарного года); высокий уровень детализации (рассмотрение 16 секторов, 80 видов экономической активности и 9 факторов); полное соответствие экономической активности и соответствующего ей уровня потребления энергии за счет формирования ЕТЭБ в рамках самой модели МТФК-16-80-ПП, возможность получать результаты по четырем метрикам энергоемкости ВВП и по шести метрикам оценки выбросов ПГ, включая утечки и расчеты как по прямым, так и по сумме прямых и косвенных выбросов ПГ.

Анализ динамики энергоемкости ВВП

Росстат сообщил о снижении российского ВВП на 2.07% в 2022 году. Это значительно меньше прогнозов, сделанных сразу после начала российской операции в Украине, которые варьировали в диапазоне от -5% до -15%. В 2022 году глубина и степень жесткости санкций была меньше ожидавшейся, а экономика России продемонстрировала больший, чем ожидалось, уровень устойчивости к санкциям за счет резкого наращивания государственных расходов. В итоге произошло менее резкое снижение экспорта, налаживание параллельного импорта при умеренном импортозамещении на фоне резкого наращивания спроса за счет милитаризации экономики при больших нефтегазовых доходах (Башмаков, 2023). Потребление первичной энергии в 2022 году составило 1027.9 млн т, что на 4% меньше, чем в 2021 году. Основной при-

чиной его снижения на 43.2 млн тут стало снижение потребления на неэнергетические нужды на 26.8 млн тут. Зарубежные статистические источники также показывают снижение потребления первичной энергии в России в 2022 году. Однако они существенно расходятся в оценке глубины этого снижения: от -0.4% до -8.2% (Enerdata, 2023; Energy Institute, 2023).

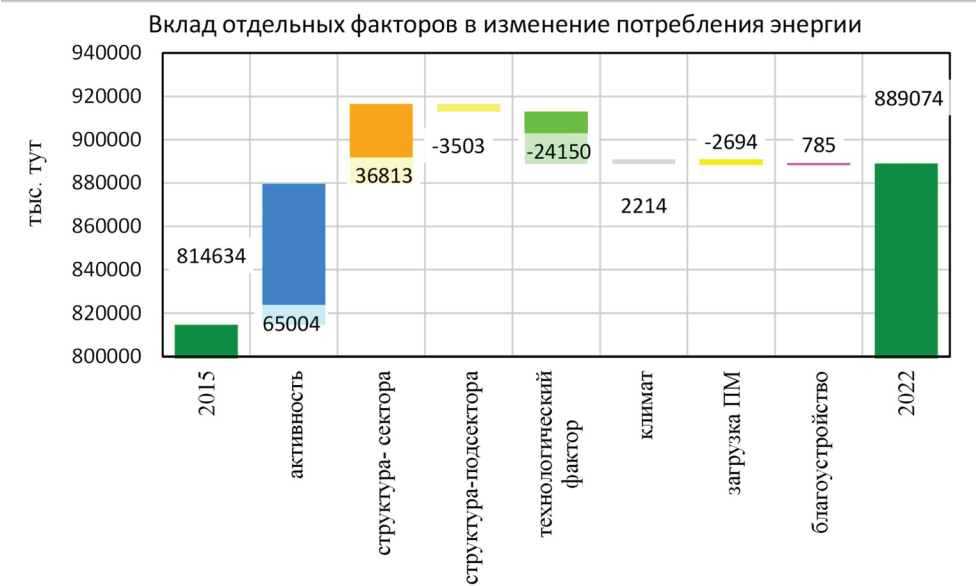
Вклад фактора экономической активности в динамику потребления энергии в 2022 году оказался отрицательным (-19 млн тут, рис. 2). В 2022 году в экономике произошли заметные структурные сдвиги. Экономическая активность менялась разнонаправленно. Сократились объемы промышленного производства, индекс производства продукции обрабатывающей промышленности, выпуск черных металлов, удобрений, каучука, аммиака, особенно резко упали производство транспортных средств, работа трубопроводного и воздушного транспорта. Сохранились практически на уровне 2021 года производство бумаги и картона, пластмасс, парк автомобилей и работа железнодорожного транспорта. Выросли производство цемента, производство в строительстве и сельском хозяйстве, увеличились площади жилых зданий и зданий сферы услуг. Равнодействующая структурных сдвигов между секторами стимулировала рост потребления энергии, а внутрисекторные сдвиги в 2022 году его тормозили (рис. 2).

В 2022 году за счет технологического фактора прирост потребления энергии составил почти 10 млн тут. Диапазон неопределенности оценки вклада технологического фактора составил от -7 млн тут до +10 млн тут. Он в основном определяется точностью оценок потребления жидкого топлива на автомобильном транспорте и потребления топлива в торговле. При альтернативной оценке потребления топлива на автомобильном транспорте на основе динамики парка автомобилей получается, что технологический фактор тормозил рост суммарного потребления энергии. Но даже при такой коррекции оценки вклада технологического фактора на резкие изменения в статистических данных его вклад в снижение потребления энергии не превышает 7 млн тут в 2022 году.

В 2015-2022 годах все модификации показателя энергоемкости ВВП России колебались вокруг относительно стабильных уровней, не показывая выраженной тенденции ни к росту, ни к снижению (рис. 3). Это результат резкого ослабления мер господдержки деятельности по повышению энергоэффективности после 2014 года. Вывод о сохранении энергоемкости ВВП примерно на одном уровне после 2015 года согласуется с оценками ее динамики в зарубежных источниках при некотором разбросе самих оценок (Enerdata, 2023; Energy Institute, 2023).

Энергоемкость ВВП за вычетом неэнергетических нужд является основным показателем энергоэффективности в системе учета повышения энергоэффективности России. В 2022 году она составила 9.66 тут/млн руб. в ценах 2016 года, что только на 0.06% выше уровня 2021 года, но на 13% ниже уровня традиционно вычисляемой энергоемкости ВВП. Небольшое снижение энергоемкости ВВП в 2022 году произошло за счет снижения потребления топлива на неэнергетические нужды в связи со сжатием внешних рынков

сбыта продукции нефте- и газохимии из-за введенных санкций. Среднегодовые темпы снижения энергоемкости ВВП (без неэнергетических нужд) в 2015-2022 годах составили 0.53% в год. В 2015-2022 годах за счет технологического фактора снижение энергоемкости ВВП составило только 2.3%. При альтернативном методе расчета потребления топлива на автомобильном транспорте эта оценка повышается до 2.7%.



Период	Всего	Экономическая активность	Структура на уровне секторов	Структура на уровне подсекторов	Технологический фактор	Климат (ГСОП)	Загрузка производственных мощностей	Благоустройство и обеспеченность
2016/2015	40 182	1 615	15 392	-1 199	16 944	7 813	-505	122
2017/2016	-8 880	15 384	6 260	1 678	-27 015	-3 483	-1 249	-454
2018/2017	13 814	23 606	-1 135	-3 485	-8 258	3 979	-764	-130
2019/2018	-10 659	18 574	-3 389	826	-13 684	-12 723	-482	217
2020/2019	-19 137	-22 567	1 427	8 594	-5 647	-1 623	521	157
2021/2020	61 919	46 999	-350	-1 909	4 024	14 742	-1 258	-329
2022/2021	-2 769	-18 608	18 609	-8 008	9 485	-6 493	1 043	1 203
2022/2015	74 469	65 004	36 813	-3 503	-24 150	2 214	-2 694	785

Рисунок 2. Вклад отдельных факторов в изменение потребления энергии в 2015-2022 годах (по сумме секторов без неэнергетических нужд) (расчеты авторов по модели МТФК-16-80-ПГ на базе данных Росстата)

Figure 2. Contributions from individual sectors to the evolution of energy consumption in 2015-2022 (sector totals, non-energy use excluded) (estimated by authors using the MTFK-16-80-GHG based on Rosstat's data)

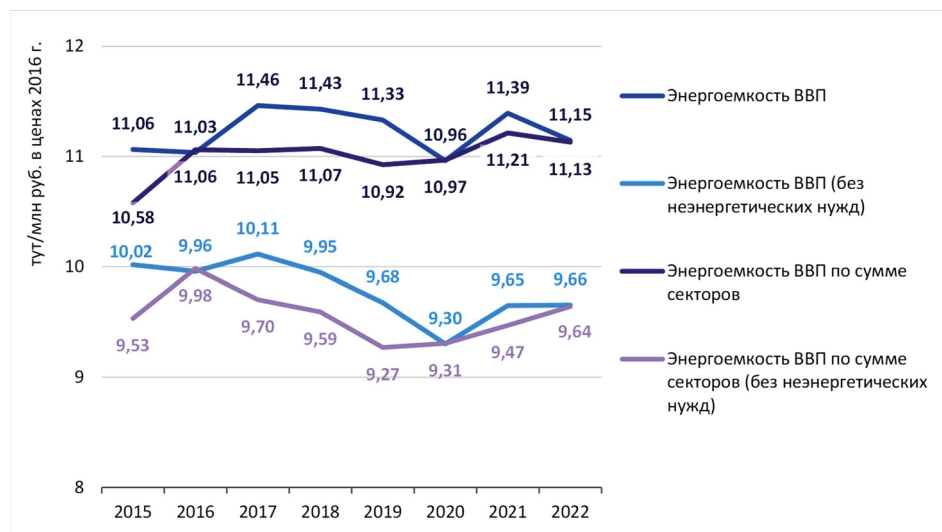


Рисунок 3. Динамика энергоемкости ВВП Российской Федерации в 2015-2022 годах (расчеты ЦЭНЭФ-XXI по Методике МЭР на базе данных Росстата)

Figure 3. Evolution of GDP energy intensity in the Russian Federation in 2015-2022 (estimated by CENEF-XXI based on Rosstat's data using the MTFC-16-80-GHG)

В 2022 году электроемкость ВВП повысилась на значимые 3.8%. Только один из трех индикаторов энергоэффективности в электроэнергетике (расходы на собственные нужды электростанций) улучшился в 2022 году. Удельные расходы топлива (УРУТ) на выработку электроэнергии выросли, а доля потерь в электрических сетях осталась неизменной. В 2022 году технологический фактор способствовал не снижению, а росту потребления энергии в электроэнергетике почти на 3 млн тут. Это тормозило снижение энергоемкости ВВП. Существуют большие риски роста УРУТ в России в ближайшие годы.

В основном за счет более теплой погоды в 2022 г. потребности в первичной энергии для производства тепловой энергии снизились на 6.5 млн тут. В 2022 году два из трех основных индикаторов энергоэффективности в теплоэнергетике (удельные расходы топлива на котельных и на ТЭС) улучшились, а доля потерь в тепловых сетях немного выросла. Технологический фактор в секторе теплоснабжения способствовал снижению потребления энергии в теплоэнергетике в 2022 году на скромные 0.2 млн тут.

В 2022 году удельные расходы энергии на производство основных видов добываемого и перерабатываемого сырья и топлива изменялись разнонаправленно. Проблемы с эксплуатацией импортного оборудования привели к росту удельных расходов энергии или к более медленному их снижению. Равнодействующая разнонаправленной динамики удельных расходов энергии в добывающей промышленности определила, что технологический фактор в 2022 году позволил снизить потребление энергии на 2.9 млн тут.

За счет падения экономической активности в обрабатывающей промышленности в 2022 году потребление энергии снизилось на 2.2 млн тут. Энерго-

емкость обрабатывающей промышленности в целом в 2022 году осталась неизменной, а при коррекции на климат и загрузку производственных мощностей – выросла на 0.3%. Второй раз с 2015 года баланс повышения и снижения удельных расходов энергии на производство отдельных видов продукции обрабатывающей промышленности привел к тому, что за счет технологического фактора потребление энергии в обрабатывающей промышленности выросло на 2.2 млн тут. В 2022 году удельные расходы энергии сократились в производстве чугуна, циклических углеводородов, древесноволокнистых плит, каучуков синтетических, но выросли при производстве стали, аммиака синтетического, удобрений азотных, целлюлозы, клинкеров цементных и кирпича строительного. Санкции тормозят процессы модернизации обрабатывающей промышленности, что препятствует снижению удельных расходов энергии. За счет роста экономической активности в сельском хозяйстве в 2022 году потребление энергии выросло на 1.3 млн тут. Технологический фактор в 2022 году способствовал перерасходу энергии в сельском хозяйстве на 0.2 млн тут.

В 2022 году объем транспортной работы упал на 1.2%, что вызвало снижение потребления энергии за счет фактора активности на 2.6 млн тут. Технологический фактор в 2022 году действовал в сторону повышения потребности в энергии на 13.7 млн тут. Удельные расходы энергии в 2022 году снижались на газопроводном, нефтепроводном и городском электрическом транспорте. Причина резкого роста вклада технологического фактора в 2022 году связана с отражением в статистике заметного роста потребления жидкого топлива на автомобильном транспорте. Без этого он был бы на 16.2 млн тут ниже, то есть отрицательным.

За счет изменения технологического фактора в сфере забора, очистки и распределения воды, сбора и обработки сточных вод, сбора, обработки и утилизации отходов (коммунально-бытовое хозяйство) объем потребления энергии в 2022 году вырос на 0.4 млн тут, а в строительстве зафиксировано сокращение на 0.2 млн тут. За счет технологического фактора в 2022 году потребление энергии в сфере услуг увеличилось на 5.9 млн тут. Бюджетофинансируемые организации показали разный результат: меры политики по повышению энергоэффективности бюджетных организаций в 2015-2022 годах не позволили получить экономию в сфере образования (перерасход на 3 млн тут), но дали небольшую экономию (0.38 млн тут) в сфере здравоохранения. Устойчиво увеличивались удельные расходы энергии в торговле и прочей сфере услуг, в которую входят доставка, услуги связи, интернета и др.

Основным фактором роста потребления энергии в жилищном секторе в 2022 году стал прирост площади жилого фонда (3.8 млн тут), а основным фактором, тормозящим рост потребления, – фактор климата (-4.6 млн тут). Строительство новых, более энергоэффективных зданий и повышение теплозащиты существующих, рост использования энергоэффективных систем горячего водоснабжения (ГВС) и бытовых приборов позволили снизить потребление энергии в жилищном секторе за счет технологического фактора в 2022 году на 1.3 млн тут. Прогресс в повышении обеспеченности населения приборами учета в 2022 году существенно замедлился, однако улучшается

ситуация с обеспеченностью «умными» приборами учета электроэнергии, хотя темпы отстают от заданных Правительством. В целом, процессы повышения энергоэффективности в жилищном секторе идут медленно и вклад технологического фактора после 2018 года ни разу не превышал 2 млн руб. Это при том, что потенциал экономии энергии при доведении по итогам энергоэффективного капитального ремонта удельного расхода энергии до базового уровня может составить 42-45%, а при доведении удельного расхода энергии до уровня здания класса A++ экономия может составить 77-78%. Потенциал экономии энергии на нужды ГВС равен 27%. Однако в России нет действующих документов федерального уровня, в которых были бы установлены цели по повышению энергоэффективности при капитальном ремонте многоквартирных домов (МКД) или целевые объемы охвата МКД энергоэффективным капитальным ремонтом. Действующие документы и проекты новых подвергаются жесткой критике (Башмаков, Борисов, 2023).

Анализ влияния динамики цен на энергию и на эффективность ее использования в России практически не проводится. Падение реальных (скорректированных на инфляцию) цен на энергию для разных видов выпускаемой промышленной продукции в 2014-2022 годах составило 12-70%, что заметно ограничивало вклад технологического фактора в повышение энергоэффективности в промышленности. При допущении, что коэффициент эластичности потребления энергии по цене равен только -0.1, получается, что за эти годы недополучено 3-10% от возможного повышения энергоэффективности в этих секторах. В отличие от промышленности, относительные цены на энергию на транспорте имели общую тенденцию к повышению, что стимулировало повышение вклада технологического фактора в этом секторе. Динамика цен на энергию, используемую на бытовые нужды населения, также стимулировала повышение энергоэффективности.

Вывод о том, что Россия является одной из самых энергоемких стран мира, остается верным (Башмаков, 2022). В 2021 году Россия по уровню производительности энергии (величина, обратная энергоемкости) заняла 186-е место из 193 стран. За Россией следуют только Северная Корея, Иран, Кувейт, Бутан, Бахрейн, Венесуэла и Туркменистан (EIA, 2023). В 2022 году энергоемкость ВВП России была самой высокой среди стран G20, Россия по уровню энергоэффективности находилась на 42-м месте из 43 крупнейших потребителей энергии в мире (рис. 4).

Месть проигнорированного приоритета энергетической политики России: в 2022 году даже при расчете по паритету покупательной способности (ППС) разрывы в уровне энергоемкости ВВП не просто остались значительными, но даже выросли: до 1.3 раза по сравнению с Канадой, 1.5 раза – с Китаем, почти до 2 раз по сравнению с миром в целом, 2.1 раза – с США, 2.9 раза – с Японией и до 3.2 раза – с ЕС. В 2022 году энергоемкость ВВП России выросла на фоне ее снижения в мире в целом на 2.2%, а в ЕС – на 7.8%. В 2015-2022 годах энергоемкость ВВП в России в среднем росла на 1.4%. В ЕС среднегодовые темпы снижения энергоемкости ВВП составили 2.7%, в США и Турции – 1.9%, в Китае – 2.1%, в Великобритании – 3.5%, в Нидерландах –

3.9% (Enerdata, 2023). В 2023 году 8-я ежегодная глобальная конференция по энергоэффективности призвала снижать энергоёмкость ВВП более чем на 4% в год до 2030 г. (IEA, 2023).

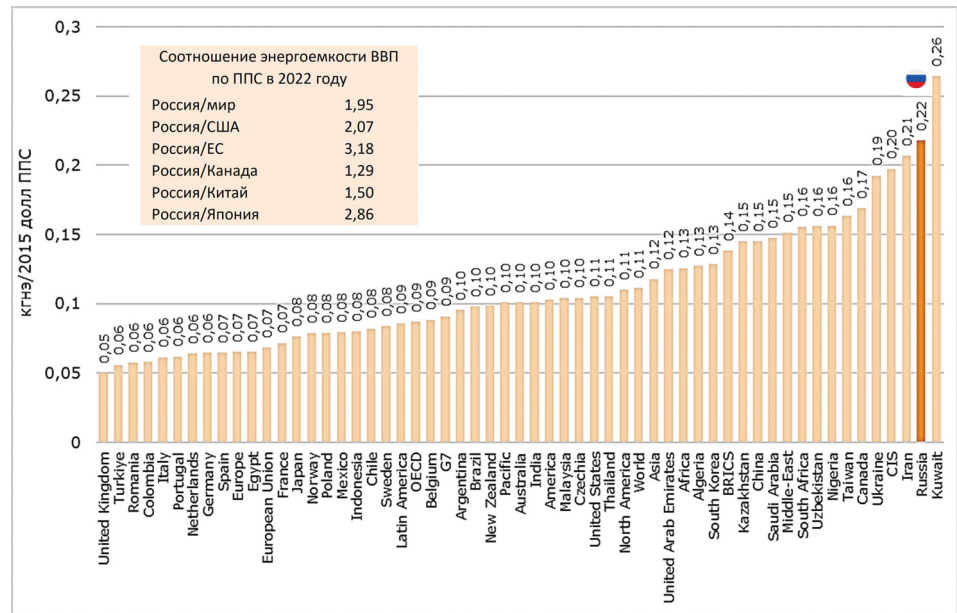


Рисунок 4. Сопоставление 43 стран-основных потребителей энергии по энергоёмкости ВВП по ППС в 2022 году
(построено авторами на основе данных: Enerdata, 2023
World Energy & Climate Statistics – Yearbook 2023)

Figure 4. Comparison of 43 major energy consuming countries by GDP energy intensity (at PPP in 2022 prices)
Developed by authors based on data from: Enerdata, 2023. World Energy & Climate Statistics – Yearbook 2023

Россия проиграла гонку за повышение энергоэффективности. После проведения рыночных реформ Россия улучшила свой рейтинг по энергоэффективности в 1995-2008 годах. Однако после 2008 года при возврате к доминированию госсектора в экономике и особенно после 2014 года, когда была свернута господдержка программ по повышению энергоэффективности, все эти достижения были утеряны. Последняя треть века, которую можно было бы использовать для сокращения разрыва в уровне энергоёмкости ВВП, просто потеряна. Никакого прогресса в рейтинге по энергоэффективности за 32 года Россия не достигла. Свертывание программ повышения энергоэффективности после 2014 года привело к быстрому восстановлению разрывов в уровне энергоёмкости ВВП с другими странами, которые превысили не только значения советской эпохи (1990 г.), но и значения, отмеченные для самых низких уровней экономической активности 1990-х.

Разрывы в уровне энергоёмкости в основном определяются более низким уровнем развития экономики России (по уровню ВВП на душу населения, структуры экономики и по уровню используемых технологий), а также низкими и падающими реальными (скорректированными на инфляцию) ценами на энергию в промышленности. Низкие цены на энергию также вли-

яют на структуру экономики, определяя роль России в международном разделении труда со специализацией на производстве энергоемких сырьевых товаров (металлов, химической продукции, строительных материалов). Они не стимулируют технологическую модернизацию. В итоге, страны с более низкими ценами на энергию не имеют конкурентных преимуществ, поскольку у них выше энергоемкость ВВП, а доля расходов на энергию в ВВП не ниже, а даже выше, чем в странах с более высокими ценами на энергию. Заметно меньшее влияние на разрыв в энергоемкости ВВП с другими странами – в пределах 10% – оказывают разница в климатических условиях, размер территории страны и наличие запасов энергетических ресурсов (Bashmakov et al., 2023b; Bashmakov, 2023). Высокая энергоемкость для России и отсутствие прогресса в ее снижении в сравнении с другими странами являются естественным итогом крайне низкого приоритета повышения энергоэффективности в энергетической и экономической политике России после 2014 года. В системе рейтинга ACEEE по активности в сфере энергоэффективности за 2022 год Россия заняла 22-е место из 25 стран, набрав в сумме только 28 баллов из 100 возможных против 74.5 баллов у Франции (1 место), или 57.5 баллов у Китая (9 место). За Россией оказались только Саудовская Аравия, ЮАР и ОАЭ (Subramanian et al., 2022).

Высокая энергоемкость тормозит экономический рост (Башмаков, 2019). Для ликвидации технологического разрыва в уровнях энергоемкости ВВП, повышения конкурентоспособности российского бизнеса, снижения нагрузки на окружающую среду и климат, обеспечения экономической доступности энергии для разных групп потребителей и решения задачи декарбонизации России необходимо предпринять усилия для снижения энергоемкости ВВП в два раза.

Анализ динамики выбросов ПГ в секторе «энергетика»

Модель МТФК-16-80-ПГ оценивает влияние факторов на динамику выбросов ПГ от сектора «энергетика» России в шести режимах: комбинации выбросов CO₂ или трех ПГ (CO₂, CH₄ и N₂O) с включением или исключением выбросов от утечек и при расчете по прямым выбросам или с разнесением косвенных выбросов ПГ по секторам, где потребляются электрическая и тепловая энергия – с максимальным числом факторов для экономики в целом, равным 9. Главная задача модели – оценить изменение выбросов ПГ за счет вклада технологического фактора, обусловившего экономию энергии. Сравнение оценки выбросов ПГ в секторе «энергетика» по модели МТФК-16-80-ПГ с данными Национальной инвентаризации (Национальный доклад..., 2023) за 2015-2021 годы дает близкие результаты: с учетом меньшего перечня ПГ в МТФК-16-80-ПГ (только CO₂, CH₄ и N₂O) расхождения итоговых значений не превышают 0.6%.

В России суперкаплинг – практически полное совпадение изменения выбросов ПГ с изменением ВВП в 2020-2021 годах – сменился «обратным декаплингом» в 2022 году – ростом выбросов ПГ при снижении ВВП (рис. 5).

По оценке, выбросы ПГ от сектора «энергетика» в 2022 году выросли на 1%, несмотря на снижение ВВП на 2.1%. В России впервые с 1990 года падение ВВП сопровождалось не падением, а ростом выбросов ПГ в секторе «энергетика». Сильный «каплинг» 90-х сменился очень слабым после 1998 г. А в 1997 г., 2000 г., 2002 г., 2007 г., 2013-2014 гг., 2016 г. и 2019 г. проявлялся декаплинг.

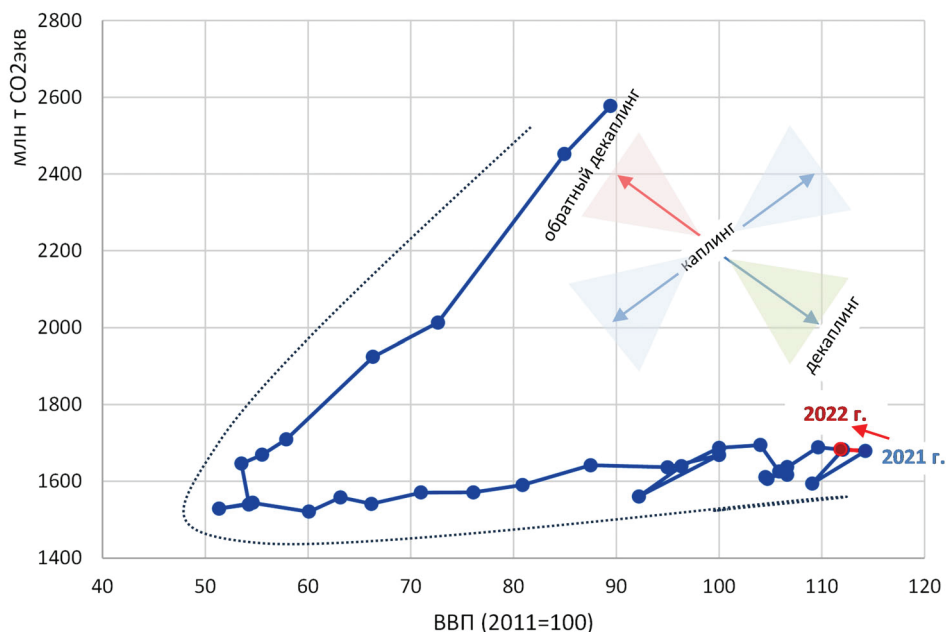


Рисунок 5. Динамика выбросов ПГ в секторе «энергетика» и ВВП в 1991-2022 гг.

(построено авторами по данным Росстата (ВВП),

Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990-2021 гг. и оценки авторов выбросов ПГ в 2022 г.)

Figure 5. Evolution of energy related GHG emission and GDP in 1991-2022

(developed by authors based on data from: Rosstat (GDP),

National Inventory Report of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for 1990-2021; and authors' estimates of GHG emission in 2022 based on the MTFC-16-80-GHG)

В 2022 году рост глобальных выбросов ПГ также не удалось остановить. По оценке IEA (2023), выбросы ПГ от сектора «энергетика» и от промышленных процессов выросли на 0.9% (на 321 млн т CO_2 экв.) и достигли рекордного за всю историю человечества уровня 36.8 млрд т CO_2 экв. В России сумма выбросов от этих источников в 2022 году составила 1839 млн т CO_2 экв. (5% глобальной эмиссии), но выросла немного медленнее – на 0.4%.

По отдельным видам экономической деятельности выбросы ПГ изменялись довольно неравномерно (с учетом утечек при оценке по прямым и косвенным выбросам) и в широких диапазонах: от падения на 26.3 млн т CO_2 экв. на газопроводном транспорте до роста на 37.7 млн т CO_2 экв. на автомобильном. Рост выбросов ПГ был зафиксирован по 43 видам экономической активности из 80.

Вклад технологического фактора более адекватно отражает расчет по прямым и косвенным выбросам ПГ. В этом случае выбросы ПГ от производства и распределения электрической и тепловой энергии разносятся по секторам, где эти энергоносители используются, что позволяет учесть эффекты повышения эффективности их использования в секторах конечного потребления энергии. При таком методе оценки получается, что за счет экономического кризиса выбросы ПГ в зависимости от охвата их источников снизились на 30-35 млн т CO₂экв. (табл. 1). Кризис 2022 года сопровождался заметными структурными сдвигами в пользу более углеродоемких секторов, что способствовало росту выбросов CO₂ на 31-32 млн т CO₂, а трех ПГ – на 32-35 млн т CO₂экв. Внутри секторов структура также менялась, но уже в пользу менее углеродоемких видов экономической деятельности. Это способствовало снижению выбросов CO₂ на 6-8 млн т, а ПГ – на 8-9 млн т CO₂экв. Технологический фактор в 2022 году не сдерживал рост выбросов ПГ. За счет него выбросы CO₂ выросли на 12-19 млн т CO₂, а по трем ПГ – на 13-18 млн т CO₂экв. Факторы загрузки производственных мощностей и роста благоустройства обеспечили прирост выбросов на уровне около 2 млн т CO₂экв. каждый. Фактор углеродоемкости при расчете по всем ПГ с учетом утечек дал рост выбросов ПГ на 16-20 млн т CO₂экв. в зависимости от охвата источников выбросов.

Таблица 1. Вклад факторов в изменение выбросов трех ПГ от сектора «энергетика» с учетом утечек и при разнесении косвенных выбросов по секторам конечного потребления энергии в 2015-2022 гг.

(Расчеты авторов на модели МТФК-16-80-ПГ)

Table 1. Contribution from individual factors to the evolution of three energy related GHGs emission with an account of fugitive and indirect emissions allocated to end-use sectors in 2015-2022
(Authors' estimates using MTFC-16-80-GHG model)

	всего изменение выбросов ПГ	углеродоемкость энергии*	структура на уровне секторов	структура на уровне подсекторов	экономическая активность	технологический фактор	климат	загрузка ПМ	благоустройство и обеспеченность
2016/2015	98 191	17 515	27 100	-10 378	3 030	46 943	14 622	-886	245
2017/2016	-16 661	-16 731	18 796	60	29 087	-38 253	-6 452	-2 550	-619
2018/2017	35 772	20 988	-601	-12 067	44 758	-22 950	7 316	-1 569	-103
2019/2018	-29 242	-8 079	-902	-5 562	35 222	-25 885	-23 385	-1 118	466
2020/2019	-67 966	-10 403	-1 435	2 438	-42 273	-15 266	-2 848	1 505	316
2021/2020	129 646	-9	616	-5 903	87 540	23 156	26 857	-2 280	-331
2022/2021	15 876	15 872	35 277	-9 323	-35 001	17 830	-12 098	1 509	1 809
2022/2015	165 616	19 154	78 851	-40 734	122 364	-14 425	4 013	-5 390	1 783

* при разнесении косвенных выбросов по секторам конечного потребления энергии этот фактор показывает углеродоемкость потребляемой энергии.

В 2020-2022 годах удельные выбросы CO_2 при выработке электроэнергии в России выросли на 6%. Снижение параметров энергоэффективности в электроэнергетике в 2022 году обеспечило вклад технологического фактора в прирост выбросов ПГ в размере 2.8 млн т CO_2 экв. (при оценке по прямым выбросам ПГ). В международном рейтинге по удельным выбросам CO_2 при выработке электроэнергии в 2022 году Россия находится не в лидерах, как некоторые полагают, а в середине списка – на 42-м месте из 82 стран, по которым есть данные (рис. 6).

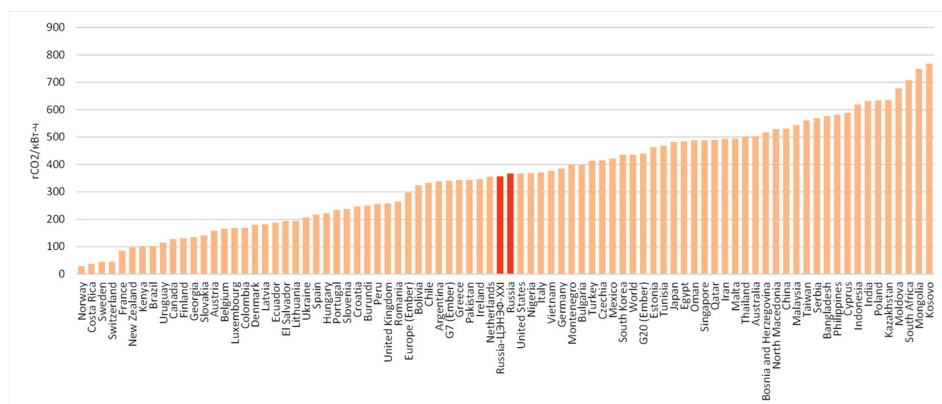


Рисунок 6. Рейтинг стран по удельным выбросам CO_2 при выработке электроэнергии (Our World in Data Carbon intensity of electricity, 2022 (our world in data.org) по данным Ember; Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023) и расчеты авторов на модели МТФК-16-80-ПГ)

Figure 6. Rating of countries by specific CO_2 emissions from electricity generation (Our World in Data Carbon intensity of electricity, 2022 (our world in data.org) based on data from: Ember; Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023); and the authors' estimates using the MTFC-16-80-GHG model)

В секторе теплоснабжения технологический фактор позволил снизить выбросы ПГ почти на 3 млн т CO_2 экв. (с учетом косвенных выбросов). В добывающей промышленности за счет технологического повышения энергоэффективности выбросы ПГ снизились в 2022 году на 5.4 млн т CO_2 экв. Баланс повышения и снижения удельных расходов энергии на производство отдельных видов продукции обрабатывающей промышленности в 2022 году привел к росту выбросов ПГ за счет технологического фактора на 2 млн т CO_2 экв. Технологический фактор в 2022 году способствовал дополнительному росту выбросов ПГ в сельском хозяйстве, но только на 70 тыс т CO_2 экв. В строительстве сумма прямых и косвенных выбросов ПГ в 2022 году снизилась на 1.3 млн т CO_2 экв. В водоснабжении и водоотведении доминирует электроэнергия, поэтому там в основном формируются косвенные выбросы ПГ. При росте энергоемкости технологический фактор не сдерживал рост выбросов и они выросли на 0.5 млн т CO_2 экв.

Оценка вклада технологического фактора на транспорте в 2022 году зависит от точности данных по потреблению жидкого топлива на автомобильном транспорте. При расчетах на основе данных Росстата получается, что за счет технологического фактора выбросы выросли на 25 млн т CO_2 экв., а при

расчете по парку автомобилей – снизились на 10 млн т CO₂экв. Таким образом, диапазон неопределенности равен 35 млн т CO₂экв.

В 2022 году вклад технологического фактора в сфере услуг обеспечил прирост выбросов ПГ почти на 11 млн т CO₂экв., а в жилищном секторе – их снижение на 2 млн т CO₂экв. В 2022 году выбросы от промышленных процессов упали на 7.3 млн т CO₂экв. в основном за счет снижения производства таких продуктов, как аммиак, сталь, чугун, агломерат и окатыши.

Если расширить временной горизонт анализа, то в 2015-2022 годах технологический фактор стал весомым фактором сдерживания выбросов ПГ (табл. 1 и рис. 7). При учете косвенных выбросов ПГ его вклад в торможение роста выбросов ПГ (в зависимости от метрики оценки выбросов) составляет 14-52 млн т CO₂экв. Но он не смог компенсировать в эти годы даже половину вклада, порожденного ростом экономической активности – 106-122 млн т CO₂экв. Для всех метрик межсекторные сдвиги были в пользу более углеродоемких секторов, а внутрисекторные – в пользу менее углеродоемких видов активности, что привело к росту выбросов на 65-79 млн т CO₂экв. за счет первых и к снижению на 22-41 млн т CO₂экв. – за счет вторых. Климатический фактор (грудусо-сутки отопительного периода, ГСОП) обусловил снижение выбросов ПГ на 5 млн т CO₂экв. В 2015-2022 годах этот фактор определил прирост выбросов ПГ только на 1 млн т CO₂экв. Факторы загрузки производственных мощностей и благоустройства сравнительно мало повлияли на итоги 2022 г., а в 2015-2022 гг. первый фактор обеспечил вклад в торможение роста выбросов ПГ на уровне скромных 2 млн т CO₂экв., а второй – только на 46-48 тыс. т CO₂экв.

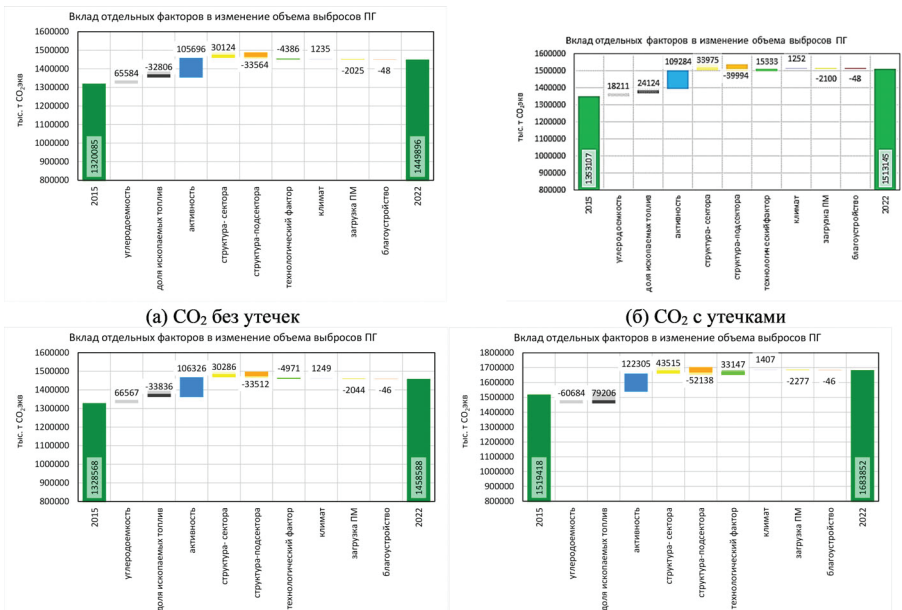


Рисунок 7. Оценка вкладов различных факторов в динамику выбросов ПГ от сектора «энергетика» в зависимости от охвата источников эмиссии в 2015-2022 годах (расчеты авторов на модели МТФК-16-80-ПГ)

Figure 7. Estimated contributions from individual factors to the evolution of energy related GHG emissions based on the scope of emissions sources in 2015-2022 (estimated by authors using the MTFK-16-80-GHG model)

На траектории декарбонизации Россия топчется на месте (Bashmakov et al., 2022; Башмаков и др., 2023). В 2015-2022 годах не было прогресса в снижении углеродоемкости ВВП России в части выбросов от сектора «энергетика» (рис. 8).

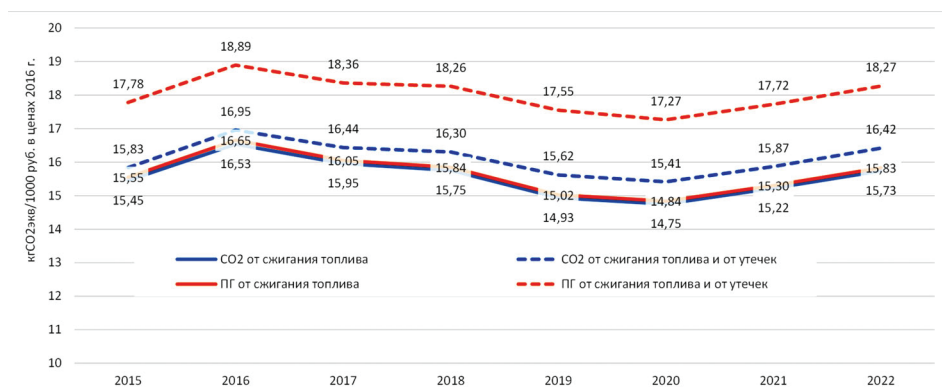


Рисунок 8. Динамика показателей углеродоемкости ВВП в 2015-2022 годах
 (расчеты авторов на модели МТФК-16-80-ПГ)

Figure 8. Evolution of GDP carbon intensity in 2015-2022
 (estimated by authors using the MTFK-16-80-GHG model)

В странах МЭА технологический фактор – повышение энергоэффективности за счет внедрения новых технологий – является важнейшим драйвером снижения выбросов во всех секторах. В ЕС основным фактором снижения выбросов ПГ на 4% в 2022 г. стало снижение энергоемкости ВВП на 7.8%. В 2015-2021 гг. во многих странах МЭА фактор повышения энергоэффективности стал дополняться снижением углеродоемкости энергии за счет роста доли нетопливных источников энергии (IEA, 2023). В отличие от модели МТФК-16-80-ПГ, в системе декомпозиционного анализа МЭА не выделяются факторы климата и загрузки производственных мощностей, поэтому генерируемые ею оценки вклада технологического фактора получаются несколько искаженными.

Проблема достижимости углеродной нейтральности к 2060 году

Оценка достижимости цели углеродной нейтральности, сделанная ЦЭНЭФ-XXI в 2022 году (Башмаков, 2022b; Башмаков, 2023b; Bashmakov et al., 2022b), остается пока единственным исследованием, в котором протестирована возможность достижения Россией заявленной цели углеродной нейтральности к 2060 году. Однако, изменение оценок развития экономики и динамики выбросов ПГ в 2022 году привело к тому, что форма траекторий движения к углеродной нейтральности до 2060 года несколько изменилась (рис. 9). В среднесрочной перспективе ограниченный доступ к низкоуглеродным технологиям будет тормозить их внедрение и тем самым поддерживать выбросы ПГ на более высоком уровне. Достижение углеродной нейтрально-

сти к 2060 году все еще возможно, однако ожидаемые выбросы от сектора «энергетика» в 2060 году превысят показатель сценария 4D (Bashmakov et al., 2022b) примерно на 80-100 млн тCO₂экв. Именно столько дополнительных стоков в секторе ЗИЗЛХ (по сравнению с уровнями, оцененными в 2022 г., Bashmakov et al., 2022b) будет необходимо добавить для достижения углеродной нейтральности к 2060 году (Bashmakov et al., 2023a). Однако нужно иметь в виду, что снижение стока в секторе ЗИЗЛХ – это устойчивая тенденция, которая в 2021 году еще ускорилась: снижение на 73 млн т CO₂экв. Кроме того, усилия по восстановлению лесов приносят меньший, чем ожидается, эффект (West et al., 2023), делая надежды на этот сектор, как на панацею, все более зыбкими.

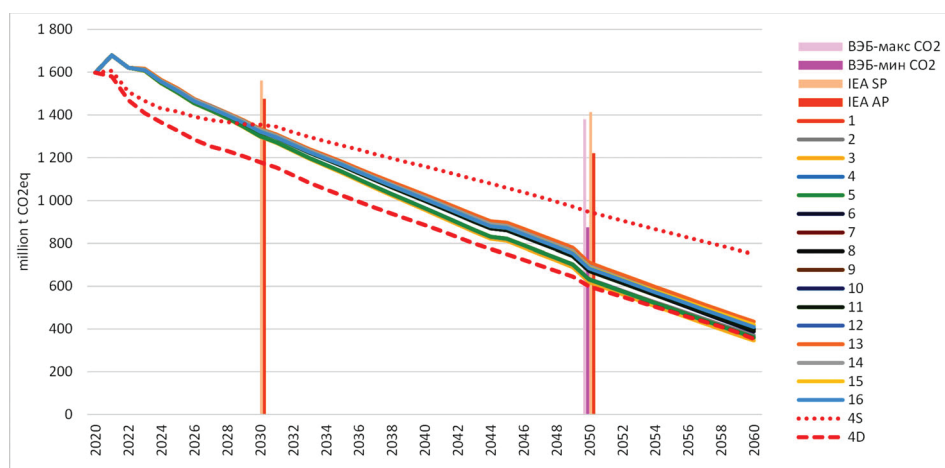


Рисунок 9. Динамика выбросов ПГ в секторе энергетики (Башмаков, 2023a)

Figure 9. Evolution of energy related GHG emissions (Bashmakov, 2023a)

Важнейшее условие быстрого сокращения выбросов ПГ – наличие низкоуглеродных технологий (отечественных или импортированных из стран, не наложивших или снявших санкции на поставки таких технологий в Россию). Важно понять, каково нынешнее положение вещей с доступом к низкоуглеродным технологиям в России и как оно может измениться в перспективе. Но это уже задача для другого исследования (Башмаков и др., 2023).

Заключение

В России на протяжении уже ряда лет (с 2019 года) успешно работает созданная по инициативе МЭР РФ новая версия системы учета повышения энергоэффективности и выбросов парниковых газов в секторе «энергетика» (МТФК-16-80-ПГ). Она позволяет проводить мониторинг успешности решения таких государственных управленческих задач, как повышение энергоэффективности и декарбонизация экономики. Использование в этой системе данных за 2015-2022 гг. показало, что вклад технологического фактора и в снижение энергоемкости ВВП, и в контроль за выбросами ПГ оставался

довольно скромным. Он не только не позволял нейтрализовать генерируемый экономической активностью прирост потребления энергии и выбросов ПГ, но перекрывался структурными сдвигами в экономике в пользу более энергоемких и углеродоемких видов деятельности. Таким образом, и технологическая политика, и структурная экономическая политика в сфере повышения энергоэффективности и декарбонизации в силу своей крайне низкой интенсивности не приносила желаемых результатов, и оба направления нуждаются в резкой интенсификации. Сохранение вялой, имитирующей деятельность активности в этих направлениях несет высокие риски отставания в технологической гонке (Башмаков и др., 2023), потери конкурентоспособности высокоэнергоемких и углеродоемких российских товаров и услуг как на мировых рынках, так и на внутреннем, а также риски невыполнения взятого обязательства по достижению углеродной нейтральности к 2060 году.

Список литературы

Башмаков, И.А. (2019) Повышение энергоэффективности и экономический рост, *Вопросы экономики*, № 10, с. 32-63, <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2019-10-32-63>.

Башмаков, И.А. (2022a) Энергоемкость ВВП России в 2015-2020 гг. Ч. 2. Международные сопоставления, *Энергосбережение*. № 3, с. 16-19.

Башмаков, И.А. (2022b) Россия на траекториях движения к углеродной нейтральности: три четверки и одна двойка, *Нефтегазовая вертикаль*, № 11.

Башмаков, И.А. (2023a) *Внешняя торговля, экономический рост и декарбонизация в России. Долгосрочные перспективы*, <https://cenef-xxi.ru/articles/vneshnyaya-torgovlya-ekonomicheskij-rost-i-dekarbonizaciya-v-rossii-dolgosrochnye-perspektivy>.

Башмаков, И.А. (2023b) Сценарии движения России к углеродной нейтральности, *Энергосбережение*, № 1.

Башмаков, И.А., Мышак, А.Д. (2012) Факторный анализ эволюции российской энергоэффективности, методология и результаты, *Вопросы экономики*, № 10, с. 117-131, <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2012-10-117-131>.

Башмаков, И.А., Борисов, К.Б. (2023) Об определении классов энергоэффективности многоквартирных жилых домов. Предложения по изменению действующей и новой методик расчета, *Энергосбережение*, № 2.

Башмаков, И., Башмаков, В., Борисов, К., Дзедзичек, М., Лебедев, О., Лунин, А., Мышак, А. (2023) *Низкоуглеродные технологии в России: нынешний статус и перспективы*, <https://cenef-xxi.ru/articles/nizkouglerodnye-tehnologii-v-rossii-nyneshnij-status-i-perspektivy>.

Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации за 2021 год, Министерство экономического развития Российской Федерации (economy.gov.ru).

МЭР РФ. (2019) Приказ Министерства экономического развития России от 1 августа 2019 г. № 471 «Об утверждении методики расчета энергоемкости валового внутреннего продукта Российской Федерации и оценки вклада отдельных факторов в динамику энергоемкости валового внутреннего продукта Российской Федерации».

Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990-2021 гг.

Ang, B.W., Choi, K.H. (1997) Decomposition of aggregate energy and gas emission intensities for industry: a refined Divisia index method, *The Energy Journal*, vol. 18(3), pp. 59-73.

Ang, B.W., Choi, K.H. (2010) Accounting frameworks for tracking energy efficiency trends, *Energy Economics*, vol. 32, pp. 1209-1219.

Ang, B.W., Choi, K.H. (2012) Attribution of changes in Divisia real energy intensity index – An extension of index decomposition analysis, *Energy Economics*, vol. 34, pp. 171-176.

Bashmakov, I.A., Myshak, A.D. (2012) *Factors behind the evolution of greenhouse gas emissions in Russia's the energy sector. Analysis based on the national inventory data*, Moscow, ANO "Roshydromet meteorological agency", 131 p.

Bashmakov, I.A., Myshak, A.D. (2014) Russian energy efficiency accounting system, *Energy Efficiency*, no. 7, pp. 743-759. DOI 10.1007/s12053-014-9252-z.

Bashmakov, I.A. (2021) Greenhouse gas emissions from the global steel industry: the past, the present and the future. *Ferr. Metall, Bull. Sci., Tech. Econ. Inf.*, no. 77(8), pp. 882-901, doi:10.32339/0135-5910-2021-9-1071-1086.

Bashmakov, I. (2023) Three laws of energy transitions and economic growth, *National Accounting Review, Volume (Issue) x-x Page*. DOI: 10.3934/NAR.2022. In Print.

Bashmakov, I.A., Nilsson, L.J., Acquaye, A., Bataille, C.J., Cullen, M., de la Rue du Can, S., Fishedick, M., Geng, Y., Tanaka, K. (2022a) Industry. In IPCC, 2022a: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.013.

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

Bashmakov, I., Myshak, A., Bashmakov, V.A., Bashmakov, V.I., Borisov, K., Dzedzichuk, M.A., Lunin, A., Lebedev, O., Shishkina, T. (2023). Russian energy

balance, energy efficiency, and energy-related GHG emission accounting system, *Energy Efficiency*. <https://doi.org/10.1007/s12053-023-10132-6>.

Bashmakov, I., Grubb, M., Lowe, R., Drummond, P., Myshak, A., Hinder B. (2023b) “*Minus 1*” and energy costs constants: empirical evidence, theory and policy implications.

Bin, Su, Ang, B.W. (2012) Structural decomposition analysis applied to energy and emissions: Some methodological developments, *Energy Economics*, no. 34(1). DOI:10.1016/j.eneco.2011.10.009.

Cahill, C., Gallachóir, B.P. (2011) Combining physical and economic output data to analyse energy and CO2 emissions trends in industry, *Energy Policy*, no. 49, pp. 422-429.

Dhokal, S., J.C. Minx, F.L. Toth, A. Abdel-Aziz, M.J. Figueroa Meza, K. Hubacek, I.G.C. Jonckheere, Yong-Gun Kim, G.F. Nemet, S. Pachauri, X.C. Tan, T. Wiedmann (2022) *Emissions Trends and Drivers. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.004.

EIA (2023) International – U.S. *Energy Information Administration* (EIA).

Enerdata (2022) ODYSSEE-MURE decomposition tool. *Energy efficiency factors tool that have consequences in the energy consumption ODYSSEE* (odyssee-mure.eu).

Enerdata (2023) *World Energy & Climate Statistics*, Yearbook 2022. World energy statistics Enerdata.

Energy Institute (2023) *Statistical Review of World Energy*, June 2023.

Goh, T., Ang, B.W. (2019) Tracking economy-wide energy efficiency using LMDI: approach and practices. 2019, *Energy Efficiency*, no. 12, pp. 829-847 <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9683-z>.

IEA (2021) *Energy Efficiency* 2021.

IEA (2023) *Greenhouse Gas Emissions from Energy*, Highlights.

Kaya, Y. (1990) *Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios*, IPCC Response Strategies Working Group Memorandum 1989. IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, 1990.

Koilakou, E., Hatzigeorgiou, E., Bithas, K. (2021) *Carbon and Energy Intensity of the USA and Germany. A LMDI Decomposition Approach and Decoupling Analysis*. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1119478/v1.

Lamb, W.F., Wiedmann, T., Pongratz, J., Andrew, R., Crippa, M., Olivier, J.G.J., Wiedenhofer, D., Mattioli, G., Khourdajie, A.A., House, J., Pachauri, S., Figueroa, M.J., Saheb, Y., Slade, R., Hubacek, K., Sun, L., Ribeiro, S.K., Khennas, S., de la Rue du Can, S., Chapungu, L., Davis, S.J., Bashmakov, I., Dai, H., Dhakal, S., Tan, X., Geng, Y., Gu, B., Minx, J.C. (2021) A Review of Trends and Drivers of Greenhouse Gas Emissions by Sector from 1990 to 2018, *Environmental Research Letters*, vol. 16(7), 073005, available at: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abee4e>.

Lee, J., Kim, J., (2021) A Decomposition Analysis of the Korean Manufacturing Sector, Monetary vs. Physical Outputs, *Sustainability*, 13, 6192. <https://doi.org/10.3390/su13116192>.

Subramanian, S., Bastian, H., Hoffmeister, A., Jennings, B., Tolentino, C., Vaidyanathan, S., Nadel, S. (2022) *2022 International Energy Efficiency Scorecard*, Washington, D.C.: American Council for an Energy-Efficient Economy, www.aceee.org/research-report/i2201.

West, T.A., Wunder, P.S., Sills, E.O., Börner, J., Rifai, S.W., Neidermeier, A.N., Frey, G.P., Kontoleon, A. (2023) Action needed to make carbon offsets from forest conservation work for climate change mitigation, *Science*, vol. 381, pp. 873-877.

References

Bashmakov, I.A. (2019) Povysheniye energoeffektivnosti i ekonomicheskiy rost [Energy efficiency and economic growth], *Issues of Economy*. no. 10, pp. 32-63. <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2019-10-32-63>.

Bashmakov, I.A. (2022a) Energoyemkost' VVP Rossii v 2015-2020 gg. CH.2. [Energy intensity of the Russian 2015-2020 GDP. Part 2], *International comparisons, Energy Conservation*, no. 3, pp. 16-19.

Bashmakov, I.A. (2022b) Rossiya na puti k uglerodnoy neytral'nosti: tri «chetverki» i odna «dvoika» [Russia on the way to carbon neutrality: three 'fours' and one 'two'], *Neftegazovaya Vertikal*, no. 11.

Bashmakov, I.A. (2023a) *Vneshnyaya trgovlya Rossii, ekonomicheskiy rost i dekarbonizatsiya. Dolgosrochnoye videniye* [Russia's foreign trade, economic growth and decarbonization. Long-term vision], Moscow, Russia, <https://cenef-xxi.ru/articles/russia-s-foreign-trade-economic-growth-and-decarbonization-long-term-vision>.

Bashmakov, I.A. (2023b) Stsenarii dvizheniya Rossii k uglerodnoy neytral'nosti [Russia's carbon neutrality path ways], *Energy Conservation*, no. 1.

Bashmakov, I.A., Myshak, A.D. (2012) Faktornyy analiz evolyutsii energoeffektivnosti v Rossii: metodologiya i rezul'taty [Factor analysis of evolution of Russian energy efficiency: methodology and outcomes], *Issues of Economy*. no. 10, pp. 117-131, <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2012-10-117-131>.

Bashmakov, I.A., Borisov, K.B. (2023) Predlozheniya po opredeleniyu deystvuyushchey i novoy designating energy efficiency classes to apartment

buildings [Recommendations to revise the current and the new assessment methodologies], *Energy Conservation*, no. 2.

Bashmakov, I., Bashmakov, V., Borisov, K., Dzedzichuk, M., Lebedev, O., Lunin, A., Myshak, A., (2023) *Nizkouglerodnyye tekhnologii v Rossii: sovremennoye sostoyaniye i perspektivy* [Low carbon technologies in Russia: current status and perspectives], <https://cenef-xxi.ru/articles/low-carbon-technologies-in-russia:-current-status-and-perspectives>.

Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii energosberezheniya i energoeffektivnosti v Rossiyskoy Federatsii (2021) [State Report on the status of energy conservation and energy efficiency in the Russian Federation]. (economy.gov.ru).

Prikaz Ministerstva ekonomicheskogo razvitiya RF ot 1 avgusta 2019 g. № 471 «Ob utverzhdenii metodiki rascheta energoyemkosti valovogo vnutrennego produkta Rossiyskoy Federatsii i otsenki vklada osnovnykh faktorov v dinamiku energoyemkosti valovogo vnutrennego produkta Rossiyskoy Federatsii» (2019) [Ministry of Economy of the Russian Federation (2019) Order of the Ministry of Economy of the Russian Federation of August 1, 2019, No. 471 “On the approval of the methodology for estimating the energy intensity of the gross domestic product of the Russian Federation and assessing the contribution of individual factors to the dynamics of the energy intensity of the gross domestic product of the Russian Federation.”].

Otchet o natsional'nom kadastre antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorbtzii poglotitelyami parnikovyykh gazov, ne reguliruyemykh Monreal'skim protokolom, za 1990-2021 gody. [National Inventory Report of anthropogenic emissions from sources and removals by sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for 1990-2021].

Ang, B.W., Choi, K.H. (1997) Decomposition of aggregate energy and gas emission intensities for industry: a refined Divisia index method, *The Energy Journal*, vol. 18(3), pp. 59-73.

Ang, B.W., Choi, K.H. (2010) Accounting frameworks for tracking energy efficiency trends, *Energy Economics*, vol. 32, pp. 1209-1219.

Ang, B.W., Choi, K.H. (2012) Attribution of changes in Divisia real energy intensity index – An extension of index decomposition analysis, *Energy Economics*, vol. 34, pp. 171-176.

Bashmakov, I.A., Myshak, A.D. (2012) *Factors behind the evolution of greenhouse gas emissions in Russia's the energy sector. Analysis based on the national inventory data*, Moscow, ANO “Roshydromet meteorological agency”, 131 p.

Bashmakov, I.A., Myshak, A.D. (2014) Russian energy efficiency accounting system, *Energy Efficiency*, no. 7, pp. 743-759. DOI 10.1007/s12053-014-9252-z.

Bashmakov, I.A. (2021) Greenhouse gas emissions from the global steel industry: the past, the present and the future. Ferr. Metall, *Bull. Sci., Tech. Econ.*

Inf., no. 77(8), pp. 882-901, doi:10.32339/0135-5910-2021-9-1071-1086.

Bashmakov, I. (2023) Three laws of energy transitions and economic growth, *National Accounting Review*, Volume (Issue) x–x Page. DOI: 10.3934/NAR.2022. In Print.

Bashmakov, I.A., Nilsson, L.J., Acquaye, A., Bataille, C.J., Cullen, M., de la Rue du Can, S., Fischedick, M., Geng, Y., Tanaka, K. (2022a) Industry. In IPCC, 2022a: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.013.

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

Bashmakov, I., Myshak, A., Bashmakov, V.A., Bashmakov, V.I., Borisov, K., Dzedzichuk, M.A., Lunin, A., Lebedev, O., Shishkina, T., (2023). Russian energy balance, energy efficiency, and energy-related GHG emission accounting system, *Energy Efficiency*. 16:67, <https://doi.org/10.1007/s12053-023-10132-6>.

Bashmakov, I., Grubb, M., Lowe, R., Drummond, P., Myshak, A., Hinder B. (2023b) “Minus 1” and energy costs constants: empirical evidence, theory and policy implications.

Bin, Su., Ang, B.W. (2012) Structural decomposition analysis applied to energy and emissions: Some methodological developments, *Energy Economics*, no. 34(1). DOI:10.1016/j.eneco.2011.10.009.

Cahill, C., Gallachóir, B. P. (2011) Combining physical and economic output data to analyse energy and CO2 emissions trends in industry, *Energy Policy*, no. 49, pp. 422-429.

Dhakal, S., J.C. Minx, F.L. Toth, A. Abdel-Aziz, M.J. Figueroa Meza, K. Hubacek, I.G.C. Jonckheere, Yong-Gun Kim, G.F. Nemet, S. Pachauri, X.C. Tan, T. Wiedmann (2022) *Emissions Trends and Drivers*. In IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.004.

EIA (2023) International - U.S. *Energy Information Administration* (EIA).

Enerdata (2022) ODYSSEE-MURE decomposition tool. *Energy efficiency factors tool that have consequences in the energy consumption ODYSSEE* (odyssee-mure.eu).

Enerdata (2023) *World Energy & Climate Statistics*, Yearbook 2022. World energy statistics Enerdata.

Energy Institute (2023) *Statistical Review of World Energy*, June 2023.

Goh, T., Ang, B.W. (2019) Tracking economy-wide energy efficiency using LMDI: approach and practices. 2019, *Energy Efficiency*, no. 12, pp. 829-847 <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9683-z>.

IEA (2021) *Energy Efficiency* 2021.

IEA (2023) *Greenhouse Gas Emissions from Energy*, Highlights.

Kaya, Y. (1990) *Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios*," IPCC Response Strategies Working Group Memorandum 1989. IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, 1990.

Koilakou, E., Hatzigeorgiou, E., Bithas, K. (2021) *Carbon and Energy Intensity of the USA and Germany*. A LMDI Decomposition Approach and Decoupling Analysis. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1119478/v1.

Lamb, W.F., Wiedmann, T., Pongratz, J., Andrew, R., Crippa, M., Olivier, J.G.J., Wiedenhofer, D., Mattioli, G., Khouradajie, A.A., House, J., Pachauri, S., Figueroa, M.J., Saheb, Y., Slade, R., Hubacek, K., Sun, L., Ribeiro, S.K., Khennas, S., de la Rue du Can, S., Chapungu, L., Davis, S.J., Bashmakov, I., Dai, H., Dhakal, S., Tan, X., Geng, Y., Gu, B., Minx, J.C. (2021) A Review of Trends and Drivers of Greenhouse Gas Emissions by Sector from 1990 to 2018, *Environmental Research Letters*, vol. 16(7), 073005, available at: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abee4e>.

Lee, J., Kim, J., (2021) A Decomposition Analysis of the Korean Manufacturing Sector, Monetary vs. Physical Outputs, *Sustainability*, 13, 6192. <https://doi.org/10.3390/su13116192>.

Subramanian, S., Bastian, H., Hoffmeister, A., Jennings, B., Tolentino, C., Vaidyanathan, S., Nadel, S. (2022) *2022 International Energy Efficiency Scorecard*. Washington, D.C.: American Council for an Energy-Efficient Economy, www.aceee.org/research-report/i2201.

West, T.A., Wunder, P. S, Sills, E.O., Börner, J., Rifai, S.W., Neidermeier, A.N., Frey, G.P., Kontoleon, A. (2023) Action needed to make carbon offsets from forest conservation work for climate change mitigation, *Science*, vol. 381, 873-877.

Поступила в редакцию: 07.09.2023 г.

Доработана после рецензирования: 29.09.2023 г.

Принята к публикации: 06.11.2023 г.

Для цитирования / Forcitation

Башмаков, И.А., Мышак, А.Д., Башмаков, В.А., Башмаков, В.И., Борисов, К.Б., Дзедзичек, М.Г., Лунин, А.А., Лебедев, О.В., Шишкина, Т.Б. (2023) Оценка вклада технологического фактора в повышение энергоэффективности

и динамику выбросов парниковых газов в секторе «энергетика» России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 4, с. 403-431, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-403-431.

Bashmakov, I.A., Myshak, A.D., Bashmakov, V.A., Bashmakov, V.I., Borisov, K.B., Dzedzichek, M.G., Lunin, A.A., Lebedev, O.V., Shishkina, T.B. (2023) Assessment of the technological factor contribution to energy efficiency improvements and to the evolution of energy related greenhouse gases emissions in Russia, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 4, pp. 403-431, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-403-431.

Новый подход к использованию нейронных сетей для долгосрочного прогноза Эль-Ниньо и Ла-Нинья

А.С. Лубков^{1)}, Е.Н. Воскресенская¹⁾, О.В. Марчукова^{1),2)}*

¹⁾ Институт природно-технических систем,
Россия, 299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

²⁾ Тюменский государственный университет,
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6

* Адрес для переписки: andrey-ls2015@yandex.ru

Реферат. В работе предложен новый подход к использованию методов нейронных сетей и множественной линейной регрессии (МЛР) для прогноза состояния Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК). Моделируемые параметры (индексы Nino3, Nino3.4 и Nino4) разделялись на две компоненты: низкочастотную и высокочастотную. Для моделирования высокочастотной компоненты использовались многослойные нейронные сети (МНС), а для моделирования низкочастотной компоненты – МЛР. Особенностью предложенного подхода является детальный отбор предикторов как входных в модель данных и последующее моделирование с перебором и проверкой всевозможных конструкций многослойной нейронной сети.

На основе предложенного подхода разработана модель прогнозирования экстремальных фаз феномена ЭНЮК – NNM-ENSOv1 (Neural Network Model for ENSO forecast). Полученная модель отличается низкой чувствительностью к весеннему порогу предсказуемости, за счет чего прогнозирует состояние ЭНЮК с заблаговременностью более 7 месяцев значительно лучше по сравнению с динамическими моделями.

Верификация предложенной модели проводилась на контрольном промежутке с 2007 по 2022 годы. NNM-ENSOv1 достаточно хорошо воспроизводит не только события Эль-Ниньо, но и их тип с заблаговременностью до одного года. В подтверждение отметим, что четыре из пяти событий Эль-Ниньо, включая их тип, были предсказаны верно. Вероятность верного определения условий, характерных для событий Эль-Ниньо, достаточно высока и незначительно меняется в границах 76-83% при изменении заблаговременности прогноза в пределах одиннадцати месяцев, в то время как для Ла-Нинья вероятность верного определения с ростом заблаговременности уменьшается от 85 до 31%.

С помощью модели NNM-ENSOv1 в ноябре 2022 г. построен прогноз состояния ЭНЮК в 2023 году. Модель успешно предсказала эволюцию протекавшего до февраля 2023 г. в тот период Ла-Нинья, а затем последующие нейтральные условия в марте-апреле и начало Эль-Ниньо восточно-тихоокеанского типа с мая 2023 года. В итоге, прогноз на первое полугодие 2023 года подтвердился. С результатами моделирования ЭНЮК в режиме реального времени можно ознакомиться на сайте модели: neuroclimate.com.

Ключевые слова. Эль-Ниньо, Ла-Нинья, система океан-атмосфера, долгосрочный прогноз, машинное обучение, моделирование.

An innovative approach to long-term prediction of El Niño and La Niña using neural networks

A.S. Lubkov^{1)*}, *E.N. Voskresenskaya*¹⁾, *O.V. Marchukova*^{1),2)}

¹⁾ Institute of Natural and Technical Systems,
28, Lenina str., 299011, Sevastopol, Russian Federation

²⁾ Tyumen State University,
6, Volodarskogo str., 625003, Tyumen, Russian Federation

*Correspondence address: *andrey-ls2015@yandex.ru*

Abstract. The paper proposes a new approach to the use the neural network methods and multiple linear regression (MLR) to predict the state of El Niño – Southern Oscillation ENSO). The simulated parameters (Nino3, Nino3.4 and Nino4 indices), were decomposed into 2 components: low-frequency and high-frequency. Multilayer neural networks (MNN) were used to simulate the high-frequency component, and MLR was used to simulate low-frequency component. A feature of the proposed approach is the detailed selection of model input predictors and subsequent modeling through the search and verification of all possible constructions of a multilayer neural network.

On the basis of proposed approach the NNM-ENSOv1 model (Neural Network Model) has been developed to extreme ENSO phases predicting. This model is characterized by low sensitivity to the spring threshold of predictability, due to which it predicts the ENSO event state with a lead time of 7 and more months significantly better than dynamic models, and in the task of forecasting with a lead time of 11 months, the forecasting skills of the NNM-ENSOv1 model are comparable to modern statistical models based on machine learning principles.

Verification of the proposed model was carried out for the control period from 2007 to 2022. NNM-ENSOv1 reproduces quite well not only the El Niño events, but even the event types with a lead time of up to one year: 4 of 5 El Niño events were predicted correctly including their types. The probability of correctly determining the typical El Niño conditions varies slightly. It amounts to 76-83% within the forecast lead time, while the probability of correctly determining the La Niña conditions decreases from 85 to 31% when during the lead time increasing.

In November 2022, it was built a forecast of the state of ENSO 2023 using the NNM-ENSOv1 model. This model correctly predicted the evolution of La Niña, which took place that time, until February 2023, the subsequent neutral conditions in March - April, and the beginning of East Pacific type El Niño in May 2023. As a result, the forecast for the first half of 2023 was confirmed. The results of the real-time ENSO simulation are presented on the model's website: neuroclimate.com.

Keywords. El Niño, La Niña, ocean-atmosphere system, long-scale forecast, machine learning, simulation.

Введение

Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК) – глобальный квазипериодический процесс межгодового масштаба, наблюдаемый в системе океан-атмосфера экваториальной зоны Тихого океана. Он является первой модой изменчивости глобальной ежемесячной аномалии температуры поверхности океана (ТПО), вклад которой составляет 18% от общей дисперсии (Philander, 1990; Wallace et al., 1998; Deser et al., 2010; Messie, Chavez, 2011). ЭНЮК характеризуется изменением ТПО и, как следствие, изменением давления на уровне моря. ЭНЮК имеет две противоположные фазы существования – теплую, называемую Эль-Ниньо (ЭН), и холодную – Ла-Нинья (ЛН). Для ЭН характерны перенос теплых экваториальных вод в восточном направлении, выравнивание термоклина у берегов Южной Америки, ослабление интенсивности ячейки Уокера и смещение центров действия атмосферы на экваторе (Larkin, Harrison, 2005; Rasmusson, Carpenter, 1982). Для ЛН характерно смещение теплого экваториального бассейна несколько западнее, выраженное поднятие термоклина у берегов Южной Америки и в центре Тихого океана и интенсификация ячейки Уокера (Philander, 1990).

Формирование и развитие аномалий ЭНЮК – это сложный механизм, включающий как пространственные, так и временные особенности. Длительное исследование этого процесса обнаружили наличие двух пространственных типов зарождения и распространения аномалий ТПО – Центрально-Тихоокеанский (ЦТ) и Восточно-Тихоокеанский (ВТ) типы, которые характерны как для ЭН (Ashok et al., 2007; Kug et al., 2009; Takahashi et al., 2011; Zheleznova, Gushchina, 2016), так и для ЛН (Yuan, Yan, 2013; Zhang et al., 2014; Voskresenskaya et al., 2017). При этом существуют различия в амплитуде и пространственной асимметрии между фазами ЭН и ЛН (An, Jin, 2004). А явления ЛН, в отличие от ЭН, могут длиться два и три года подряд (Hu et al., 2014; DiNezio et al., 2017; Wu et al., 2021).

Проявления фаз ЭНЮК и их типов отмечаются в аномалиях погоды и климата не только над тропической зоной Тихого океана, но и во внетропических широтах посредством дальнедействующих связей системы океан-атмосфера (Philander, 1990; Voskresenskaya, Polonsky, 1993; McPhaden et al., 2006; Mokhov, Smirnov, 2006; Liu, Alexander, 2007). Такие планетарные отклики атмосферы обычно уникальны для каждого типа явлений ЭН и ЛН (McPhaden et al., 2006; Larkin, Harrison, 2005; Liu, Alexander, 2007; Lubkov et al., 2020; Voskresenskaya et al., 2018). Нередко последствия этих событий приводят к человеческим жертвам и существенным экономическим потерям (Ashok et al., 2007; Yuan et al., 2012). Таким образом, изучение и прогноз аномальных проявлений ЭНЮК и заблаговременное определение их типа является приоритетной задачей.

Прогнозирование ЭНЮК – одна из самых сложных и нерешенных до конца проблем наук о Земле. Важным вопросом является причина фазового переключения от явления ЭН к ЛН, что подтверждает невозможность большинства климатических моделей предсказать этот переход (Barnston et al., 2012).

В настоящее время существует два основных подхода к долгосрочному прогнозированию ЭНЮК: динамический и статистический. Динамический подход осуществляется на основе численного моделирования, включающего в себя, в первую очередь, атмосферную циркуляцию, процессы в океане и взаимодействие этих двух сред (Wang et al., 2017). Статистический подход подразумевает прогнозирование ЭНЮК на основе анализа исторических данных. Статистические модели могут быть линейными и нелинейными. Линейная статистическая модель строится с использованием методов множественной линейной регрессии, канонической корреляции, цепей Маркова и т.д. Второй, нелинейный подход чаще всего основан на методах машинного обучения, таких, как байесовские и нейросетевые (Fang et al., 2022). На сегодняшний день существует по меньшей мере 18 динамических и 8 статистических моделей, представленных на сайте международного исследовательского института климата и общества Колумбийского университета, которые применяются для прогнозирования ЭНЮК. В работах (Tippett et al., 2012; Barnston et al., 2012; Tang et al., 2018) отмечено, что динамические модели справлялись с прогнозом ЭНЮК на порядок лучше, чем статистические.

Для всех моделей долгосрочного прогноза характерна относительно высокая способность прогнозирования для нейтральных условий или уже развивающихся явлений ЭНЮК, однако, вне зависимости от заблаговременности прогноза, способность прогнозирования летом, когда обычно только начинают развиваться явления ЭН и ЛН, резко ухудшаются. Поэтому если заблаговременность прогноза превышает 6 месяцев, то способность прогнозирования заметно уменьшается. Это связано с так называемым «весенним» порогом предсказуемости (ВПП) (Webster, Yang, 1992).

Последние несколько лет стали предлагаться весьма продуктивные решения для прогнозирования ЭНЮК, в основе которых лежат методы машинного обучения (Gavrilov et al., 2019; Nam et al., 2019; Ye et al., 2021; Geng, Wang, 2021; Fang et al., 2022). Зачастую эти решения значительно лучше прогнозируют цикл ЭНЮК в сравнении с динамическими моделями и способны смягчить ВПП. Авторы работы (Gavrilov et al., 2019) привели математическую модель, основанную на разложении на линейные динамические моды. В работе (Nam et al., 2019) для прогноза ЭНЮК использовалась сверточная нейронная сеть (СНС), входными данными в которую были аномалии ТПО и теплосодержания океана в районе 0° - 360° в.д. и 55° ю.ш.- 60° с.ш. За счет использования климатических моделей семейства CMIP5 авторы смогли существенно увеличить обучающую выборку, что улучшило способность прогнозирования модели. Несколько позже, в работах (Ye et al., 2021) и (Geng, Wang, 2021) был использован тот же подход к блоку входных данных, однако моделирование осуществлялось с помощью архитектуры сверточной нейронной сети с длинной цепью элементов краткосрочной памяти (СДКП), обладающей свойствами рекуррентных и сверточных нейросетей.

Несмотря на заметные успехи СНС в прогнозировании ЭНЮК, в обзорной работе (Fang et al., 2022) в качестве недостатка этой архитектуры отмечено, что фиксированный размер входного вектора и непоследовательный

размер входных и выходных наборов данных ограничивают применение СНС в прогнозировании временных рядов. В то же время СДКП не так хорош для прогнозов слабых аномалий Эль-Ниньо.

Одним из главных недостатков современных методов машинного обучения является отсутствие возможности интерпретировать построенную модель с точки зрения физического анализа дальнедействующих связей системы океан-атмосфера. Как известно, к примеру, из (Lin et al., 2019) механизм возникновения и смены ЭН и ЛН до сих пор является предметом дискуссий, и у исследователей нет однозначного мнения о его 2-7 летней квазипериодичности. Поэтому, помимо улучшения прогностических способностей современных моделей, возможность изучения используемых предикторов, которые привели к успешному прогнозу ЭНЮК, является не менее важной задачей.

В наших ранних работах были предприняты попытки прогнозировать события ЭНЮК с использованием модели, основанной на многослойной нейронной сети (МНС). В работе (Лубков и др., 2017а) моделировался индекс Южного колебания (ИЮК) с заблаговременностью прогноза, не превышающей 5 месяцев. Тогда в качестве входных векторов модели использовались широко известные индексы дальнедействующих связей системы океан-атмосфера, описанные в работе (Barnston, Livezey, 1987), и был проведен анализ наиболее важных для модели индексов. Несколько позже в работах (Lubkov et al., 2019; Lubkov et al., 2020) нами была предпринята успешная попытка прогноза событий ЭНЮК с использованием аномалий ТПО в районе Nino 3.4. Заблаговременность модели МНС тогда составила 9 месяцев. В качестве входных индексов использовались только атмосферные предикторы, расположенные в Северном и Южном полушариях и экваториальных широтах. Несмотря на это, способность прогнозирования превосходила современные динамические модели и была сопоставима на тот момент с одной из последних успешных моделей машинного обучения, предложенной в (Gavrilov et al., 2019).

В текущей работе мы существенно переработали старый подход к моделированию ЭНЮК с использованием МНС и предложили новый подход. В разделе 2 детально описан алгоритм предложенной модели. В разделе 3 обсудим воспроизводимость событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья моделью с учетом их пространственных типов и сравним способность прогнозирования с динамическими моделями. В завершение, будет рассмотрен полученный в ноябре 2022 года прогноз предстоящего в 2023 году события Эль-Ниньо.

Данные и методы

Для наблюдения за циклом ЭНЮК традиционно используют атмосферный индекс Южного колебания, рассчитываемый как разница приземного давления между о. Таити и портом Дарвин (Австралия) (Walker, 1924), и океанические индексы, представляющие собой среднюю аномалию ТПО в регионах Nino1+2 (0-10°ю.ш., 90°з.д.-80°з.д.), Nino3 (5°с.ш.-5°ю.ш., 150°з.д.-90°з.д.), Nino3.4 (5°с.ш.-5°ю.ш. и 170°з.д.-120°з.д.) и Нино4 (5°с.ш.-5°ю.ш.,

160°в.д.-150°з.д.). Обычно для идентификации начала событий ЭН и ЛН используют океанические индексы (Petrosyants, Gushchina, 2002; Yeh et al., 2009; Webb, Magi, 2022). Океанических индексов вполне достаточно, чтобы идентифицировать и классифицировать экстремальную фазу ЭНЮК. Следовательно, в этой работе нами будет предложена модель для прогнозирования индексов Nino3, Nino3.4 и Nino4.

Используемые массивы данных

Для решения поставленной задачи необходим массив данных, который будет удовлетворять трем основным условиям: достаточная длина, однородность и оперативное обновление актуальных данных. Поэтому массивы данных, охватывающие только 40-летний временной период спутниковых наблюдений (к примеру, NCEP/DOE, MERRA-2), а также массивы с высоким пространственно-временным разрешением, требующие некоторого времени для обновления актуальных данных (к примеру, ERA5), не подходят для поставленной задачи. В то же время массивы, берущие свое начало с середины XIX века включают в себя неоднородные ряды данных, особенно в XIX веке и первой половине XX (к примеру, 20CR).

Для расчета атмосферных предикторов будем использовать среднемесячный реанализ NCEP/NCAR (Kistler et al., 2001). Данные этого реанализа доступны с 1948 года, время обновления составляет 3 дня, пространственное разрешение $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$.

В работе (Марчукова и др., 2020), посвященной анализу качества воспроизведения явлений ЭН и ЛН, по данным нескольких реконструкций ТПО, отмечено преимущество массива COBESST перед другими. Этот массив данных будет использоваться для расчета индексов Nino и набора предикторов модели. Массив COBESST (Hirahara et al., 2014) включает среднемесячные данные с 1891 года, время обновления составляет 10 суток, пространственное разрешение $1^{\circ} \times 1^{\circ}$. В работе будет использован промежуток данных массива COBESST с 1940 года.

Работоспособность предложенной модели сравнивалась с динамическими моделями, входящими в Североамериканский мультимодельный ансамбль (North American Multi-Model Ensemble или NMME) (Kirtman et al., 2014). Для сравнения были использованы модели NMME, которые включали ретроспективный период 2007-2018: GFDL-SPEAR, GEM-NEMO, CanSIPsv2, CanCM4i, CanSIPS-IC3. Модель NASA-GEOSS2S использовала доступный ретроспективный период 2007-2016.

Разложение на высокочастотную и низкочастотную составляющие

В наших предыдущих исследованиях (Lubkov et al., 2016; 2019; 2020) отмечено, что количество входных индексов ограничено вычислительными возможностями: для оптимальной работы модели рекомендовано использовать не более 25. При этом сложность вычислений увеличивается по закону 2^x , где x – это количество входных индексов. Следовательно, их уменьшение

приведет к уменьшению времени расчетов. Разложение исходного ряда на несколько статистически несвязанных компонент и их последующее отдельное моделирование предполагает использование нескольких наборов индексов, подаваемых для моделирования каждой компоненты. Такой подход позволит значительно увеличить количество используемых индексов и, следовательно, улучшить качество моделирования.

Из (Enfield, Mestas-Nunez, 1999) известно, что океанические параметры имеют несколько мод долгопериодной изменчивости, среди которых основными считаются АМО (Knight et al., 2006; Schlesinger, Ramankutty, 1994) с типичным периодом 60-70 лет, ТДО (Mantua et al., 1997; Zhang et al., 1997) с квази-двадцатилетним временным масштабом и межгодовые колебания САК, ЭНЮК и др. (Voskresenskaya, Polonsky, 1993; Trenberth, Caron, 2000) с 2-7-летним периодом чередования экстремальных фаз. Это основные режимы глобальной климатической системы, присущие как океану, так и атмосфере. При этом в атмосферных полях выделяется более десятка режимов с временным масштабом от нескольких месяцев до нескольких лет (Barnston, Livezey, 1987; Wallace, Gutzler, 1981). Стоит также отметить, что в энергетических спектрах ТПО в районах индексов Nino значимые пики обычно отмечаются в диапазоне от 2 до 7 лет (к примеру, (Torrence, Compo, 1998; Voskresenskaya, Polonsky, 1993).

Обычно под декомпозицией подразумевается разложение ряда на несколько компонент, основными из которых являются тренд, сезонная изменчивость, периодическая изменчивость и некоторая неопределенная компонента, чаще называемая «случайной». В нашем исследовании моделирование производится отдельно для каждого месяца, что исключает наличие сезонности. С учетом типичных периодов основных климатических режимов атмосферы и океана, а также с учетом энергетических спектров ТПО в экваториальной зоне Тихого океана мы предлагаем разложить моделируемые индексы Nino на две компоненты: низкочастотную (от 9 лет) и высокочастотную (до 9 лет). При таком разделении высокочастотная компонента будет включать в себя все значимые пики энергетического спектра ТПО экваториальной зоны Тихого океана, которые являются основным источником неопределенности. В низкочастотную компоненту войдут трендовая составляющая и 60-, 20- и 10-летняя изменчивости, свойственные для глобальной климатической системы (Enfield, Mestas-Nunez, 1999). Низкочастотная компонента в этом исследовании имеет вспомогательный характер, а для ее моделирования будет применяться МЛР.

Разложение проводилось с использованием 9-летнего среднего скользящего фильтра. Сглаженный фильтром ряд принимался за низкочастотную компоненту, а ряд разности исходных и сглаженных значений – за высокочастотную. Низкочастотная и высокочастотная компоненты были приведены к климатическим аномалиям (как разница между рядом ТПО и некоторым средним многолетним значением) и нормированы на среднеквадратическое отклонение (СКО), где СКО и среднее многолетние рассчитывались за период 1981-2010. Эти два новых ряда моделировались в текущей работе независимо друг

от друга, а после моделирования выполнялось их сложение. На схеме предложенной модели (рис. 1) этот этап отмечен первым.

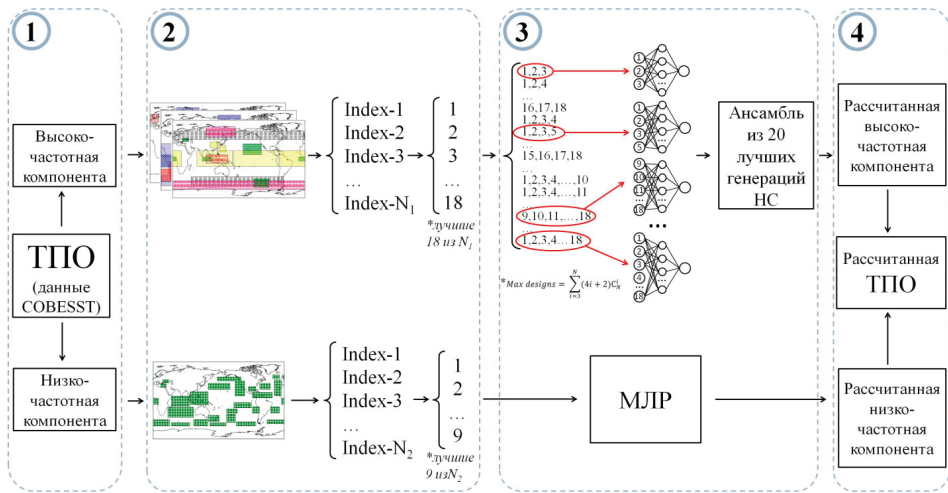


Рисунок 1. Схема предлагаемой модели: 1) декомпозиция моделируемого ряда; 2) предварительная обработка данных 3) моделирование; 4) результаты моделирования и проверка

Figure 1. Scheme of the proposed model: 1) decomposition of the simulated series; 2) data preprocessing; 3) simulation; 4) model results and verification

Предикторы модели

Среди большого количества индексов, используемых для моделирования, условно можно выделить индексы известных климатических сигналов и дополнительно рассчитанные в работе индексы.

В работе (Barnston, Livezey, 1987) разложением на ЭОФ выделено и описано 13 сезонных или постоянно действующих атмосферных сигналов. Традиционно индексы этих сигналов вычисляются как взвешенная разность в двух, трех и более центрах действия атмосферы, по данным о геопотенциальной высоте на уровне 500 мб. В нашем исследовании эти индексы были пересчитаны с использованием реанализа NCEP/NCAR. Области, в которых вычислялись индексы, обозначены на рис. 2а. Среди известных климатических сигналов также использовались океанические, такие, как атлантическая мода, подобная ЭНЮК (Voskresenskaya, Polonsky, 1993; Vallès-Casanova et al., 2020), индоокеанский диполь (Saji et al., 1999) и тихоокеанская декадная изменчивость (Maslova et al., 2017), имеющие глобальные климатические проявления (Polonsky, Basharin, 2017; Vallès-Casanova et al., 2020; Maslova et al., 2017). Области, в которых рассчитывались индексы этих климатических сигналов отображены на рис. 2в и рис. 2д.

Дополнительно в работе были рассчитаны атмосферные и океанические индексы Южного полушария и экваториальной области по следующему алгоритму.

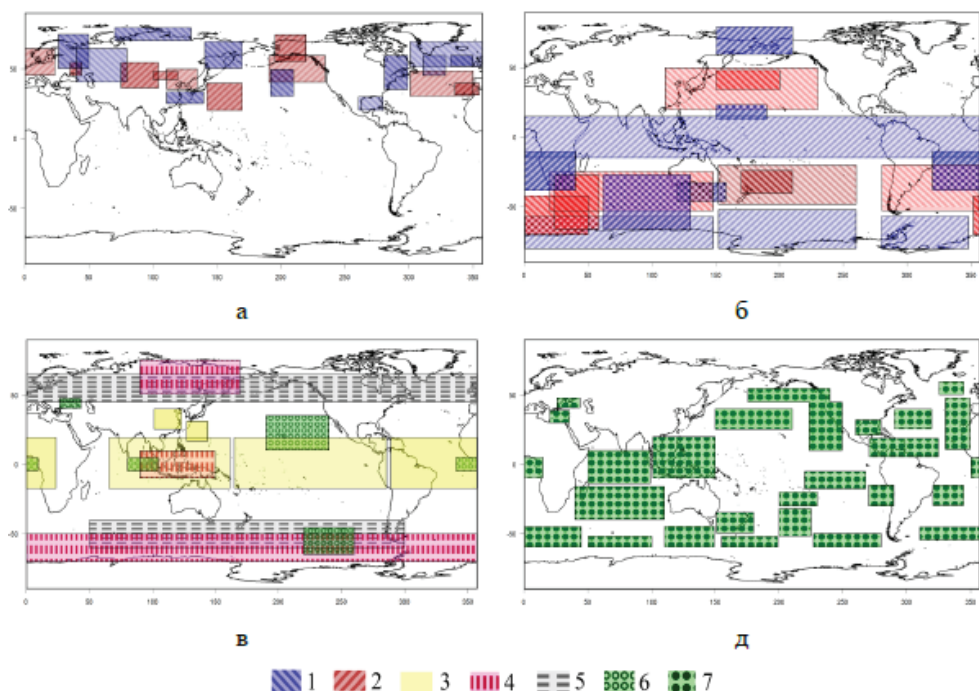


Рисунок 2. Области, используемые для расчета атмосферных и океанических индексов

Области геопотенциальной высоты на изобарической поверхности 500 мб отмечены как 1 и 2; области геопотенциальной высоты на изобарической поверхности 1000 мб отмечены как 3; области меридиональной и зональной составляющих вектора ветра на изобарической поверхности 500 мб отмечены как 4 и 5, соответственно; области ТПО отмечены как 6; области ТПО, рассчитанной с применением 9-летнего среднего скользящего сглаживания, отмечены как 7

Figure 2. Areas used to calculate atmospheric and oceanic indices

The areas of geopotential on the 500 mb are labeled 1 and 2; the areas of geopotential on the 1000 mb are labeled 3; the areas of the meridional and zonal wind components on the 500 mb are labeled 4 and 5, respectively; SST areas are labeled 6; SST areas calculated using 9-year moving average smoothing are labeled 7

Между индексами Nino3, Nino4 и Nino3.4 и гидрометеорологическими полями (ТПО, геопотенциальная высота на изобарическом уровне 500мб и 1000мб, компоненты ветра на уровне 500мб) в каждой узловой точке и с временным сдвигом от 1 месяца до двух лет для высокочастотной составляющей и до 10 лет для низкочастотной были рассчитаны коэффициенты корреляции. Сравнительный анализ индексов Nino и глобальных полей привел к обобщению некоторых областей (рис. 2б,в,г), в которых чаще наблюдались значимые коэффициенты корреляции (при длине ряда, равной 70, и $\alpha = 0.01$ значимый коэффициент корреляции $r = 0.195$). В пределах этих областей выполнялось осреднение. Далее рассчитывались индексы. В случае нескольких связанных областей в зависимости от их количества индекс рассчитывался как взвешенная разность по формуле (1):

$$\begin{cases} X = H_1 - H_2 \\ X = H_1 - 2H_2 + H_3 \\ X = H_1 - H_2 + H_3 - H_4 \end{cases}, \quad (1)$$

где H – осредненное значение геопотенциальной высоты в некоторой области, X – взвешенная разность нескольких областей. Полученное значение пересчитывалось по формуле (2):

$$Index_{i,m} = \frac{X_{i,m} - \overline{X_m}}{\sigma_m}, \quad (2)$$

где X и σ – среднее и стандартное отклонение за период 1981-2010 гг., рассчитанные для каждого месяца отдельно, i и m – год и месяц. В случае, когда область не связана с ближайшими областями, индекс рассчитывался только по формуле (2).

Для моделирования низкочастотной составляющей в качестве входных данных использовались только поля ТПО, сглаженные 9-летним фильтром для каждого месяца по отдельности. Выделенные области ТПО, в которых были рассчитаны океанические индексы, представлены на рис. 2г.

В результате было выявлено более 100 регионов, на основе которых было выбрано 58 индексов: 34 для моделирования высокочастотной и 24 для моделирования низкочастотной составляющих.

Последним шагом в выборе предикторов модели была оценка статистической связи выбранных 58 индексов с индексами Nino. Статистическая связь оценивалась с использованием коэффициента корреляции с временным сдвигом от одного месяца до двух лет опережения для высокочастотной составляющей и от одного месяца до десяти лет – для низкочастотной для каждого месяца отдельно. Корреляция считалась за период 1950-2006. Для каждого месяца и каждого индекса Nino в отдельности на основе коэффициента корреляции осуществлялось ранжирование индексов с учетом временного сдвига. Поскольку увеличение числа входных параметров существенно влияет на скорость вычисления, для моделирования высокочастотной и низкочастотной составляющих было использовано 18 и 10 входных индексов соответственно.

Моделирование

Высокочастотная составляющая

Моделирование (рис. 1, третий этап) высокочастотной составляющей индексов Nino осуществлялось с помощью МНС, представленной многослойным персептроном с одним скрытым слоем (Haykin, 1994). Выходной слой представлен лишь одним нейроном. Функция активации нейронов МНС – сигмоидальная биполярная $f(x) = \tanh(\beta x)$ (Осовский, 2002; Haykin, 1994).

Моделирование каждого месяца проводилось независимо друг от друга. Среднемесячные ряды значений моделируемого параметра и использованных входных индексов были разделены на обучающую, тестирующую и контроль-

ную выборки. Длина обучающей выборки составила 38 лет за период 1950-1987 гг. Тестовая выборка равна 19 годам за период 1988-2006 гг. В качестве контрольной выборки рассматривался 14-летний период за 2007-2022 гг.

Обучение модели проводилось на основе алгоритма обратного распространения ошибки (Haykin, 1994) с некоторыми поправками. Обычно максимум обучения определяется целевой функцией, рассчитываемой на каждом шаге обучающей выборки, и формулируется, как правило, в виде квадратичной суммы разностей между фактическими и ожидаемыми значениями выходного сигнала (Осовский, 2002; Haykin, 1994). Если достижение модельных расчетов и заведомо известных значений с некоторой требуемой точностью невозможно, максимум обучения определяется как глобальный минимум целевой функции (Осовский, 2002). В поставленной задаче установить требуемую точность модельных расчетов невозможно ввиду недостаточной изученности моделируемых параметров. При этом обучающая выборка состоит всего из 38 значений, что усложняет определение максимума обучения классическим методом. В этой связи для определения максимума обучения применим метод, описанный в работе (Lubkov et al., 2016). Суть обучения МНС этим методом заключается в следующем. Корректировка весов нейронов МНС осуществляется с помощью классической целевой функции, однако обучающая выборка повторяется многократно (то есть используются ее итерации), при этом значения весов утончаются с каждой итерацией. На каждой итерации рассчитываются коэффициенты корреляции с обучающей ($r_{\text{обуч}}$) и тестовой ($r_{\text{тест}}$) выборками. За максимум обучения принимается итерация, на которой наблюдался глобальный максимум $r_{\text{обуч}}$. При этом неравенство $|r_{\text{тест}} - r_{\text{обуч}}| < 0.15$ должно быть выполнено. В случае, когда условие не выполняется, за максимум обучения принимается ближайшая итерация, для которой неравенство действительно, то есть итерация, которая находится в некоторой близости от глобального максимума обучения. Однако недостаток этого метода состоит в необходимости контрольной проверки моделируемых результатов. Это связано с тем, что в процессе поиска максимума обучения МНС используется тестирующая выборка и, следовательно, возникает необходимость использовать независимую (контрольную) выборку для объективной оценки возможностей модели.

Ранее в работе (Lubkov et al., 2016) было отмечено, что поведение МНС не всегда может быть предсказуемо. На основе всех отобранных на предыдущем этапе предикторов модель демонстрировала неудовлетворительный результат. Это могло быть связано с использованием индексов, не имеющих физической связи с моделируемым параметром и/или с тем, что входные индексы могли иметь тесную статистическую связь между собой. Поэтому моделирование проводилось с перебором всех возможных комбинаций предикторов на входе, выбранных на предварительном этапе. Количество нейронов скрытого слоя также изменялось от 3 до $4i+2$ (где i – количество предикторов в текущей выборке). Таким образом, общее число возможных конструкций МНС, имеющих уникальный набор предикторов и различное число нейронов скрытого слоя, можно рассчитать как:

$$Max\ designs = \sum_{i=3}^N (4i + 2) C_N^i, \quad (3)$$

где N – общее количество входных предикторов, i – текущее количество предикторов ($i = 1, 2, \dots, N$). Если учесть, что для высокочастотной составляющей общее количество входных предикторов мы ограничили до 18, то количество уникальных конструкций МНС будет составлять порядка 10^7 .

Для каждой уникальной конструкции МНС проводилось обучение. Данные о конструкциях МНС в момент максимума обучения (номера используемых предикторов, количество нейронов скрытого слоя, итерация обучения, корреляционные оценки на тестовой и обучающей выборке) заносились в лог-файл. Далее производилось ранжирование по коэффициенту корреляции на тестовой выборке. По результатам ранжирования отбирались 20 лучших конструкций МНС, которые объединялись в ансамбль путем обычного среднего арифметического.

Низкочастотная составляющая

Моделирование низкочастотной составляющей производилось с использованием простой модели множественной линейной регрессии (МЛР). МЛР имеет стандартный вид $Y' = a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + \dots + a_n \cdot X_n$, где X – выбранные океанические предикторы, сглаженные 9-летним средним скользящим фильтром, a – коэффициенты. Смысл МЛР заключается в подборе оптимальных коэффициентов a , для которого использовалась минимизация с помощью суммы квадратов разностей между модельным расчетом и фактическим значением. Для МЛР применялись 10 предикторов, отобранных на этапе сортировки входных в модель индексов. С применением пошагового алгоритма, предложенного в (Venables, Ripley, 2002), удалось оптимизировать модель МЛР и выделить те предикторы, на основе которых модель МЛР наиболее успешна. Функциональная зависимость предикторов и низкочастотной компоненты индексов Nino была найдена для каждого месяца в отдельности. Все используемые предикторы выбраны с учетом заблаговременности, равной 24 месяцам.

Критерии оценки модели

На заключительном этапе (рис. 1) смоделированные высокочастотная и низкочастотная составляющие приводились обратно к значениям температуры и складывались. Поскольку высокочастотная составляющая представляет собой среднее из 20 прогностических результатов, СКО модельной ТПО в области индексов Nino приводилось к СКО наблюдаемых значений ТПО.

Качество ансамбля оценивалось в сравнении с контрольной выборкой (2007-2022). Для такой оценки использовались следующие инструменты.

1. Корреляция Пирсона:

$$r = \frac{\text{cov}(x_i, y_i)}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (4)$$

где σ_x и σ_y – среднеквадратические отклонения выборок x и y , которые представляют собой результат моделирования и наблюдаемые значения.

2. Среднеквадратическое отклонение модельных данных от действительных (Root-Mean-Square-Error или RMSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - y_i)^2}{n}}, \quad (5)$$

где n – длина ряда контрольной выборки, x_i – модель, y_i – наблюдаемая величина, $\bar{y}$ – среднее наблюдаемого ряда, i – год контрольной выборки.

Определение событий ЭНЮК и типизация

Вокруг вопроса выбора подходящего критерия для выделения событий Эль-Ниньо до сих пор ведутся дискуссии (Webb, Magi, 2022). Зачастую для определения событий ЭНЮК используют скользящее среднее за три месяца индекса Nino3.4. Этот индекс представляет собой аномалии ТПО в районе Nino3.4. Выбор района Nino3.4 обусловлен высокими корреляционными связями между аномалиями ТПО в этом регионе с атмосферным ИЮК (Barnston et al., 1997). Однако существуют и другие точки зрения по выбору региона для выделения фаз ЭНЮК. Например, в работе (Trenberth, Stepaniak, 2001) для определения событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья использовался Nino3.4 совместно с введенным авторами Trans-Niño Index (TNI). TNI – это разница между нормированными значениями аномалий ТПО в районе Nino4 и Nino1+2. В статье (Petrosyants, Gushchina, 2002) было предложено выбирать область Nino3 для выделения ЭН и ЛН, так как именно этот район наилучшим образом характеризует крупномасштабные события ЭНЮК. В работах (Serykh, Sonechkin, 2019; Serykh, Sonechkin, 2021) используется так называемый Extended Oceanic Niño index, представляющий собой осредненные аномалии ТПО в районе с координатами 5°с.ш.-5°ю.ш. 170°-80°з.д., включающий в себя экваториальную зону Тихого океана и прилегающую к Панамскому перешейку область. Выбор этого района авторы обосновывают наличием в нём гораздо больших судовых наблюдений, чем в центральных регионах Тихого океана по отдельности, таких, как Nino3.4, Nino3 и Nino4. В классической работе (Yeh et al., 2009) события ЭН выделялись по индексам Nino3 и Nino4 в зимний сезон (декабрь, январь, февраль), в одной из областей отмечалась аномалия более 0.5°C.

В настоящем исследовании мы будем моделировать аномалии ТПО в регионах Nino3.4, Nino3 и Nino4, а затем для каждого рассчитаем трехмесячное среднее скользящее. В разделе «Способность прогнозирования и сравнение с динамическими моделями» для оценки состояния ЭНЮК из-за более высокой способности прогнозирования будем использовать только индексы Nino3 и Nino4. По аналогии с методикой, предложенной в (Qian et al., 2011; Voskresenskaya et al., 2017), будем идентифицировать ЭН и ЛН, если аномалия ТПО в районах Nino3 и Nino4 превышает 0.5°C и продолжается 5 месяцев последовательно:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ЭН,} \quad \frac{(\text{Nino3} + \text{Nino4})}{2} > 0.5^{\circ}\text{C} \cup t \geq 5 \text{ мес.} \\ \text{ЛН,} \quad \frac{(\text{Nino3} + \text{Nino4})}{2} < -0.5^{\circ}\text{C} \cup t \geq 5 \text{ мес.} \\ \text{нейтральный ЭНЮК,} \quad -0.5 < \frac{(\text{Nino3} + \text{Nino4})}{2} < 0.5^{\circ}\text{C} \end{array} \right., \quad (6)$$

Для определения типа будем использовать соотношение, предложенное (Yeh et al., 2009):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Восточный,} \quad \text{Nino3}_{\text{зима}} > \text{Nino4}_{\text{зима}} \\ \text{Центральный,} \quad \text{Nino3}_{\text{зима}} < \text{Nino4}_{\text{зима}} \end{array} \right., \quad (7)$$

Результаты и обсуждение

Способность прогнозирования и сравнение с динамическими моделями

В разделе дана оценка сезонной и всесезонной способности прогнозирования модели NNM-ENSOv1 и проведено сравнение с динамическими моделями. Для такой оценки все индексы Nino динамических моделей и NNM-ENSOv1 представлены 3-месячными скользящими средними. Для совместного сравнения был выбран общий временной период 2007-2017 гг.

Для оценки сезонной способности прогнозирования динамических моделей проекта NMME рассматривался ансамбль из 6 моделей. В качестве критерия оценки сезонной способности прогнозирования применялся только корреляционный анализ. Основной особенностью, которой обладают динамические модели – это хорошо выраженное влияние ВПП (рис. 3). Для индекса Nino3.4 в динамических моделях ВПП характерен в сезон май-июнь-июль, начиная с 6 месяцев заблаговременности (рис. 3б). Для индекса Nino4 он смещен в летние месяцы (июнь-июль-август) и его влияние отмечается, начиная с 7 месяцев заблаговременности (рис. 3д). Для индекса Nino3 ВПП характерен в сезон апрель-май-июнь, начиная с 5 месяцев заблаговременности (рис. 3з). За пределами ВПП все прогнозы незначимы.

На диаграммах, изображенных на рис. 3в,е,и, приведено сравнение способностей прогнозирования NNM-ENSOv1 и ансамбля динамических моделей, где Δr представляет собой разницу корреляций. Для всех изображений характерно улучшенное качество моделирования NNM-ENSOv1 за пределами ВПП, при этом коэффициенты корреляции в остальные сезоны ниже или такие же. Индекс Nino3.4 моделируется NNM-ENSOv1 хуже остальных индексов Nino (рис. 3а). Для этого индекса ВПП хотя и значительно смягчен, но ощущается раньше с заблаговременностью 3 месяца и смещен к сезону апрель-май-июнь. Такая же ситуация наблюдается и для индекса Nino3 (рис.

3г), при этом с заблаговременностью 11 и 12 месяцев модель лучше воспроизводит летние и осенние месяцы. Наилучшим образом модель воспроизводит индекс Nino4 (рис. 3ж). ВПП для этого индекса практически отсутствует: корреляции в летний и осенний сезоны незначительно отличаются от корреляций в зимние и весенние сезоны.

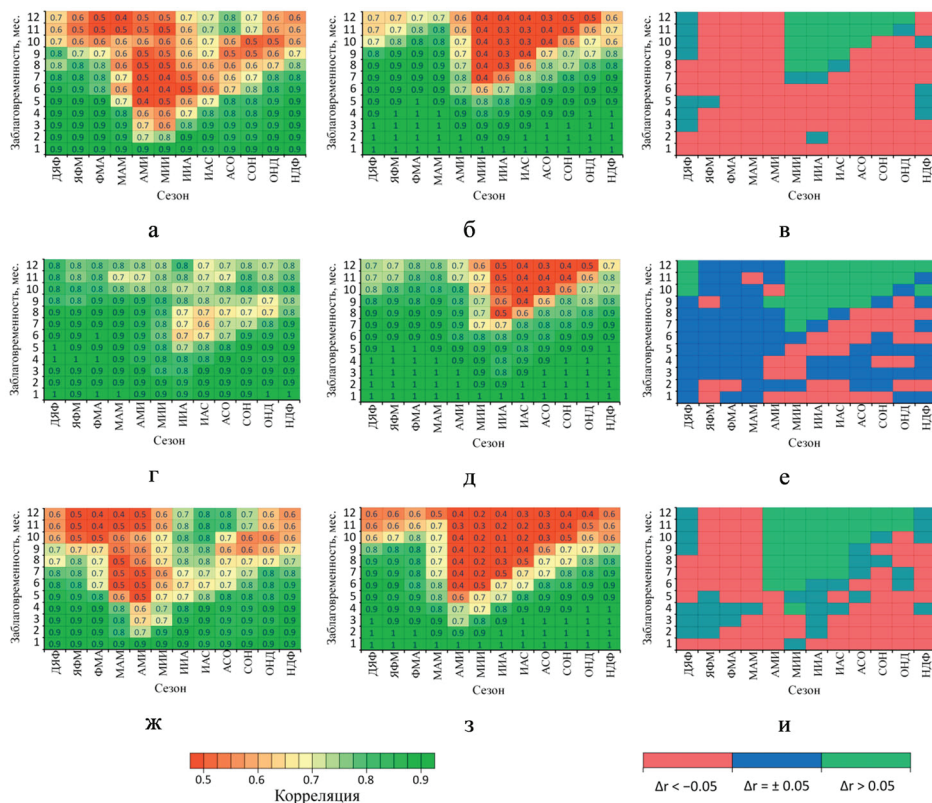


Рисунок 3. Корреляционные оценки модели предложенной модели NNM-ENSOv1 (а,г,ж) и ансамбля динамических моделей NMME (б,д,з) в зависимости от заблаговременности и сезона и их совместное сравнение $\Delta r = r_{NNM-ENSOv1} - r_{dynamic}$ (в,е,и) для индексов Nino3.4 (а,б,в), Nino4 (г,д,е) и Nino3 (ж,з,и) за контрольный период 2007-2017

Figure 3. Seasonal correlation forecast skill of the NNM-ENSOv1 (a,d,g) and an ensemble of dynamic models of the NMME project (b,e,h) depending on the lead times and season and their comparison $\Delta r = r_{NNM-ENSOv1} - r_{NMME}$ (c,f,i) for Nino3.4 (a,b,c), Nino4 (d,e,f) and Nino3 (g,h,i) indices for the control period 2007-2017

На рис. 4 приведены результаты сравнения всесезонной способности прогнозирования (сравнивались коэффициенты корреляции и RMSE) для индексов Nino3.4, Nino3 и Nino4, сглаженных трехмесячным средним скользящим за период 2007-2017. Способность прогнозирования индекса Nino3.4 для большинства динамических моделей проекта NMME превосходит предложенную в работе модель с заблаговременностью до 6 месяцев. При этом с заблаговременностью 8-11 месяцев способность прогнозирования модели NNM-ENSOv1 превосходит способность динамических. Коэффициент корреляции

ляции (и RMSE) в случае прогноза с заблаговременностью 11 месяцев с использованием модели NNM-ENSOv1 равен 0.64 (0.72°C) и с использованием динамических моделей – 0.40-0.56 (0.77 - 0.90°C). Аналогичный результат был получен и для индекса Nino3. При этом с заблаговременностью 8-11 месяцев предложенная модель значительно лучше моделирует индекс Nino3. Для этого индекса коэффициент корреляции (и RMSE) в случае прогноза с 11-месячной заблаговременностью моделью NNM-ENSOv1 равен 0.65 (0.69°C) и динамическими моделями – 0.29-0.46 (0.80 - 0.91°C). Моделирование индекса Nino4 показало, что предложенная модель превосходит динамические модели в случае сравнения корреляций с заблаговременностью от 6 и больше месяцев, а в случае сравнения по RMSE – с любой заблаговременностью прогноза. Коэффициент корреляции (и RMSE) модели NNM-ENSOv1 для прогноза заблаговременностью 11 месяцев равен 0.78 (0.46°C). При этом для динамических моделей эти значения равны 0.46-0.61 (0.57 - 0.74°C). Из всех динамических моделей модель NASA-GEOSS2S наиболее успешно описывает динамику состояния ЭНЮК, однако ее заблаговременность прогноза индексов Nino ограничена 8 месяцами, а RMSE заметно выше остальных динамических моделей. По корреляционным оценкам модель NASA-GEOSS2S превосходит предложенную нами в прогнозах с заблаговременностью от 1 до 7 месяцев.

Успехи предложенной модели NNM-ENSOv1 с заблаговременностью прогноза более 7 месяцев являются следствием смягчения ВПП. При этом модель систематически показывает более низкую способность прогнозирования для прогнозов с небольшой заблаговременностью, что особенно выражено для индекса Nino3.4.

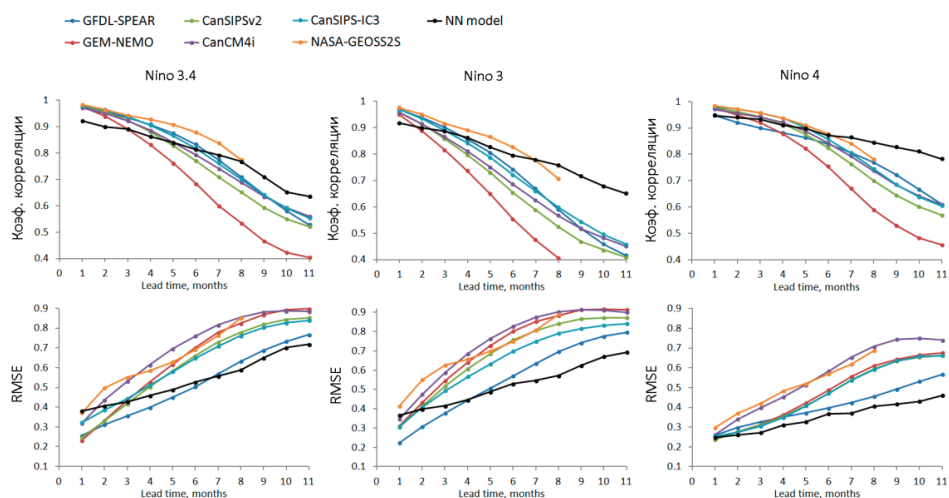


Рисунок 4. Всесезонная способность прогнозирования (оценка на основе коэффициентов корреляции и RMSE) трехмесячных скользящих средних индексов Nino3.4, Nino3 и Nino4 для модели NNM-ENSOv1 и ансамбля моделей проекта NMME за период 2007-2017

Figure 4. The all-season forecast skill (correlation and RMSE) of the three month moving averaged Nino3.4, Nino3 and Nino4 indices from 2007 to 2017 for NNM-ENSOv1 and NMME ensemble

Воспроизводимость явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья

Рис. 5 демонстрирует воспроизведение состояния ЭНЮК с учетом типизации Эль-Ниньо и Ла-Нинья в период 2007-2022. Ячейки закрашивались в цвета, соответствующие экстремальным событиям ЭНЮК, если выполнялось условие превышения порога $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ в соответствии с формулой 6. Типизация производилась с учетом условия из формулы 7 для каждого сезона. На рис. 5 видно, что 4 из 5 явлений ЭН определены верно, включая их тип. Воспроизведение событий ЭН практически не зависит от заблаговременности прогноза. События ЛН воспроизводятся заметно хуже. С увеличением заблаговременности прогнозируемый месяц начала ЛН смещается с запаздыванием. Таким образом, большинство события ЛН воспроизводятся только с небольшой заблаговременностью. Ла-Нинья 2007, 2017 и 2021 являются исключением и хорошо воспроизводятся с заблаговременностью, равной 5 месяцам для ЛН-2007 и 11 месяцев для ЛН-2017 и ЛН-2021.

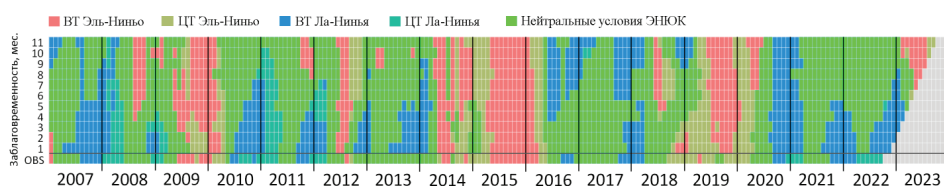


Рисунок 5. Состояние ЭНЮК с учетом типов Эль-Ниньо и Ла-Нинья, по данным COBESST и модельным расчетам, с заблаговременностью до 11 месяцев

Figure 5. ENSO events state taking into account the El Niño and La Niña types according to COBESST datasets and model forecasting with lead times of up to 11 months

В табл. 1, полученной на основе рис. 5, приведен процент совпадений прогноза с данными наблюдений. В целом состояние ЭНЮК без учетов типов ЭН и ЛН определяется с вероятностью 60-80%. Если рассматривать только события ЭН и ЛН, вероятность определения варьируется от 82-84% с заблаговременностью прогноза 1-3 месяц до 53-58% с заблаговременностью 8-11 месяцев. Отметим, что вероятность верного определения событий Эль-Ниньо практически не зависит от заблаговременности прогноза и варьируется от 76 до 83%, и если учитывать типизацию, то 65-54%. В то же время события ЛН сильно зависят от заблаговременности прогноза. Вероятность верного определения явления ЛН варьируется от 85 до 31% и с учетом типизации – всего 51-24%. Несмотря на низкий процент определения типов ЭН и ЛН, все события ЭН и 2 события ЛН с заблаговременностью 11 месяцев в сезон декабрь-январь-февраль были определены верно.

Далее были проанализированы ошибочные случаи событий ЭН и ЛН. Ошибочные случаи ЛН наблюдаются реже с заблаговременностью до 1-4 месяца (5-9%). С заблаговременностью 7-11 месяцев ошибочные ЛН отмечаются с вероятностью 20-23%. Ошибочные случаи ЭН варьируются от 8 до 28% с минимумом для заблаговременности 6 месяцев. С заблаговременностью 8-11 месяцев вероятность ошибочного прогноза ЭН составляет 11-13%.

Таблица 1. Процент совпадений прогноза с данными наблюдений
за контрольный период 2007-2022

Table 1. The probability of ENSO forecast coincidences with observation
in 2007-2022

Заблаговременность	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Общие совпадения, % (с учетом типа)	76 (59)	79 (61)	80 (65)	71 (58)	70 (57)	67 (57)	65 (55)	59 (51)	62 (52)	59 (49)	58 (49)
Только события ЭН и ЛН (с учетом типа), %	84 (55)	83 (53)	82 (58)	71 (49)	68 (46)	63 (47)	62 (44)	53 (40)	58 (42)	55 (39)	54 (39)
Только ЭН, % (с учетом типа)	83 (59)	81 (56)	85 (65)	81 (56)	81 (54)	85 (65)	83 (59)	78 (57)	81 (57)	80 (54)	76 (54)
Только ЛН, % (с учетом типа)	85 (51)	85 (51)	80 (51)	61 (42)	56 (39)	42 (31)	42 (31)	31 (24)	37 (27)	32 (25)	34 (25)
Ложные ЭН, %	8	7	5	9	15	19	20	21	23	23	23
Ложные ЛН, %	28	20	17	19	12	8	9	11	11	12	13

Рассмотрим более подробно воспроизводимость событий ЭН и ЛН. На рис. 6 приведены графики рассчитанных, по данным COBESST (до октября 2022 года), трехмесячных средних скользящих индексов Nino3.4, Nino3 и Nino4 и результатов их моделирования с заблаговременностью в 3, 6, 9 и 11 месяцев. Для удобства описания далее будем использовать обозначения LT-3, LT-6, LT-9 и LT-11 (LT – lead time или заблаговременность). Линиями обозначены экстремумы событий по одному из индексов Nino, для которых наблюдалась наибольшая по модулю аномалия ТПО. За период 2007-2022 было отмечено всего 13 событий ЭН и ЛН (рис. 6-верхний). С использованием классификации (Yeh et al., 2009) было выделено 2 ВТ Эль-Ниньо (2009, 2015), 3 ЦТ Эль-Ниньо (2014, 2018, 2019), 2 ВТ Ла-Нинья (2017, 2021, 2022) и 5 ЦТ Ла-Нинья (2007, 2008, 2010, 2011, 2020). Тип Ла-Нинья 2022 на момент подготовки статьи еще не был известен, однако на момент подачи статьи в журнал ЛН-2022 определялся как ВТ. В этом разделе будем рассматривать события ЭН и ЛН исключительно как однолетние.

ЦТ Ла-Нинья 2007. Наиболее точно моделирует это событие только LT-3. LT-6 не верно определяет начало, но хорошо воспроизводит экстремальную фазу развития в сезон DJF. LT-3 и LT-6 воспроизводят это событие как ВТ тип. LT-9 и LT-11 это событие практически не воспроизводят.

ЦТ Ла-Нинья 2008. LT-3 хорошо воспроизводит это событие. LT-6 это ЛН воспроизводит только по индексу Nino4. LT-9 и LT-11 не воспроизводят ЛН.

ВТ Эль-Ниньо 2009 воспроизводится по всем приведенным на рис. 6 модельным расчетам. При этом LT-3 занижает значения экстремальной фазы, а LT-6, LT-9 и LT-11 воспроизводят экстремум со смещением в сезон октябрь-ноябрь-декабрь. Также по индексу Nino3.4 начало события определяется неверно и наблюдается в сезон август-сентябрь-октябрь.

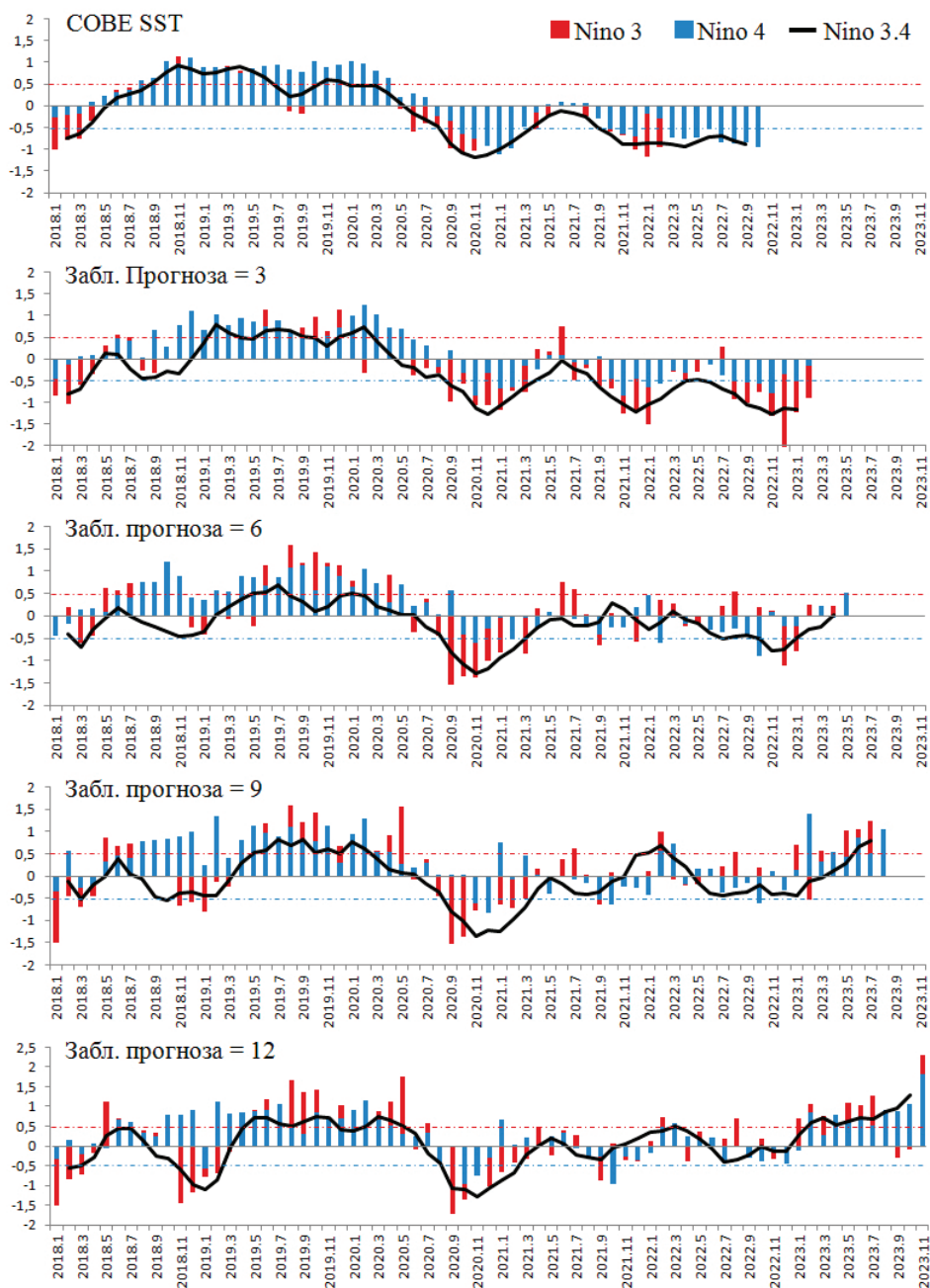


Рисунок 6. Трехмесячное скользящее среднее индексов Nino3.4, Nino3 и Nino4 в период 2007-2023 гг., рассчитанное по данным COBESST (до ноября 2022 года), и результат их моделирования с заблаговременностью 3, 6, 9 и 11 месяцев до февраля, мая, августа и октября 2023 года соответственно

Оранжевой и голубой линиями обозначены экстремумы событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья

Figure 6. The three month moving averaged Nino3.4, Nino3 and Nino4 indices calculated by COBE SST data (until November 2022) from 2007 to 2023 and their forecasts for lead times of the 3, 6, 9 and 11 months (until February, May, August and October 2023) respectively
The orange and blue lines indicate the extremes of El Niño and La Niña events

ЦТ Ла-Нинья 2010. LT-3 хорошо воспроизводит это событие. LT-6 воспроизводит ЛН, но начало отмечается не весной, а осенью. Максимальная фаза смещена в сезон январь-февраль-март. LT-3 и LT-6 воспроизводят это событие как ВТ тип. LT-9 воспроизводит это ЛН с задержкой на 7 месяцев, а интенсивность события ниже наблюдаемой. LT-11 в целом не воспроизводит явление. *ЦТ Ла-Нинья 2011* воспроизводится только LT-3.

ЦТ Эль-Ниньо 2014 воспроизводится всеми модельными расчетами. При этом LT-6, LT-9 и LT-11 существенно завывают экстремум (на $\sim 1^{\circ}\text{C}$).

ВТ Эль-Ниньо 2015 хорошо воспроизводится всеми модельными расчетами. Экстремум совпадает с расчетами LT-6 и LT-9 и несколько занижен для расчета LT-3 и LT-11. После этого Эль-Ниньо наблюдалось два отрицательных экстремума ЭНЮК, первый из которых не был идентифицирован в сезон декабрь-январь-февраль как ЛН. Однако, по модельным данным, он был воспроизведен LT-6, LT-9 и LT-11.

ВТ Ла-Нинья 2017 воспроизводится всеми модельными расчетами, предложенными для анализа на рис. 6. При этом в модельном расчете с заблаговременностью 4 и 5 месяцев событие ЛН не наблюдается (рис. 5). LT-3 занижает значения этого ЛН: индексы чуть превышают порог 0.5°C .

ЦТ Эль-Ниньо 2018 воспроизводится всеми модельными расчетами только по индексу Nino4. Условия ЭНЮК по индексам Nino3 и Nino3.4 воспроизводятся LT-3 и LT-6 как нейтральные, а LT-9 и LT-11 моделируют условия ЛН.

ЦТ Эль-Ниньо 2019 не отмечался по индексу Nino3.4, но по методу идентификации, который был использован в этой работе с учетом индексов Nino3 и Nino 4, событие было. Так же, как и предыдущий ЭН, это событие хорошо воспроизводится по индексу Nino4 для всех рассматриваемых расчетов.

ЦТ Ла-Нинья 2020. Модель NNM-ENSOv1 успешно спрогнозировала месяц начала ЛН и его интенсивность в независимости от заблаговременности, однако во всех случаях тип был идентифицирован как ВТ тип.

ВТ Ла-Нинья 2021 и Ла-Нинья 2022. Эти два года одного двухлетнего Ла-Нинья воспроизводятся только LT-3 и как два отдельных события. Остальные рассматриваемые модельные расчеты показывают нейтральные условия ЭНЮК.

В целом можно отметить, что предложенная модель достаточно хорошо воспроизводит события ЭН. При этом прогнозы с небольшой заблаговременностью более точно определяют сроки начала, но занижают пики максимальной фазы интенсивных событий, а прогнозы с более высокой заблаговременностью менее точно определяют время начала, но более точно пики максимальной фазы интенсивных событий. Все типы ЭН определены верно. События ЛН хорошо воспроизводятся только с небольшой заблаговременностью. С заблаговременностью 11 месяцев время начала и интенсивность только для 2 событий ЛН (2017 и 2021) воспроизводились верно.

Эль-Ниньо 2023

На рис. 7 приведены результаты прогноза индекса Nino3.4, опубликованные во второй половине ноября. По результатам, приведенным на сайте Колумбийского университета – IRI (iri.columbia.edu), обращение 3 декабря

2022), 18 динамических и статистических моделей указывали на нейтральную фазу ЭНЮК и 7 моделей превысили порог 0.5°C , однако в среднем модели показывают нейтральную фазу (рис. 7а). По результатам центра климатических прогнозов США – NOAA (срс.псер.ноаа.gov, обращение 3 декабря 2022), в ноябре только 1 из 6 моделей прогнозирует начало Эль-Ниньо в 2023 году (рис. 7б). Тогда предложенная модель NNM-ENSOv1 предполагала дальнейшую эволюцию ЛН до февраля 2023 г. (рис. 7в), в марте и апреле – нейтральные условия ЭНЮК, а с мая 2023 г. предположительно могло развиваться Эль-Ниньо (Лубков, 2022).

На сегодня известно, что прогноз NNM-ENSOv1 подтвердился (рис. 7в). Условия ЛН сменились на нейтральные в феврале. В марте и апреле ЭНЮК находилось в нейтральной фазе. По последним данным Бюро Метеорологии Австралии (bom.gov.au, обращение 2 сентября 2023), в мае, июне, июле и августе наблюдаются условия, характерные для эволюции ЭН. На 2 сентября 2023 года Всемирная метеорологическая организация предсказывает дальнейшее развитие ЭН в 2023 с вероятностью 99-94%. Опираясь на пространственно-временную классификацию Эль-Ниньо (Лубков и др., 2017b), ЭН-2023 будет весеннего восточного типа, что соответствует ВТ по классификации (Yeh et al., 2009).

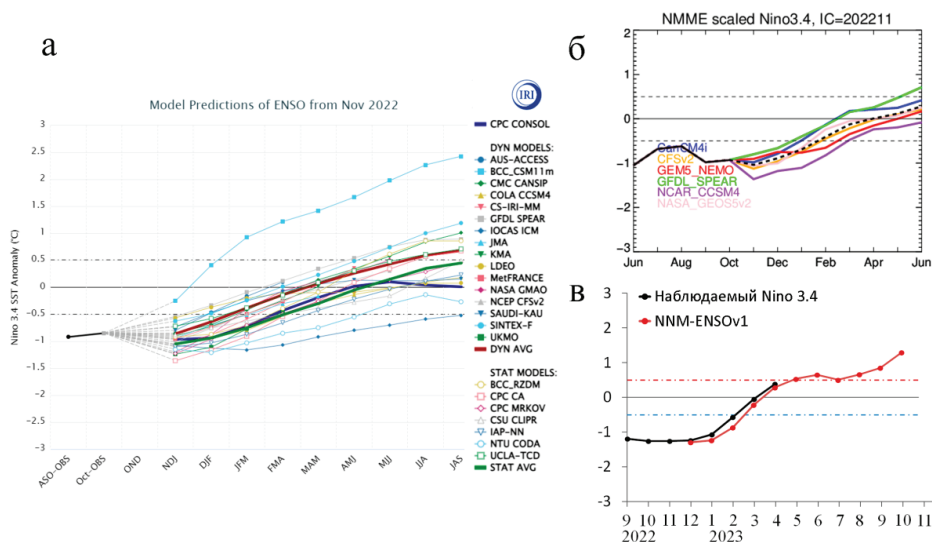


Рисунок 7. Результаты ноябрьского прогноза индекса Nino3.4, сглаженного 3-месячным средним скользящим: а – NOAA, б – IRI, в – модель NNM-ENSOv1

Figure 7. Results of November 2022 forecast of Nino3.4 index, smoothed by a three-month-moving-average: а – NOAA, б – IRI, в – NNM-ENSOv1

Заключение и дискуссия

В работе предложена новая модель прогнозирования ЭНЮК, основанная на комбинации методов МНС и МЛР. Основной особенностью модели является детальный отбор входных в модель предикторов и последующее моделирование с проверкой всевозможных комбинаций входного вектора.

Индексы Nino4 и Nino3 воспроизводятся моделью лучше, чем индекс Nino3.4, что повлияло на особенности идентификации событий ЭНЮК в этой работе, которые определялись с учетом Nino4 и Nino3. Вероятность верного определения условий, характерных для событий Эль-Ниньо, достаточно высока и незначительно меняется в пределах от 76 до 83% при изменении заблаговременности прогноза до одиннадцати месяцев. В то же время вероятность верного определения Ла-Нинья с ростом заблаговременности уменьшается от 85 до 31%.

Ложные случаи условий ЛН без учета времени продолжительности события встречаются с вероятностью 8-28% и случаи ЭН – с вероятностью 8-23%.

В целом предложенная модель достаточно хорошо воспроизводит события ЭН. В сезон декабрь-январь-февраль с заблаговременностью 11 месяцев 4 из 5 событий Эль-Ниньо с учетом их типа были определены верно. При этом модель с небольшой заблаговременностью более точно определяет сроки начала, но занижает амплитуду максимальной фазы интенсивных событий, а модель с более высокой заблаговременностью менее точно определяет время начала, но более точно – амплитуду максимальной фазы интенсивных событий. События ЛН хорошо воспроизводятся с небольшой заблаговременностью. В то же время два последних события ЛН (2017 и 2021) с заблаговременностью 11 месяцев в сезон декабрь-январь-февраль были определены верно.

При прогнозе с заблаговременностью 11 месяцев предложенная модель NNM-ENSOv1 имеет более высокое качество прогнозирования в сравнении с существующими динамическими моделями, входящими в NMME, и сопоставимые возможности с современными статистическими моделями, основанными на принципах машинного обучения. Так, для ряда индекса Nino3.4 после трехмесячного скользящего осреднения (или ONI) модель NNM-ENSOv1 за период 2007-2022 имеет коэффициент корреляции 0.64. Сравнить качество нашей модели можно по следующим оценкам: модель СНС, предложенная в (Ham et al., 2019), – 0.67 (за период 1984-2017), модель СДКП, предложенная в (Geng, Wang, 2021), – 0.60 (1994-2010), модель, основанная на графовой нейронной сети, предложенная в (Cachay et al., 2021), – 0.57 (1984-2017 с заблаговременностью 12 месяцев), модель, основанная на разложении на линейные динамические моды, предложенная в (Gavrilov et al., 2019), – ниже 0.4 (2008-2017), модели нейронных сетей гауссовой плотности и квантильной регрессии, предложенные в (Petersik, Dijkstra, 2020), – 0.40-0.45 (2002-2011 и 2012-2017).

Предложенная модель отличается низкой чувствительностью к ВПП, особенно для индекса Nino4. При этом для прогнозов с заблаговременностью до 6 месяцев модель систематически показывает более низкую способность прогнозирования в сравнении с динамическими моделями проекта NMME, что особенно выражено для индекса Nino3.4. Это может быть связано с неучтенными предикторами, имеющими доказанную физическую связь с интенсификацией экстремальных событий ЭНЮК.

В дальнейших исследованиях предполагается добавить в модель NNM-ENSOv1 в качестве предикторов индексы экваториального пассата, предложен-

ные NOAA, и теплосодержание океана 300-метрового слоя, а также уточнить области для расчета экваториальных индексов давления над Тихим океаном, что, с учетом подхода (Nam et al., 2019), вероятно, улучшит способность классифицировать события ЭНЮК и особенно ЛН. Так, область геопотенциала на поверхности 1000мб над экваториальной зоной следует поделить на западно- и восточно-тихоокеанскую. В работе (Nam et al., 2019) были получены ключевые области, которые внесли наибольший вклад в прогноз ЭНЮК с помощью модели СНС. Несмотря на то, что в нашей работе эти области также учтены частично в полях ТПО и геопотенциала на уровне 500мб, стоит обобщить их и привести к двум-трем индексам, а также учесть компоненты ветра.

В работе приведен прогноз состояния ЭНЮК в 2023 году. В ноябре 2022 года предложенная модель верно указывала на условия восточно-тихоокеанского Эль-Ниньо в 2023 году. Модель NNM-ENSOv1 прогнозировала дальнейшую эволюцию Ла-Нинья до февраля 2023 г., в марте и апреле – нейтральные условия ЭНЮК, а с мая 2023 г. предположительно могло развиваться Эль-Ниньо. На тот момент только 7 из 25 динамических моделей указывали на возможное начало Эль-Ниньо-2023. В действительности, в мае, июне, июле и августе, сентябре наблюдались условия, характерные для начала и эволюции Эль-Ниньо, что подтверждает успешность прогноза NNM-ENSOv1 с заблаговременностью 11 месяцев. По последним данным Всемирной метеорологической организации, дальнейшее развитие Эль-Ниньо в 2023 предполагается с вероятностью 99-94%.

Все прогнозы модели доступны в режиме реального времени по ссылке на сайт проекта: neuroclimate.com.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института природно-технических систем (№ гос. регистрации 121122300072-3).

Список литературы

Лубков, А.С., Воскресенская, Е.Н., Марчукова, О.В. (2017а) Прогнозирование индекса Южного колебания, *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о земле*, № 4(62), с. 370-388, doi: 10.21638/11701/spbu07.2017.404.

Лубков, А.С., Воскресенская, Е.Н., Марчукова, О.В. (2017b) Объективная классификация явлений Эль-Ниньо, *Использование и охрана природных ресурсов в России*, № 1(149), с. 41-44.

Лубков, А.С. (2022) Научный прогноз: Начнется ли Эль-Ниньо в 2023 году? *Системы контроля окружающей среды*, № 4 (50), с. 143-144.

Марчукова, О.В., Лубков, А.С., Воскресенская, Е.Н. (2020) Качество воспроизведения событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья по разным массивам реконструированных данных температуры поверхности океана, *Вестник СПбГУ. Науки о земле*, № 65(1), с. 97-120, doi:10.21638/spbu07.2020.106.

Осовский, С. (2002) *Нейронные сети для обработки информации*, Москва, Финансы и статистика, 344 с.

Петросьянц, М.А., Гущина Д.Ю. (2002) Об определении явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья, *Метеорология и гидрология*, № 8, с. 24-35.

An, S.I., Jin, F.F. (2004) Nonlinearity and asymmetry of ENSO, *J. Clim.*, vol. 17(12), pp. 2399-2412, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)0172.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)0172.0.co;2).

Ashok, K., Behera, S.K., Rao, S.A., Weng, H., Yamagata, T. (2007) El Niño Modoki and its possible teleconnection, *J. Geophys. Res.: Oceans*, vol. 112(C11), available at: <https://doi.org/10.1029/2006JC003798>.

Barnston, A.G., Chelliah, M., Goldenberg, S.B. (1997) Documentation of a highly ENSO-related SST region in the equatorial Pacific: Research note, *Atmosphere-ocean*, vol. 35(3), pp. 367-383, available at: <https://doi.org/10.1080/07055900.1997.9649597>.

Barnston, A.G., Livezey, R.E. (1987) Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns, *Mon. Wea. Rev.*, vol. 115(6), pp. 1083-1126, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<1083:csapol>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1083:csapol>2.0.co;2).

Barnston, A.G., Tippett, M.K., L'Heureux, M.L., Li, S., DeWitt, D.G. (2012) Skill of real-time seasonal ENSO model predictions during 2002-11: Is our capability increasing? *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 93(5), pp. 631-651, available at: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00111.1>.

Cachay, S.R., Erickson, E., Buckner, A.F.C., Pokropek, E., Potosnak, W., Osei, S., Lütjens, B. (2020) Graph Neural Networks for Improved El Niño Forecasting, *arXiv e-prints*, *arXiv-2012*, available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.01598>.

Deser, C., Alexander, M.A., Xie, S.P., Phillips, A.S. (2010) Sea surface temperature variability: Patterns and mechanisms, *Annu. Rev. Mar. Sci.*, vol. 2, pp. 115-143, available at: <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120408-151453>.

DiNezio, P.N., Deser, C., Karspeck, A., Yeager, S., Okumura, Y., Danabasoglu, G., Meehl, G.A. (2017) A 2 year forecast for a 60-80% chance of La Niña in 2017-2018, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 44(22), pp. 11-624, available at: <https://doi.org/10.1002/2017GL074904>.

Enfield, D.B., Mestas-Núñez, A.M. (1999) Multiscale variabilities in global sea surface temperatures and their relationships with tropospheric climate patterns, *J. Clim.*, vol. 12(9), pp. 2719-2733, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2719:mvigss>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2719:mvigss>2.0.co;2).

Fang, W., Sha, Y., Sheng, V.S. (2022) Survey on the Application of Artificial Intelligence in ENSO Forecasting, *Mathematics*, vol. 10(20), p. 3793, available at: <https://doi.org/10.3390/math10203793>.

Gavrilov, A., Seleznev, A., Mukhin, D., Loskutov, E., Feigin, A., Kurths, J. (2019) Linear dynamical modes as new variables for data-driven ENSO forecast,

Clim. Dyn., vol. 52, pp. 2199-2216, available at: <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4255-7>.

Geng, H., Wang, T. (2021) Spatiotemporal model based on deep learning for ENSO forecasts, *Atmosphere*, vol. 12(7), p. 810, available at: <https://doi.org/10.3390/atmos12070810>.

Ham, Y.G., Kim, J.H., Luo, J.J. (2019). Deep learning for multi-year ENSO forecasts, *Nature*, vol. 573(7775), pp. 568-572, available at: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1559-7>.

Haykin, S. (1998) Neural networks: a comprehensive foundation, *Prentice Hall PTR*, available at: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/521706>.

Hirahara, S., Ishii, M., Fukuda, Y. (2014) Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty, *J. Clim.*, vol. 27(1), pp. 57-75, available at: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00837.1>.

Hu, Z.Z., Kumar, A., Xue, Y., Jha, B. (2014) Why were some La Niñas followed by another La Niña? *Clim. Dyn.*, vol. 42, pp. 1029-1042, available at: <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1917-3>.

Kirtman, B.P., Min, D., Infanti, J.M., Kinter, J.L., Paolino, D.A., Zhang, Q. et al. (2014) The North American multimodel ensemble: phase-1 seasonal-to-interannual prediction; phase-2 toward developing intraseasonal prediction, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 95(4), pp. 585-601, available at: <https://doi.org/10.1175/bams-d-12-00050.1>.

Kistler, R., Kalnay, E., Collins, W., Saha, S., White, G., Woollen, J. et al. (2001) The NCEP–NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 82(2), pp. 247-268, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<0247:tnnyrm>2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<0247:tnnyrm>2.3.co;2).

Knight, J.R., Folland, C.K., Scaife, A.A. (2006) Climate impacts of the Atlantic multidecadal oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 33(17), available at: <https://doi.org/10.1029/2006GL026242>.

Kug, J.S., Jin, F.F., An, S.I. (2009) Two types of El Niño events: cold tongue El Niño and warm pool El Niño, *J. Clim.*, vol. 22(6), pp. 1499-1515, available at: <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2624.1>.

Larkin, N.K., Harrison, D.E. (2005) Global seasonal temperature and precipitation anomalies during El Niño autumn and winter, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 32(16), available at: <https://doi.org/10.1029/2005GL022860>.

Lin, J., Qian, T. (2019) Switch between El Nino and La Nina is caused by subsurface ocean waves likely driven by lunar tidal forcing, *Sci. Rep.*, vol. 9(1), pp. 13106, available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49678-w>.

Liu, Z., Alexander, M. (2007) Atmospheric bridge, oceanic tunnel, and global climatic teleconnections, *Rev. Geophys.*, vol. 45(2), available at: <https://doi.org/10.1029/2005RG000172>.

Lubkov, A.S., Voskresenskaya, E.N., Kukushkin, A.S. (2016) Method for reconstructing the monthly mean water transparencies for the northwestern part of the Black Sea as an example, *Atmos. Oceanic Opt.*, vol. 29, pp. 457-464, available at: <https://doi.org/10.1134/S1024856016050092>.

Lubkov, A.S., Voskresenskaya, E.N., Marchukova, O.V. (2019). Application of a neural network model to forecasting of El Niño and La Niña, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 386(1), p. 012040, available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/386/1/012040>.

Lubkov, A.S., Voskresenskaya, E.N., Marchukova, O.V. (2020a) Forecasting El Nino/La Nina and their types using neural networks, *Russ. Meteorol. Hydrol.*, vol. 45, pp. 806-813, available at: <https://doi.org/10.3103/S1068373920110084>.

Lubkov, A.S., Voskresenskaya, E.N., Marchukova, O.V., Evstigneev, V.P. (2020b, November) European temperature anomalies in the cold period associated with ENSO events, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 606(1), p. 012031, available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/606/1/012031>.

Mantua, N.J., Hare, S.R., Zhang, Y., Wallace, J.M., Francis, R.C. (1997) A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 78(6), pp. 1069-1080, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<1069:apicow>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<1069:apicow>2.0.co;2).

McPhaden, M.J., Zebiak, S.E., Glantz, M.H. (2006) ENSO as an integrating concept in earth science, *Science*, vol. 314(5806), pp. 1740-1745, available at: <https://doi.org/10.1126/science.1132588>.

Messié, M., Chavez, F. (2011) Global modes of sea surface temperature variability in relation to regional climate indices, *J. Clim.*, vol. 24(16), pp. 4314-4331, available at: <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3941.1>.

Mokhov, I.I., Smirnov, D.A. (2006) Study of the mutual influence of the El Niño-Southern Oscillation processes and the North Atlantic and Arctic Oscillations, *Izv. Atmos. Oceanic Phys.*, vol. 42(5), pp. 598-614, available at: <https://doi.org/10.1134/S0001433806050069>.

Petersik, P.J., Dijkstra, H.A. (2020) Probabilistic forecasting of El Niño using neural network models, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 47(6), p. e2019GL086423, available at: <https://doi.org/10.1029/2019GL086423>.

Philander, S.G. (1989) El Niño, La Niña, and the southern oscillation, *Int. Geophys. Ser.*, vol. 46, p. X-289, available at: <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getrecorddetail&idt=19255649>.

Polonsky, A.B., Basharin, D.V. (2017) How strong is the impact of the Indo-ocean dipole on the surface air temperature/sea level pressure anomalies in the Mediterranean region? *Global Planet. Change*, vol. 151, pp. 101-107, available at: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.11.007>.

Qian, C., Wu, Z., Fu, C., Wang, D. (2011) On changing El Niño: A view from time-varying annual cycle, interannual variability, and mean state, *J. Clim.*, vol. 24(24), pp. 6486-6500, available at: <https://doi.org/10.1175/jcli-d-10-05012.1>.

Rasmusson, E.M., Carpenter, T.H. (1982) Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño, *Mon. Wea. Rev.*, vol. 110(5), pp. 354-384, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1982\)110<0354:vitsst>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110<0354:vitsst>2.0.co;2).

Ropelewski, C.F., Jones, P.D. (1987) An Extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation Index, *Mon. Wea. Rev.*, vol. 115, pp. 2161-2165, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115.0.co;2).

Saji, N.H., Goswami, B.N., Vinayachandran, P.N., Yamagata, T. (1999) A dipole mode in the tropical Indian Ocean, *Nature*, vol. 401(6751), pp. 360-363, available at: <https://doi.org/10.1038/43854>.

Schlesinger, M.E., Ramankutty, N. (1994) An oscillation in the global climate system of period 65-70 years, *Nature*, vol. 367(6465), pp. 723-726, available at: <https://doi.org/10.1038/367723a0>.

Serykh, I.V., Sonechkin, D.M. (2019) Nonchaotic and globally synchronized short-term climatic variations and their origin, *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 137, pp. 2639-2656, available at: <https://doi.org/10.1007/s00704-018-02761-0>.

Serykh, I.V., Sonechkin, D.M. (2021) El Niño–Global Atmospheric Oscillation as the main mode of interannual climate variability, *Atmosphere*, vol. 12(11), pp. 1443, available at: <https://doi.org/10.3390/atmos12111443>.

Takahashi, K., Montecinos, A., Goubanova, K., Dewitte, B. (2011) ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 38(10), available at: <https://doi.org/10.1029/2011GL047364>.

Tang, Y., Zhang, R.H., Liu, T., Duan, W., Yang, D., Zheng, F. et al. (2018) Progress in ENSO prediction and predictability study, *Natl. Sci. Rev.*, vol. 5(6), pp. 826-839, available at: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwy105>.

Tippett, M.K., Barnston, A.G., Li, S. (2012) Performance of recent multimodel ENSO forecasts, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, vol. 51(3), pp. 637-654, available at: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-093.1>.

Trenberth, K.E., Caron, J.M. (2000) The Southern Oscillation revisited: Sea level pressures, surface temperatures, and precipitation, *J. Clim.*, vol. 13(24), pp. 4358-4365, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<4358:tsorsl>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<4358:tsorsl>2.0.co;2).

Trenberth, K.E., Stepaniak, D.P. (2001) Indices of El Niño evolution, *J. Clim.*, vol. 14(8), pp. 1697-1701, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<1697:lioeno>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<1697:lioeno>2.0.co;2).

Torrence, C., Compo, G.P. (1998) A Practical Guide to Wavelet Analysis, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 79, pp. 61-78, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2).

Vallès-Casanova, I., Lee, S.K., Foltz, G.R., Pelegrí, J.L. (2020) On the spatiotemporal diversity of Atlantic Niño and associated rainfall variability over West Africa and South America, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 47(8), p. e2020GL087108, available at: <https://doi.org/10.1029/2020GL087108>.

Venables, W.N., Ripley, B.D. (2002) *Modern Applied Statistics with S. Statistics and Computing*, doi:10.1007/978-0-387-21706-2.

Voskresenskaya, E.N., Marchukova, O.V. (2017) Spatial classification of La Nina events, *Izv. Atmos. Oceanic Phys.*, vol. 53(1), pp. 111-119, available at: <https://doi.org/10.1134/S0001433817010133>.

Voskresenskaya, E.N., Marchukova, O.V., Maslova, V.N., Lubkov, A.S. (2018) Interannual climate anomalies in the Atlantic-European region associated with La-Nina types, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 107(1), p. 012043, available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/107/1/012043>.

Voskresenskaya, E.N., Polonsky, A.B. (1993) Air pressure fluctuations in the North Atlantic and their relationship with El Niño-southern oscillations, *Phys. Oceanogr.*, vol. 4, pp. 275-282, available at: <https://doi.org/10.1007/BF02197626>.

Wallace, J.M., Gutzler, D.S. (1981) Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter, *Mon. Wea. Rev.*, vol. 109(4), pp. 784-812, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0784:titghf>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0784:titghf>2.0.co;2).

Wallace, J.M., Rasmusson, E.M., Mitchell, T.P., Kousky, V.E., Sarachik, E.S., Von Storch, H. (1998) On the structure and evolution of ENSO-related climate variability in the tropical Pacific: Lessons from TOGA, *J. Geophys. Res.: Oceans*, vol. 103(C7), pp. 14241-14259, available at: <https://doi.org/10.1029/97JC02905>.

Wang, Y., Jiang, J., Zhang, H., Dong, X., Wang, L., Ranjan, R., Zomaya, A.Y. (2017) A scalable parallel algorithm for atmospheric general circulation models on a multi-core cluster, *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 72, pp. 1-10, available at: <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.02.008>.

Webb, E.J., Magi, B.I. (2022) The Ensemble Oceanic Niño Index International, *J. Climatol.*, vol. 42(10), pp. 5321-5341, available at: <https://doi.org/10.1002/joc.7535>.

Webster, P.J., Yang, S. (1992) Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems, *Q. J. R. Meteorolog. Soc.*, vol. 118(507), pp. 877-926, available at: <https://doi.org/10.1002/qj.49711850705>.

Wu, X., Okumura, Y.M., Deser, C., DiNezio, P.N. (2021) Two-year dynamical predictions of ENSO event duration during 1954-2015, *J. Clim.*, vol. 34(10), pp. 4069-4087, available at: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0619.1>.

Ye, M., Nie, J., Liu, A., Wang, Z., Huang, L., Tian, H. et al. (2021). Multi-year ENSO forecasts using parallel convolutional neural networks with heterogeneous architecture, *Front. Mar. Sci.*, vol. 8, p. 717184, available at: <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.717184>.

Yeh, S.W., Kug, J.S., Dewitte, B., Kwon, M.H., Kirtman, B.P., Jin, F.F. (2009) El Niño in a changing climate, *Nature*, vol. 461(7263), pp. 511-514, available at: <https://doi.org/10.1038/nature08316>.

Yuan, Y., Yan, H. (2013) Different types of La Niña events and different responses of the tropical atmosphere, *Chin. Sci. Bull.*, vol. 58, pp. 406-415, available at: <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5423-5>.

Zhang, W., Wang, L., Xiang, B., Qi, L., He, J. (2015) Impacts of two types of La Niña on the NAO during boreal winter, *Clim. Dyn.*, vol. 44, pp. 1351-1366, available at: <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2155-z>.

Zhang, Y., Wallace, J.M., Battisti, D.S. (1997) ENSO-like interdecadal variability: 1900-93, *J. Clim.*, vol. 10(5), pp. 1004-1020, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<1004:eliv>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<1004:eliv>2.0.co;2).

Zheleznova, I.V., Gushchina, D.Y. (2016) Circulation anomalies in the atmospheric centers of action during the Eastern Pacific and Central Pacific El Niño, *Russ. Meteorol. Hydrol.*, vol. 41, pp. 760-769, available at: <https://doi.org/10.3103/S1068373916110030>.

References

Lubkov, A.S., Voskresenskaya, E.N., Marchukova, O.V. (2017a) Prognozirovaniye indeksa Yuzhnogo kolebaniya [Forecasting the Southern Oscillation Index], *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o zemle*, no. 4(62), pp. 370-388, doi: 10.21638/11701/spbu07.2017.404.

Lubkov, A.S., Voskresenskaya, E.N., Marchukova, O.V. (2017b) Ob'yektivnaya klassifikatsiya yavleniy El'-Nin'o [Objective classification of El Niño phenomena], *Ispol'zovaniye i okhrana prirodnikh resursov v Rossii*, no. 1(149), pp. 41-44.

Lubkov, A.S. (2022) Nauchnyy prognoz: Nachnetsya li El'-Nin'o v 2023 godu? [Scientific forecast: Will El Niño start in 2023?], *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, no. 4 (50), pp. 143-144.

Marchukova, O.V., Lubkov, A.S., Voskresenskaya, E.N. (2020) Kachestvo vosproizvedeniya sobytij El'-Nin'o i La-Nin'ya po raznym massivam rekonstruirovannykh dannyykh temperatury poverkhnosti okeana [Quality of reproduction of El Niño and La Niña events using different arrays of reconstructed ocean surface temperature data], *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o zemle*, no. 65(1), pp. 97-120, doi:10.21638/spbu07.2020.106.

Osovsky, S. (2002) *Neyronnyye seti dlya obrabotki informatsii* [Neural networks for information processing], Finance and Statistics, Moscow, Russia, 344 p.

Petrosyants, M.A., Gushchina D.Yu. (2002) Ob opredelenii yavleniy El'-Nin'o i La-Nin'ya [On the definition of El Niño and La Niña phenomena], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 8, pp. 24-35.

An, S.I., Jin, F.F. (2004) Nonlinearity and asymmetry of ENSO, *J. Clim.*, vol. 17(12), pp. 2399-2412, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)0172.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)0172.0.co;2).

Ashok, K., Behera, S.K., Rao, S.A., Weng, H., Yamagata, T. (2007) El Niño Modoki and its possible teleconnection, *J. Geophys. Res.: Oceans*, vol. 112(C11), available at: <https://doi.org/10.1029/2006JC003798>.

Barnston, A.G., Chelliah, M., Goldenberg, S.B. (1997) Documentation of a highly ENSO-related SST region in the equatorial Pacific: Research note, *Atmosphere-ocean*, vol. 35(3), pp. 367-383, available at: <https://doi.org/10.1080/07055900.1997.9649597>.

Barnston, A.G., Livezey, R.E. (1987) Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns, *Mon. Wea. Rev.*, vol. 115(6), pp. 1083-1126, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<1083:csapol>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1083:csapol>2.0.co;2).

Barnston, A.G., Tippett, M.K., L'Heureux, M.L., Li, S., DeWitt, D.G. (2012) Skill of real-time seasonal ENSO model predictions during 2002-11: Is our capability increasing? *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 93(5), pp. 631-651, available at: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00111.1>.

Cachay, S.R., Erickson, E., Buckner, A.F.C., Pokropek, E., Potosnak, W., Osei, S., Lütjens, B. (2020) Graph Neural Networks for Improved El Niño Forecasting, *arXiv e-prints, arXiv-2012*, available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.01598>.

Deser, C., Alexander, M.A., Xie, S.P., Phillips, A.S. (2010) Sea surface temperature variability: Patterns and mechanisms, *Annu. Rev. Mar. Sci.*, vol. 2, pp. 115-143, available at: <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120408-151453>.

DiNezio, P.N., Deser, C., Karspeck, A., Yeager, S., Okumura, Y., Danabasoglu, G., Meehl, G.A. (2017) A 2 year forecast for a 60-80% chance of La Niña in 2017-2018, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 44(22), pp. 11-624, available at: <https://doi.org/10.1002/2017GL074904>.

Enfield, D.B., Mestas-Núñez, A.M. (1999) Multiscale variabilities in global sea surface temperatures and their relationships with tropospheric climate patterns, *J. Clim.*, vol. 12(9), pp. 2719-2733, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2719:mvgiss>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2719:mvgiss>2.0.co;2).

Fang, W., Sha, Y., Sheng, V.S. (2022) Survey on the Application of Artificial Intelligence in ENSO Forecasting, *Mathematics*, vol. 10(20), p. 3793, available at: <https://doi.org/10.3390/math10203793>.

Gavrilov, A., Seleznev, A., Mukhin, D., Loskutov, E., Feigin, A., Kurths, J. (2019) Linear dynamical modes as new variables for data-driven ENSO forecast, *Clim. Dyn.*, vol. 52, pp. 2199-2216, available at: <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4255-7>.

Geng, H., Wang, T. (2021) Spatiotemporal model based on deep learning for ENSO forecasts, *Atmosphere*, vol. 12(7), p. 810, available at: <https://doi.org/10.3390/>

atmos12070810.

Ham, Y.G., Kim, J.H., Luo, J.J. (2019). Deep learning for multi-year ENSO forecasts, *Nature*, vol. 573(7775), pp. 568-572, available at: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1559-7>.

Haykin, S. (1998) Neural networks: a comprehensive foundation, *Prentice Hall PTR*, available at: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/521706>.

Hirahara, S., Ishii, M., Fukuda, Y. (2014) Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty, *J. Clim.*, vol. 27(1), pp. 57-75, available at: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00837.1>.

Hu, Z.Z., Kumar, A., Xue, Y., Jha, B. (2014) Why were some La Niñas followed by another La Niña? *Clim. Dyn.*, vol. 42, pp. 1029-1042, available at: <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1917-3>.

Kirtman, B.P., Min, D., Infanti, J.M., Kinter, J.L., Paolino, D.A., Zhang, Q. et al. (2014) The North American multimodel ensemble: phase-1 seasonal-to-interannual prediction; phase-2 toward developing intraseasonal prediction, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 95(4), pp. 585-601, available at: <https://doi.org/10.1175/bams-d-12-00050.1>.

Kistler, R., Kalnay, E., Collins, W., Saha, S., White, G., Woollen, J. et al. (2001) The NCEP–NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 82(2), pp. 247-268, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<0247:tnnyrm>2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<0247:tnnyrm>2.3.co;2).

Knight, J.R., Folland, C.K., Scaife, A.A. (2006) Climate impacts of the Atlantic multidecadal oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 33(17), available at: <https://doi.org/10.1029/2006GL026242>.

Kug, J.S., Jin, F.F., An, S.I. (2009) Two types of El Niño events: cold tongue El Niño and warm pool El Niño, *J. Clim.*, vol. 22(6), pp. 1499-1515, available at: <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2624.1>.

Larkin, N.K., Harrison, D.E. (2005) Global seasonal temperature and precipitation anomalies during El Niño autumn and winter, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 32(16), available at: <https://doi.org/10.1029/2005GL022860>.

Lin, J., Qian, T. (2019) Switch between El Nino and La Nina is caused by subsurface ocean waves likely driven by lunar tidal forcing, *Sci. Rep.*, vol. 9(1), pp. 13106, available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49678-w>.

Liu, Z., Alexander, M. (2007) Atmospheric bridge, oceanic tunnel, and global climatic teleconnections, *Rev. Geophys.*, vol. 45(2), available at: <https://doi.org/10.1029/2005RG000172>.

Lubkov, A.S., Voskresenskaya, E.N., Kukushkin, A.S. (2016) Method for reconstructing the monthly mean water transparencies for the northwestern part of the Black Sea as an example, *Atmos. Oceanic Opt.*, vol. 29, pp. 457-464, available at: <https://doi.org/10.1134/S1024856016050092>.

Lubkov, A.S., Voskresenskaya, E.N., Marchukova, O.V. (2019). Application of a neural network model to forecasting of El Niño and La Niña, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 386(1), p. 012040, available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/386/1/012040>.

Lubkov, A.S., Voskresenskaya, E.N., Marchukova, O.V. (2020a) Forecasting El Nino/La Nina and their types using neural networks, *Russ. Meteorol. Hydrol.*, vol. 45, pp. 806-813, available at: <https://doi.org/10.3103/S1068373920110084>.

Lubkov, A.S., Voskresenskaya, E.N., Marchukova, O.V., Evstigneev, V.P. (2020b, November) European temperature anomalies in the cold period associated with ENSO events, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 606(1), p. 012031, available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/606/1/012031>.

Mantua, N.J., Hare, S.R., Zhang, Y., Wallace, J.M., Francis, R.C. (1997) A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 78(6), pp. 1069-1080, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<1069:apicow>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<1069:apicow>2.0.co;2).

McPhaden, M.J., Zebiak, S.E., Glantz, M.H. (2006) ENSO as an integrating concept in earth science, *Science*, vol. 314(5806), pp. 1740-1745, available at: <https://doi.org/10.1126/science.1132588>.

Messié, M., Chavez, F. (2011) Global modes of sea surface temperature variability in relation to regional climate indices, *J. Clim.*, vol. 24(16), pp. 4314-4331, available at: <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3941.1>.

Mokhov, I.I., Smirnov, D.A. (2006) Study of the mutual influence of the El Niño-Southern Oscillation processes and the North Atlantic and Arctic Oscillations, *Izv. Atmos. Oceanic Phys.*, vol. 42(5), pp. 598-614, available at: <https://doi.org/10.1134/S0001433806050069>.

Petersik, P.J., Dijkstra, H.A. (2020) Probabilistic forecasting of El Niño using neural network models, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 47(6), p. e2019GL086423, available at: <https://doi.org/10.1029/2019GL086423>.

Philander, S.G. (1989) El Niño, La Niña, and the southern oscillation, *Int. Geophys. Ser.*, vol. 46, p. X-289, available at: <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getrecorddetail&idt=19255649>.

Polonsky, A.B., Basharin, D.V. (2017) How strong is the impact of the Indo-ocean dipole on the surface air temperature/sea level pressure anomalies in the Mediterranean region? *Global Planet. Change*, vol. 151, pp. 101-107, available at: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.11.007>.

Qian, C., Wu, Z., Fu, C., Wang, D. (2011) On changing El Niño: A view from time-varying annual cycle, interannual variability, and mean state, *J. Clim.*, vol. 24(24), pp. 6486-6500, available at: <https://doi.org/10.1175/jcli-d-10-05012.1>.

Rasmusson, E.M., Carpenter, T.H. (1982) Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El

Niño, *Mon. Wea. Rev.*, vol. 110(5), pp. 354-384, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1982\)110<0354:vitsst>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110<0354:vitsst>2.0.co;2).

Ropelewski, C.F., Jones, P.D. (1987) An Extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation Index, *Mon. Wea. Rev.*, vol. 115, pp. 2161-2165, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)1152.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)1152.0.co;2).

Saji, N.H., Goswami, B.N., Vinayachandran, P.N., Yamagata, T. (1999) A dipole mode in the tropical Indian Ocean, *Nature*, vol. 401(6751), pp. 360-363, available at: <https://doi.org/10.1038/43854>.

Schlesinger, M.E., Ramankutty, N. (1994) An oscillation in the global climate system of period 65-70 years, *Nature*, vol. 367(6465), pp. 723-726, available at: <https://doi.org/10.1038/367723a0>.

Serykh, I.V., Sonechkin, D.M. (2019) Nonchaotic and globally synchronized short-term climatic variations and their origin, *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 137, pp. 2639-2656, available at: <https://doi.org/10.1007/s00704-018-02761-0>.

Serykh, I.V., Sonechkin, D.M. (2021) El Niño–Global Atmospheric Oscillation as the main mode of interannual climate variability, *Atmosphere*, vol. 12(11), pp. 1443, available at: <https://doi.org/10.3390/atmos12111443>.

Takahashi, K., Montecinos, A., Goubanova, K., Dewitte, B. (2011) ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 38(10), available at: <https://doi.org/10.1029/2011GL047364>.

Tang, Y., Zhang, R.H., Liu, T., Duan, W., Yang, D., Zheng, F. et al. (2018) Progress in ENSO prediction and predictability study, *Natl. Sci. Rev.*, vol. 5(6), pp. 826-839, available at: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwy105>.

Tippett, M.K., Barnston, A.G., Li, S. (2012) Performance of recent multimodel ENSO forecasts, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, vol. 51(3), pp. 637-654, available at: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-093.1>.

Trenberth, K.E., Caron, J.M. (2000) The Southern Oscillation revisited: Sea level pressures, surface temperatures, and precipitation, *J. Clim.*, vol. 13(24), pp. 4358-4365, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<4358:tsorsl>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<4358:tsorsl>2.0.co;2).

Trenberth, K.E., Stepaniak, D.P. (2001) Indices of El Niño evolution, *J. Clim.*, vol. 14(8), pp. 1697-1701, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<1697:lioeno>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<1697:lioeno>2.0.co;2).

Torrence, C., Compo, G.P. (1998) A Practical Guide to Wavelet Analysis, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 79, pp. 61-78, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2).

Vallès-Casanova, I., Lee, S.K., Foltz, G.R., Pelegrí, J.L. (2020) On the spatiotemporal diversity of Atlantic Niño and associated rainfall variability over West Africa and South America, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 47(8), p. e2020GL087108, available at: <https://doi.org/10.1029/2020GL087108>.

Venables, W.N., Ripley, B.D. (2002) *Modern Applied Statistics with S. Statistics and Computing*, doi:10.1007/978-0-387-21706-2.

Voskresenskaya, E.N., Marchukova, O.V. (2017) Spatial classification of La Nina events, *Izv. Atmos. Oceanic Phys.*, vol. 53(1), pp. 111-119, available at: <https://doi.org/10.1134/S0001433817010133>.

Voskresenskaya, E.N., Marchukova, O.V., Maslova, V.N., Lubkov, A.S. (2018) Interannual climate anomalies in the Atlantic-European region associated with La-Nina types, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 107(1), p. 012043, available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/107/1/012043>.

Voskresenskaya, E.N., Polonsky, A.B. (1993) Air pressure fluctuations in the North Atlantic and their relationship with El Niño-southern oscillations, *Phys. Oceanogr.*, vol. 4, pp. 275-282, available at: <https://doi.org/10.1007/BF02197626>.

Wallace, J.M., Gutzler, D.S. (1981) Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter, *Mon. Wea. Rev.*, vol. 109(4), pp. 784-812, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0784:titghf>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0784:titghf>2.0.co;2).

Wallace, J.M., Rasmusson, E.M., Mitchell, T.P., Kousky, V.E., Sarachik, E.S., Von Storch, H. (1998) On the structure and evolution of ENSO-related climate variability in the tropical Pacific: Lessons from TOGA, *J. Geophys. Res.: Oceans*, vol. 103(C7), pp. 14241-14259, available at: <https://doi.org/10.1029/97JC02905>.

Wang, Y., Jiang, J., Zhang, H., Dong, X., Wang, L., Ranjan, R., Zomaya, A.Y. (2017) A scalable parallel algorithm for atmospheric general circulation models on a multi-core cluster, *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 72, pp. 1-10, available at: <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.02.008>.

Webb, E.J., Magi, B.I. (2022) The Ensemble Oceanic Niño Index International, *J. Climatol.*, vol. 42(10), pp. 5321-5341, available at: <https://doi.org/10.1002/joc.7535>.

Webster, P.J., Yang, S. (1992) Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems, *Q. J. R. Meteorolog. Soc.*, vol. 118(507), pp. 877-926, available at: <https://doi.org/10.1002/qj.49711850705>.

Wu, X., Okumura, Y.M., Deser, C., DiNezio, P.N. (2021) Two-year dynamical predictions of ENSO event duration during 1954-2015, *J. Clim.*, vol. 34(10), pp. 4069-4087, available at: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0619.1>.

Ye, M., Nie, J., Liu, A., Wang, Z., Huang, L., Tian, H. et al. (2021). Multi-year ENSO forecasts using parallel convolutional neural networks with heterogeneous architecture, *Front. Mar. Sci.*, vol. 8, p. 717184, available at: <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.717184>.

Yeh, S.W., Kug, J.S., Dewitte, B., Kwon, M.H., Kirtman, B.P., Jin, F.F. (2009) El Niño in a changing climate, *Nature*, vol. 461(7263), pp. 511-514, available at: <https://doi.org/10.1038/nature08316>.

Yuan, Y., Yan, H. (2013) Different types of La Niña events and different responses of the tropical atmosphere, *Chin. Sci. Bull.*, vol. 58, pp. 406-415, available at: <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5423-5>.

Zhang, W., Wang, L., Xiang, B., Qi, L., He, J. (2015) Impacts of two types of La Niña on the NAO during boreal winter, *Clim. Dyn.*, vol. 44, pp. 1351-1366, available at: <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2155-z>.

Zhang, Y., Wallace, J.M., Battisti, D.S. (1997) ENSO-like interdecadal variability: 1900-93, *J. Clim.*, vol. 10(5), pp. 1004-1020, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<1004:eliv>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<1004:eliv>2.0.co;2).

Zheleznova, I.V., Gushchina, D.Y. (2016) Circulation anomalies in the atmospheric centers of action during the Eastern Pacific and Central Pacific El Niño, *Russ. Meteorol. Hydrol.*, vol. 41, pp. 760-769, available at: <https://doi.org/10.3103/S1068373916110030>.

Поступила в редакцию: 28.09.2023 г.

Доработана после рецензирования: 13.10.2023 г.

Принята к публикации: 06.11.2023 г.

Для цитирования / For citation:

Лубков, А.С., Воскресенская, Е.Н., Марчукова, О.В. (2023) Новый подход к использованию нейронных сетей для долгосрочного прогноза Эль-Ниньо и Ла-Нинья, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 4, с. 432-466, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-432-466.

Lubkov, A.S., Voskresenskaya, E.N., Marchukova, O.V. (2023) An innovative approach to long-term prediction of El Niño and La Niña using neural networks, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 4, pp. 432-466, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-432-466.

Пространственная неоднородность летнего турбулентного теплообмена на равнинах России

Т.Б. Титкова^{}, А.Н. Золотокрылин*

Институт географии РАН,
Россия, 109017, Москва, Старомонетный пер., 29

^{*} Адрес для переписки: titkova@igras.ru

Реферат. Работа направлена на анализ статистических характеристик теплового баланса системы «подстилающая поверхность-атмосфера» на равнинах России с выявлением природных зон максимальных горизонтальных градиентов, а также оценку изменений пространственной неоднородности теплообмена в различных ландшафтных зонах на фоне интенсивного потепления. Горизонтальные градиенты турбулентного теплообмена рассматривались на равнинах России от арктической тундры до сухой степи и полупустынь в среднем за летний период 1991-2020 гг. Для исследования привлечены параметры потока явного и скрытого тепла из архива реанализа ERA5-Land с разрешением $0.1 \times 0.1^\circ$ по долготе и широте. Произведен анализ среднего, абсолютной и относительной изменчивости турбулентного теплообмена, а также их трендов с оценкой значимости и горизонтальных градиентов. По максимальным градиентам параметров выявлены районы повышенных горизонтальных градиентов турбулентного теплообмена.

В летний период одним из природных рубежей повышенных горизонтальных градиентов теплообмена на Восточно-Европейской равнине и в Западной Сибири является зона средней тайги с примыкающими к ней частями северной и южной тайги. Неоднородность теплообмена на этой территории обусловлена квазистационарной вторичной ветвью Арктического фронта с повышенной повторяемостью выхода циклонов, поступающих из Атлантико-Европейского сектора, и положением здесь высотной фронтальной зоны, возникающей на стыке холодных и теплых воздушных масс. Второй природный рубеж повышенной неоднородности потоков тепла проходит в суббореальных ландшафтах, где также отмечаются повышенные горизонтальные градиенты климатических параметров и характеристик поверхности. Здесь возрастает поток суммарной радиации, увеличивается дефицит почвенной влаги и уменьшается сумма летних осадков.

Пространственная неоднородность турбулентного теплообмена увеличилась в начале XXI века севернее областей с максимальными горизонтальными градиентами турбулентного теплообмена. В субарктических ландшафтах Западной Сибири этот рост связан с общими положительными трендами приземной температуры и с участвовавшими положительными аномалиями летней температуры. В суббореальных ландшафтах на значимый рост потоков теплообмена оказывает влияние в основном рост летних темпе-

ратур и уменьшение увлажнения с одновременным ростом повторяемости атмосферных блокингов на востоке Восточно-Европейской равнины и в Западной Сибири.

Ключевые слова. Турбулентный теплообмен, явное тепло, скрытое тепло, горизонтальные градиенты, тренды, ландшафты.

The spatial heterogeneity of the summer turbulent heat exchange on the plains of Russia

T.B. Titkova^{}, A.N. Zolotokrylin*

Institute of Geography RAS,
29, Staromonetny lane, 109017, Moscow, Russian Federation

^{*}Correspondence address: *titkova@igras.ru*

Abstract. The article is aimed at the analysis of statistical characteristics of heat exchange on the plains of Russia. Nature zones with maximum horizontal spatial heterogeneity of turbulent heat exchange during the summer period are identified. Changes in the spatial heterogeneity of heat and exchange in different landscape zones against the background of intense warming are assessed. The spatial heterogeneity of turbulent heat exchange on the plains of Russia was considered for the summer period of 1991-2020 (on average). The are located from arctic tundra to dry steppe and semi-deserts. Parameters of sensible and latent heat fluxes is taken for the study from the archive of the ERA5-Land reanalysis. It's resolution for longitude and latitude is 0.1°. A statistical analysis of the turbulent heat exchange is performed with the estimation of mean values, absolute and relative variability, and their trends. Their significance and horizontal gradients also are assessed. Areas with elevated spatial heterogeneity of turbulent heat exchange are identified using maximal horizontal gradients of parameters.

During summer period, the zone of the middle taiga with adjacent parts of northern and southern taiga is one of the natural limits for areas with elevated spatial heterogeneity of heat exchange on the East European Plain and in Western Siberia. Increased horizontal gradients of the heat exchange on this territory result from the quasi-stationary secondary brunch of the Arctic front with increased repeatability of cyclones coming from the Atlantic-European sector, and from the location of the high-altitude frontal zone that occurs at the intersection of cold and warm air masses. The second nature frontier of elevated spatial heterogeneity of heat fluxes is found in subboreal landscapes. The have elevated horizontal gradients of climate parameters and surface characteristics. The flux of total radiation and the deficit of soil moisture increase there, while the sum of summer precipitation decreases.

The horizontal spatial heterogeneity of the vertical heat exchange increased at the beginning of the XXI century. This occurred mainly to the north of zones with maximum horizontal gradients of the turbulent heat exchange. In subarctic landscapes of Western Siberia, the growth was connected with general positive

surface temperature trends and with increasing positive anomalies of summer temperature. In subboreal landscapes, the significant growth of fluxes of heat exchange is also resulted mainly from the growth of summer temperatures and the decrease of humidification along with simultaneous increase in repeatability of atmospheric blocking in the east of the East European Plain and in Western Siberia.

Keywords. Turbulent heat exchange, sensible heat, latent heat, horizontal gradients, trends, landscapes.

Введение

Природная зона со своим типом растительности является одним из ключевых факторов, влияющим на энергетический обмен между поверхностью суши и атмосферой. В северных зональных ландшафтах турбулентные потоки тепла во многом определяются адвекцией тепла и повышением температуры (Тепловодообмен..., 2007; Kodama et al., 2000). Летом в субарктических и бореальных ландшафтах почва и воздух прогреваются в разной степени в зависимости от типа растительности: чем гуще растительность, тем быстрее прогревается земля (Jacqueline et al., 2022; Kropp et al., 2020). В южных ландшафтах на поток явного тепла наибольшее влияние оказывает возрастающая результирующая радиация, а поток скрытого тепла более чувствителен к осадкам и в основном зависит от влажности почвы (Guo Zhang et al., 2010; Bonan, 2015).

В целом, оценки линейных трендов потоков скрытого и явного тепла (основанные на реанализе NCEP-NCAR) показали, что из-за повышения температуры поверхности ожидается увеличение восходящих тепловых потоков (Gulev, Belyaev, 2012). На колебание составляющих теплового баланса наибольшее влияние оказывает общий положительный тренд температуры, что на Европейской части России (ЕТР) составляет $0.46^{\circ}\text{C}/10$ лет, а в Западной Сибири (ЗС) $0.26^{\circ}\text{C}/10$ лет за летний период 1976–2020 гг. (Третий..., 2022). Также на турбулентные потоки тепла заметное влияние оказывают колебание общей циркуляции атмосферы, выраженное ослабление зональной атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе и повышение повторяемости числа дней с атмосферными блокинками на востоке ЕТР (Бардин и др., 2019, 2021).

Зоны максимальной неоднородности теплообмена разграничивают глобальные области структур баланса тепла и влаги земной поверхности, обусловленные особенностями динамики атмосферной циркуляции. При этом зонам с максимальными горизонтальными градиентами теплообмена свойственна пространственно-временная динамика границ. Предпосылки изменения пространственной неоднородности теплообмена в системе «подстилающая поверхность – атмосфера» во многом зависят от глобальных и региональных изменений климатических условий и обусловлены природной зоной, подчиняясь зональным закономерностям и азональным особенностям.

Целью работы является анализ статистических характеристик теплообмена на равнинах России с выявлением природных зон с максимальными

горизонтальными градиентами турбулентного теплообмена в летний период, а также оценка изменений горизонтальных градиентов теплообмена в различных ландшафтных зонах на фоне интенсивного потепления.

Объекты, материалы и методы исследования

Территория исследования – ЕТР и ЗС, представленная природными ландшафтами России от арктической тундры до сухой степи и полупустынь. Рассмотрены летние сезоны (июнь-август) за тридцатилетний период 1991-2020 гг.

Для исследований турбулентных потоков теплообмена привлечен архив ежемесячных усредненных данных реанализа пятого поколения ERA5-Land с разрешением $0.1 \times 0.1^\circ$ (<https://climate.copernicus.eu/>). Использовался поток явного тепла SL (Дж/м²), поток скрытого тепла SS (Дж/м²). Поток явного тепла – это перенос тепла между поверхностью Земли и атмосферой за счет турбулентного движения воздуха, исключая любой перенос тепла в результате конденсации или испарения. Величина потока явного тепла определяется разницей температур между поверхностью и вышележащей атмосферой, скоростью ветра и шероховатостью поверхности. Поток скрытого тепла – это обмен скрытым теплом с поверхностью, посредством турбулентной диффузии. Эти переменные одного уровня, и они накапливаются с начала времени прогноза до конца шага прогноза, в данном случае за месяц. По соглашению ECMWF для вертикальных потоков положительное значение указывает на поток вниз. По оценкам (Muñoz-Sabater et al., 2021), реанализ ERA5-Land имеет общую 4%-ю ошибку в данных у береговой линии из-за вклада в расчет прибрежных точек, где важно пространственное разрешение.

Разделение функций передачи тепла атмосфере между явным и скрытым теплом непосредственно влияет на приземный климат. Поэтому был произведен расчет отношений потоков явного и скрытого тепла, выраженных коэффициентом Боуэна. Отношение Боуэна – это отношение энергии, доступной для явного нагрева (разница температур без эвапотранспирации), к энергии, доступной для скрытого нагрева (энергия, необходимая для изменения состояния, без изменения температуры). Коэффициент Боуэна используется для описания типа теплопередачи для поверхности, имеющей влажность. Коэффициент Боуэна используется для расчета потери (или получения) тепла. В нашей работе, для расчета отношения Боуэна, мы использовали отношение потоков SL/SS. Если отношение Боуэна больше 1, явное тепло играет большую роль в передаче тепла атмосфере, чем скрытое. Поскольку большая часть тепла отдается атмосфере в явном, а не скрытом виде, климат должен быть относительно теплым. С другой стороны, если отношение Боуэна меньше 1, то большую роль играет скрытое тепло и теплообмен с атмосферой происходит, главным образом, за счет теплоты фазовых переходов, которая не приводит к потеплению нижних слоев воздуха, но может увеличить их влаго-содержание. Поэтому климат будет холодным и влажным.

Для каждого узла данных с шагом 0.1° вычислялось среднее, тренды, стандартное отклонение, коэффициент вариации турбулентных потоков теплообмена и отношения Боуэна за летний период 1991-2020 гг. Были рассчитаны горизонтальные градиенты потоков явного и скрытого тепла для средне-летних значений. Под градиентом параметров понимается вектор, характеризующий их изменение на единицу расстояния. Подробная методика расчета горизонтальных градиентов приведена в работе (Титкова и др., 2020). В данной работе градиенты потоков вычислялись с шагом в 1° широты и долготы за каждый летний сезон 1991-2020 гг. Для этого было произведено осреднение данных с шагом 1° по сетке. По ним были получены тренды градиентов потоков со скоростью в 10 лет с оценкой значимости на 5%-м уровне по критерию Стьюдента. Рассмотрены межгодовые колебания горизонтальных градиентов вертикальных потоков тепла в природных зонах. Для обработки массивов данных и их картографирования использовался пакет анализа MATLAB.

Результаты

Статистические характеристики потоков теплообмена

Передача тепла от природных зон ЕТР атмосфере максимальна в суббореальных ландшафтах, особенно в полупустынных (более 6 МДж/м^2), что обусловлено высокой суммарной радиацией при разреженной растительности (рис. 1, 1а). По направлению к северу в бореальных зонах передача тепла снижается в подтаежных и южно-таежных ландшафтах. Здесь значения потоков тепла не превышают 3 МДж/м^2 . Поток тепла вновь увеличивается в северотаежных ландшафтах, что обусловлено как климатическими условиями – выходом полярных воздушных масс с Атлантики, так и типом лесной растительности с густым пологом. Севернее – в северных бореальных и субарктических ландшафтах – многолетняя мерзлота летом при разреженной растительности уменьшает поглощение тепла почвой и снижает температуру ее поверхности и, следовательно, передачу тепла атмосфере. На территории ЗС максимальный поток явного тепла наблюдается в суббореальных ландшафтах (сухостепная зона), который постепенно уменьшается в северном направлении. В бореальных ландшафтах (вблизи границы средней и северной тайги) отмечается возрастание потока, а затем к северу происходит новое снижение с последующей его стабилизацией в субарктических ландшафтах.

Как видно из рис. 1, 1б абсолютная изменчивость потоков тепла (среднеквадратическое отклонение) увеличивается с их ростом в суббореальных ландшафтах ЕТР, но при этом наблюдается отклонение распределения абсолютной изменчивости по сравнению с широтным изменением самих потоков в бореальных ландшафтах. Оно выражается в формировании меридиональной области повышенной абсолютной изменчивости потоков явного тепла, простирающейся от субарктических до суббореальных ландшафтов. Повышенные значения абсолютной изменчивости потоков в ЗС имеют скорее меридиональ-

ное распределение, чем зональное. Максимальные значения относительной изменчивости потоков наблюдаются в лесостепной зоне Зауралья.

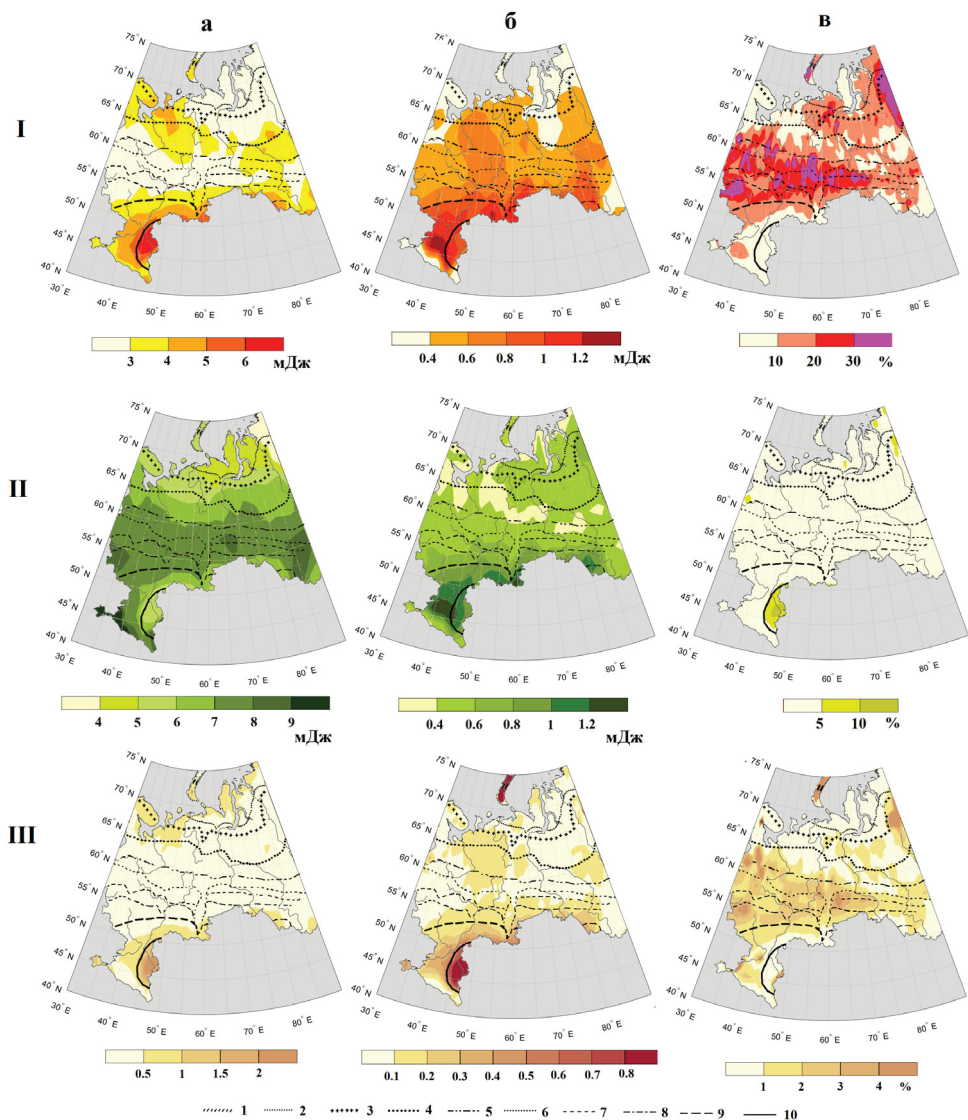


Рисунок 1. Статистические характеристики потока явного тепла (I), потока скрытого тепла (II), отношения Боуэна (III) за июнь-август, 1991-2020 гг.

а) среднее, б) среднееквадратическое отклонение, в) коэффициент вариации. Условные обозначения южных границ ландшафтных зон: 1 – Арктические; Субарктические (2 – Тундровые, 3 – Лесотундровые); Бореальные (4 – Северотаёжные, 5 – Среднетаёжные, 6 – Южнотаёжные, 7 – Подтаёжные, 8 – Широколиственно-лесные); Суббореальные (9 – Лесостепные, 10 – Степные типичные и сухостепные)

Figure 1. Statistical characteristics of the sensible heat flux (I), latent heat flux (II), Bowen ratio (III) from June to August, 1991-2020

a) mean, b) standard deviation, c) coefficient of variation. The legend for southern borders of landscape zones: 1 – Arctic; Subarctic (2 – Tundra, 3 – Forest tundra); Boreal (4 – North taiga, 5 – Middle taiga, 6 – South taiga, 7 – Subtaiga, 8 – Broad-leaved forest); Subboreal (9 – Forest steppe, 10 – Typical steppe and dry steppe)

Относительная изменчивость потоков тепла (коэффициент вариации) имеет мозаичную структуру на ЕТР с максимальными значениями преимущественно в северной части суббореальных ландшафтов (подтаежных и широколиственно-лесных) (рис. 1, Ib). Совокупность данных потоков явного тепла в целом можно считать однородной. Коэффициент вариации незначителен ($< 10\%$) на севере и юге ЕТР. Рассеивание данных больше 30% встречается в основном на ЕТР в зоне южной тайги и в подтаежных ландшафтах.

Тренды потока явного тепла разнонаправлены на территории ЕТР и ЗС (рис. 2а) и на большей части незначимы. Отрицательный тренд характерен в западной части бореальных ландшафтов и в субарктических ландшафтах ЕТР. Напротив, тренды потоков явного тепла положительны в суббореальных ландшафтах ЕТР. Отрицательные тренды доминируют в субарктических и бореальных ландшафтах ЗС. Положительные значимые тренды наблюдаются в суббореальных (сухостепных) ландшафтах ЗС. На фоне повышения средней температуры (Третий..., 2022) тренд потока явного тепла увеличивается и составляет $4\text{--}6\%$ /10 лет.

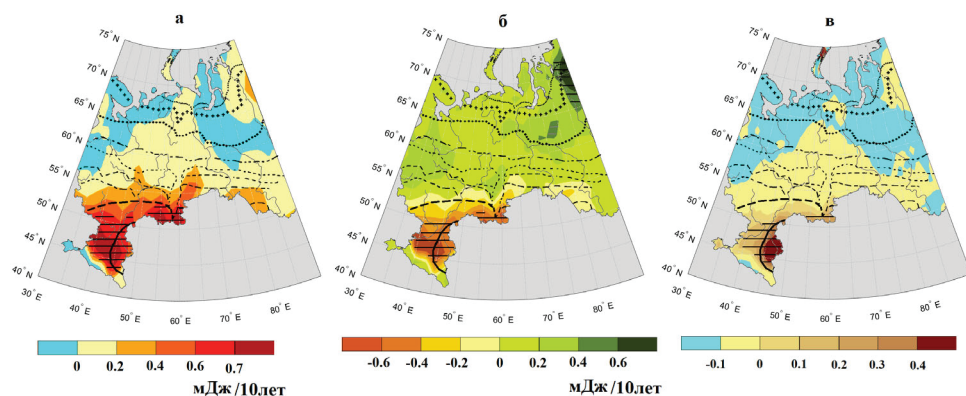


Рисунок 2. Линейный тренд /10 лет потока явного тепла (а), потока скрытого тепла (б), отношения Боуэна (в) за июнь-август, 1991-2020 гг.

Значимые тренды показаны штриховкой. Условные обозначения см. рис. 1

Figure 2. Linear trend /10 years of the sensible heat flux (a), the latent heat flux (b), Bowen ratio (c) from June to August, 1991-2020

Significant trends are shown by hatching. For legend see Fig. 1

Потоки скрытого тепла (рис. 1, Па) возрастают при смене бореальных ландшафтов суббореальными на ЕТР и ЗС, уменьшаясь при этом как в северном, так и в южном направлении. Абсолютная и относительная изменчивость потоков скрытого тепла достигает максимальных значений в суббореальных (сухостепных и полупустынных) ландшафтах. Степень рассеивания данных незначительна (меньше 10%) (рис. 1, Пб, в). Тренды потоков скрытого тепла в большей части незначимы и имеют положительные тенденции в бореальных ландшафтах, которые сменяются на отрицательные в суббореальных ландшафтах (рис. 2б).

Как видно из рис. 1, III, на значительной части территории бореальных, а также в части суббореальных ландшафтов отношение Боуэна не превышает 0.5 , что указывает на влажный климат территории с умеренно теплым летом

(Григорьев, Будыко, 1965). При повышении отношения Боуэна в степной зоне возрастает сухость климата, который характеризуется как недостаточно влажный с теплым или очень теплым летом. Абсолютная и относительная изменчивость отношения Боуэна повышается как в бореальных, так и в суббореальных ландшафтах. Положительный тренд отмечается преимущественно в недостаточно увлажненных суббореальных ландшафтах, в то время как в бореальных ландшафтах с влажным климатом наблюдается отрицательный тренд отношения Боуэна (рис. 2в).

Зоны пространственной неоднородности турбулентного теплообмена

На равнинах России обширная полоса максимальных горизонтальных градиентов турбулентных потоков явного и скрытого тепла покрывает всю зону средней тайги и примыкающие к ней части северной и южной тайги (рис. 3а, б). Эта зона максимальных градиентов потоков явного и скрытого тепла обусловлена широтной зональностью, а также типом растительности. На севере, в субарктических и части северных бореальных ландшафтов, многолетняя мерзлота летом при разреженной растительности вызывает поглощение тепла почвой, которое снижает температуру поверхности и, следовательно, поток тепла в атмосферу. При переходе в среднюю тайгу, где доминируют хвойные вечнозеленые леса, рост суммарной радиации увеличивает проводимость полога. В южной тайге с более разнообразной растительностью и густым пологом растет эвапотранспирация (Wild et al., 2013; Eugster et al., 2000). В результате горизонтальный градиент потоков тепла увеличивается между этими природными зонами.

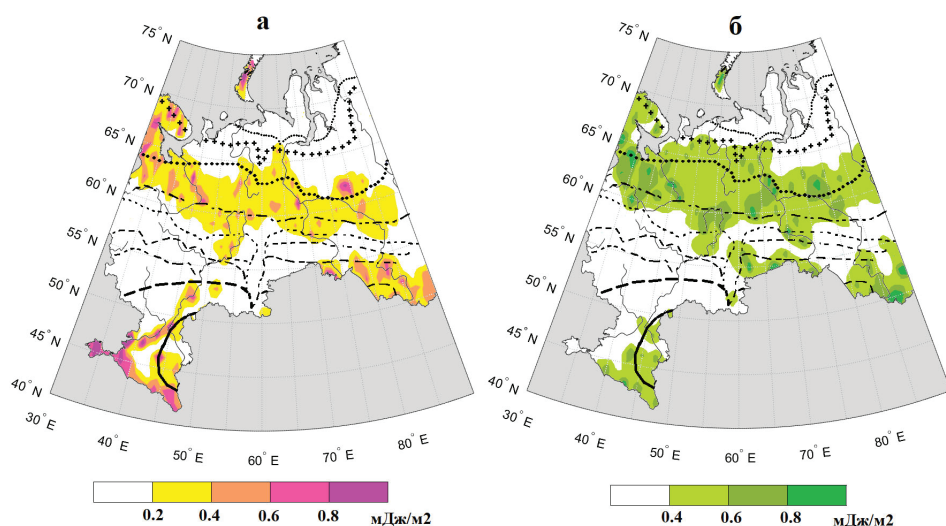


Рисунок 3. Горизонтальные градиенты потоков теплообмена на равнинах России за июнь–август, в расчете на 1° широты и долготы за 1991–2020
а) явного тепла, б) скрытого тепла. Условные обозначения см. рис. 1

Figure 3. Horizontal gradients of heat fluxes at the plains of Russia, from June to August, per 1° of latitude and longitude, 1991–2020
a) sensible heat, b) latent heat. For legend see Fig. 1

Вторая полоса повышенных горизонтальных градиентов явного тепла проходит в суббореальных ландшафтах сухой степи на ЕТР и в степях ЗС (см. рис. 2а). В зоне степей возрастает поток результирующей радиации, увеличивается дефицит почвенной влаги и уменьшается сумма летних осадков (Guo Zhang et al., 2010; Bonan, 2015). Эта полоса повышенных горизонтальных градиентов потоков тепла сопровождается максимальными горизонтальными градиентами летней температуры воздуха, а также *июльских осадков* и характеристик поверхности (NDVI, эвапотранспирации, влажности почвы) (Титкова, Золотокрылин, 2020, 2022).

Тренды горизонтальных градиентов вертикальных потоков тепла

Зоны максимальных трендов потоков явного и скрытого тепла сопряжены с областями повышенной неоднородности растительного компонента ландшафтов. Пространственная неоднородность турбулентного теплообмена увеличилась в начале XXI века в основном севернее самих областей с максимальными горизонтальными градиентами турбулентного теплообмена (рис. 4). Заметный рост турбулентного теплообмена отмечается в субарктических ландшафтах ЗС. Это касается в основном потоков скрытого тепла при мозаичном увеличении потоков явного тепла. На увеличение турбулентного теплообмена влияет общий положительный тренд средней летней температуры в этом районе до $0.4-0.6^\circ / 10$ лет (Третий..., 2022), а также участвовавшие здесь положительные аномалии летних температур, в особенности в июне и августе (Титкова, Золотокрылин, 2023).

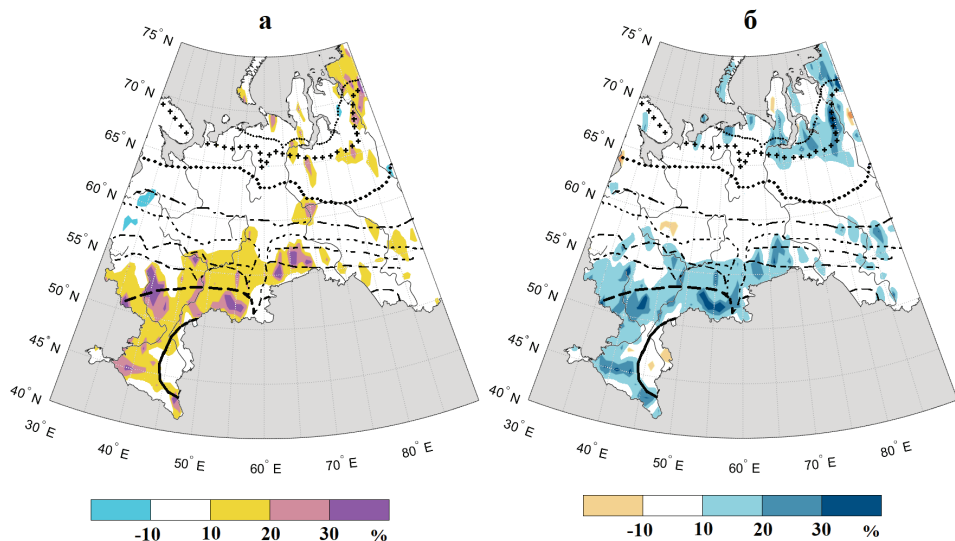


Рисунок 4. Значимый линейный тренд градиентов (% / 10 лет) потоков теплообмена за июнь-август 1991-2020 гг.

а) явного тепла, б) скрытого тепла. Тренд значим при значениях $> (<) 10\%$.
Условные обозначения см. рис. 1

Figure 4. Significant linear trend of gradients (% / 10 лет) of heat fluxes, from June to August, 1991-2020

а) sensible heat, б) latent heat. The trend is significant at values $> (<) 10\%$.
For legend see Fig. 1

Значимый рост трендов потоков явного тепла отмечается в суббореальных ландшафтах ЕТР (степь и частично лесостепь). Здесь за 1991-2020 гг. наблюдалось усиление температурных градиентов, что привело к активному росту турбулентного теплообмена, снижению влажности почвы и эвапотранспирации, значительному иссушению территории (Титкова, Золотокрылин, 2022).

Межгодовое изменение горизонтальных градиентов потоков теплообмена в некоторых ландшафтных зонах ЕТР и ЗС представлено на рис. 5. Значимый тренд горизонтальных градиентов потоков тепла отмечается в лесотундре ЗС, а также в степных и сухостепных ландшафтах ЕТР и ЗС. Горизонтальный тренд градиентов в зоне среднетаежных ландшафтов ЕТР и ЗС с наибольшими горизонтальными градиентами тепла не выражен.

Обсуждение результатов и выводы

На равнинах России выявлены районы повышенной пространственной неоднородности турбулентного теплообмена. Одним из природных рубежей повышенных горизонтальных градиентов теплообмена на ЕТР и ЗС летом является вся зона средней тайги с примыкающими к ней частями как северной, так и южной тайги. В летний период здесь проходит квазистационарная вторичная ветвь климатического Арктического фронта, которая разделяет субарктический (арктический трансформированный) и умеренный воздух. Она локализуется в западной части ЕТР в зоне южнотаежных лесов, ближе к Уралу – в зоне среднетаежных лесов, а в Западной Сибири – в области перехода от среднетаежных к северотаежным лесам (Титкова и др., 2015). Для этой территории характерна повышенная повторяемость выхода циклонов, поступающих из Атлантико-Европейского сектора (Бардин и др., 2015). Повышенная циклоническая активность связана с положением высотной фронтальной зоны, возникающей на стыке холодных и теплых воздушных масс (Вязилова, Вязилов, 2020). Согласно климатическому районированию, западная часть территории характеризуется влажным климатом с умеренно теплым летом и мягкой зимой. Отношение Боуэна составляет в среднем 0.5.

Второй природный рубеж пространственной неоднородности потоков тепла проходит в суббореальных ландшафтах, где возрастает поток результирующей радиации, увеличивается дефицит почвенной влаги и уменьшается сумма летних осадков. Здесь отмечаются повышенные горизонтальные градиенты климатических параметров и характеристик поверхности (Титкова, Золотокрылин, 2022). Климат этих ландшафтов континентальный, отличается большей продолжительностью безморозного периода и большей сухостью. Отношение Боуэна здесь больше 1.

Неоднородность турбулентного теплообмена увеличилась в начале XXI века севернее самих областей с максимальными горизонтальными градиентами турбулентного теплообмена. В субарктических ландшафтах ЗС на это влияет общий положительный тренд летней температуры с участвовавшими здесь положительными аномалиями температуры (Третий, 2022; Титкова, Золотокры-

лин, 2023). В суббореальных ландшафтах на значимый рост потоков теплообмена оказывает влияние рост летних температур и уменьшение увлажнения (Титкова, Золотокрылин, 2022). Летнее увеличение неоднородности теплообмена на фоне увеличения температуры вызывается ростом повторяемости атмосферных блокингов на востоке ЕТР и западе Сибири (Бардин, 2019; Бардин, 2021).

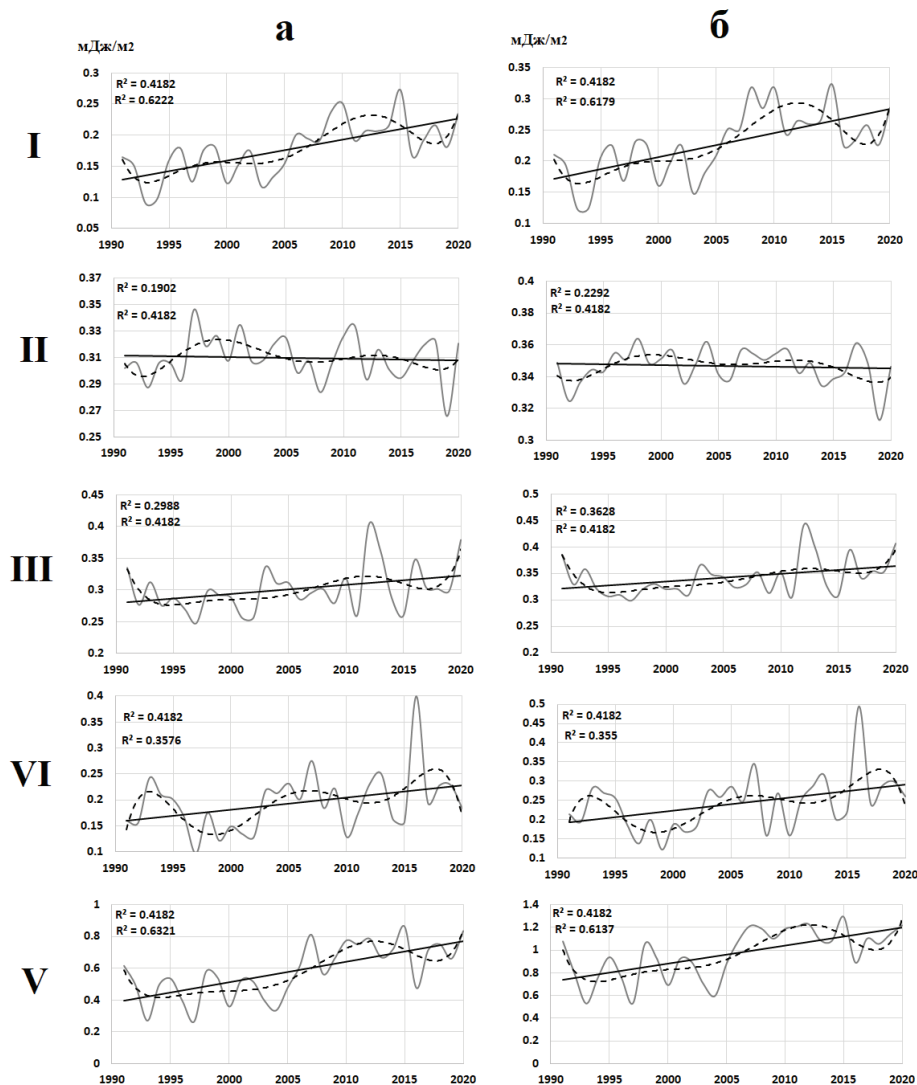


Рисунок 5. Изменения горизонтальных градиентов потоков теплообмена в некоторых ландшафтных зонах Европейской территории России и Западной Сибири за летний период с линейным трендом и полиномом 6-й степени: а) явное тепло, б) скрытое тепло
Ландшафтные зоны: I лесотундра Западной Сибири, II средняя тайга Европейской части России, III средняя тайга Западной Сибири, IV степь Европейской части России, V сухая степь Европейской части России

Figure 5. Changes in horizontal gradients of heat fluxes in some landscape zones of the European territory of Russia and Western Siberia, for the summer period with linear trend and polynomial of degree 6: а) sensible heat, б) latent heat
Landscape zones: I forest tundra of Western Siberia, II middle taiga of the European part of Russia, III middle taiga of Western Siberia, IV steppe of the European part of Russia, V dry steppe of the European part of Russia

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00047 «Структура потоков тепла и влаги в зональных равнинных ландшафтах России в условиях глобального потепления».

Список литературы

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В., Самохина, О.Ф. (2021) Долгопериодные изменения повторяемости циклонов в умеренных широтах Северного полушария, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 7, № 2, с. 57-80, doi: 10.21513/2410-8758-2021-2-57-80.

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В., Самохина, О.Ф. (2019) Изменчивость антициклонической активности в умеренных широтах Северного полушария, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 3, с. 32-58, doi: 10.21513/0207-2564-2019-3-32-58.

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В., Самохина, О.Ф. (2015) Особенности изменчивости циклонической активности в умеренных широтах Северного полушария, связанные с ведущими модами циркуляции в Атлантико-Европейском секторе, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 2, с. 14-40.

Вязилова, Н.А., Вязилов, А.Е. (2020) Климатологии штормовых циклонов, выходящих на европейскую территорию России из различных районов генезиса, *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, № 186, с. 90-100.

Григорьев, А.А., Будыко, М.И. (1965) Связь балансов тепла и влаги с интенсивностью географических процессов, *Доклады Академии наук СССР*, т. 162, № 1, с. 151.

Тепловодообмен в мерзлотных ландшафтах Восточной Сибири и его факторы (2007) Тверь, ИГРАН, ИМСО, Изд. Москва, 576 с.

Титкова, Т.Б., Золотокрылин, А.Н. (2023) Климат зональных ландшафтов равнин России при современном глобальном потеплении в летний период, *Известия, серия географическая*, т. 87, № 3, с. 391-402, doi: 10.31857/S2587556623030111.

Титкова, Т.Б., Золотокрылин, А.Н. (2022) Летние климатические изменения на юге Европейской России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 1, с. 107-121, doi: 10.21513/2410-8758-2022-1-107-121.

Титкова, Т.Б., Золотокрылин, А.Н., Виноградова, В.В. (2020) Климатический рубеж в Северном Прикаспии: индикаторы и размещение, *Известия РАН, серия географическая*, т. 84, № 6, с. 864-873, doi: 10.31857/S2587556620050167.

Титкова, Т.Б., Виноградова, В.В., Михайлов, А.Ю. (2015) Климатические вариации Арктического фронта в теплый период года и их проявления в

ландшафтах севера, *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, № 4, с. 39-46.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2022) под ред. В.М. Катцова, Росгидромет, Санкт-Петербург, Наукоемкие технологии, 676 с.

Bonan, G. (2015) Surface Energy Fluxes, *Ecological Climatology: Concepts and Applications*, 3rd edn., Cambridge University Press, available at: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107339200>.

Eugster, W. et al. (2000) Land-atmosphere energy exchange in Arctic tundra and boreal forest: available data and feedbacks to climate, *Glob. Chang. Biol.*, vol. 6, pp. 84-115.

Gulev, S.K., Belyaev, K. (2012) Probability Distribution Characteristics for Surface Air–Sea Turbulent Heat Fluxes over the Global Ocean, *Journal of Climate*, vol. 25, no. 1, pp. 184-206, doi: 10.1175/2011jcli4211.1.

Guo, Zhang, Guang-Sheng, Zhou, Fu-Lin, Yang (2010) Dynamics of sensible and latent heat fluxes over a temperate desert steppe ecosystem in Inner Mongolia, *Mar*, 21(3), pp. 597-603.

Jacqueline, Oehri et al. (2022) Vegetation type is an important predictor of the arctic summer land surface energy budget, *Nature Communications*, vol. 13(1), p. 6379, doi: 10.1038/s41467-022-34049-3.

Muñoz-Sabater, J. et al. (2021) ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 13, pp. 4349-4383, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>.

Kodama, Y., Ishii, Y., Nomura, M., Sato, N., Yabuki, H., Ohata, T. (2000) Seasonal energy exchange over tundra region near Tiksi, *Eastern Siberia, Act. Rep. GAME-Siberia*, pp. 13-14.

Kropp, H. et al. (2020) Shallow soils are warmer under trees and tall shrubs across Arctic and Boreal ecosystems, *Environ. Res. Lett.*, no. 16, p. 015001.

Wild, M., Folini, D., Schar, C., Loeb, N., Dutton, E.G., Konig-Langlo, G. (2013) The global energy balance from a surface perspective, *Clim. Dyn.*, no. 40, pp. 3107-3134.

References

Bardin, M.Yu., Platova, T.V., Samokhina, O.F. (2021) Dolgoperiodnye izmeneniya povtoryaemosti ciklonov v umerennyh shirotah severnogo polushariya [Long-period variations of cyclone frequency in the northern extratropics], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 7, no. 2, pp. 57-80, doi: 10.21513/2410-8758-2021-2-57-80.

Bardin, M.Yu., Platova, T.V., Samokhina, O.F. 2019. Izmenchivost' anticiklonicheskoy aktivnosti v umerennyh shirotah Severnogo polushariya

[Variability of anti-cyclonic activity in the northern extratropics], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, no. 3, pp. 32-58, doi: 10.21513/0207-2564-2019-3-32-58.

Bardin, M.Yu., Platova, T.V., Samokhina, O.F. (2015) Osobennosti izmenchivosti ciklonicheskoy aktivnosti v umerenny'x shirotax Severnogo polushariya, svyazanny'e s vedushhimi modami cirkulyacii v Atlantiko-Evropejskom sektore [Features of the variability of cyclonic activity in the temperate latitudes of the Northern Hemisphere associated with the leading circulation modes in the Atlantic-European sector], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, no. 2, pp. 14-40.

Vyazilova, N.A., Vyazilov, A.E. (2020) Klimatologii shtormovy'x ciklonov, vy'xodyashhix na evropejskuyu territoriyu Rossii iz razlichny'x rajonov genezisa [Climatology of storm cyclones entering the European territory of Russia from various regions of genesis], *Trudy VNIIGMI-MCD*, no. 186, pp. 90-100.

Grigoriev, A.A., Budyko, M.I. (1965) Svyaz' balansov tepla i vlagi s intensivnost'yu geograficheskix processov [Relationship between heat and moisture balances and the intensity of geographic processes], *Doklady Akademii nauk SSSR*, vol. 162, no. 1, p. 151.

Teplovodoobmen v merzlotny'x landshaftax Vostochnoj Sibiri i ego faktory' [Heat and water exchange in the permafrost landscapes of Eastern Siberia and its factors] (2007) IGRAN, IMSO, Tver, Moscow, Russia, 576 p.

Titkova, T.B., Zolotokrylin, A.N. (2023) Klimat zonal'ny'x landshaftov ravnin Rossii pri sovremennom global'nom poteplenii v letnij period [Climate of zonal landscapes of the Russian plains under modern global warming in the summer], *Izvestiya ser. Geograficheskaya*, vol. 87, no. 3, pp. 391-402, doi: 10.31857/S2587556623030111.

Titkova, T.B., Zolotokrylin, A.N. (2022) Letnie klimaticheskie izmeneniya na yuge Evropejskoj Rossii [Summer climate changes in the south of European Russia], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 8, no. 1, pp. 107-121, doi: 10.21513/2410-8758-2022-1-107-121.

Titkova, T.B., Zolotokrylin, A.N., Vinogradova, V.V. (2020) Klimaticheskij rubezh v Severnom Prikaspii: indikatory i razmeshchenie [Climatic Frontier in the Northern Caspian Region: Indicators and Location], *Izvestiya RAN, seriya geograficheskaya*, no. 6, pp. 864-873, doi: 10.31857/S2587556620050167.

Titkova, T.B., Vinogradova, V.V., Mixajlov, A.Yu. (2015) Klimaticheskie variacii Arkticheskogo fronta v teply'j period goda i ix proyavleniya v landshaftax severa [Climatic variations of the Arctic front in the warm season and their manifestations in the landscapes of the north], *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, no. 4, pp. 39-46.

Tretij ocenochnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii [The third assessment report on climate change and

its consequences on the territory of the Russian Federation] (2022) In V.M. Kattsov, High technology, Roshydromet, St. Petersburg, Russia, 676 p.

Bonan, G. (2015) Surface Energy Fluxes, *Ecological Climatology: Concepts and Applications*, 3rd edn., Cambridge University Press, available at: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107339200>.

Eugster, W. et al. (2000) Land-atmosphere energy exchange in Arctic tundra and boreal forest: available data and feedbacks to climate, *Glob. Chang. Biol.*, vol. 6, pp. 84-115.

Gulev, S.K., Belyaev, K. (2012) Probability Distribution Characteristics for Surface Air–Sea Turbulent Heat Fluxes over the Global Ocean, *Journal of Climate*, vol. 25, no. 1, pp. 184-206, doi: 10.1175/2011jcli4211.1.

Guo, Zhang, Guang-Sheng, Zhou, Fu-Lin, Yang (2010) Dynamics of sensible and latent heat fluxes over a temperate desert steppe ecosystem in Inner Mongolia, *Mar*, 21(3), pp. 597-603.

Jacqueline, Oehri et al. (2022) Vegetation type is an important predictor of the arctic summer land surface energy budget, *Nature Communications*, vol. 13(1), p. 6379, doi: 10.1038/s41467-022-34049-3.

Muñoz-Sabater, J. et al. (2021) ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications, *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 13, pp. 4349-4383, available at: <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>.

Kodama, Y., Ishii, Y., Nomura, M., Sato, N., Yabuki, H., Ohata, T. (2000) Seasonal energy exchange over tundra region near Tiksi, *Eastern Siberia, Act. Rep. GAME-Siberia*, pp. 13-14.

Kropp, H. et al. (2020) Shallow soils are warmer under trees and tall shrubs across Arctic and Boreal ecosystems, *Environ. Res. Lett.*, no. 16, p. 015001.

Wild, M., Folini, D., Schar, C., Loeb, N., Dutton, E.G., Konig-Langlo, G. (2013) The global energy balance from a surface perspective, *Clim. Dyn.*, no. 40, pp. 3107-3134.

Поступила в редакцию: 25.09.2023 г.

Доработана после рецензирования: 17.10.2023 г.

Принята к публикации: 06.11.2023 г.

Для цитирования / For citation:

Титкова, Т.Б., Золотокрылин, А.Н. (2023) Пространственная неоднородность летнего турбулентного теплообмена на равнинах России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 4, с. 467-481, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-467-481.

Titkova, T.B., Zolotokrylin, A.N. (2023) The spatial heterogeneity of the summer turbulent heat exchange on the plains of Russia, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 4, pp. 467-481, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-467-481.

Сезонные и географические особенности вертикальной структуры трендов температуры в атмосфере Земли (в слое 0-30 км), оцененные по данным радиозондирования

О.А. Алдухов, И.В. Черных*

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных»,
Россия, 249035, г. Обнинск, ул. Королева 6

* Адрес для переписки: civ@meteo.ru

Реферат. Информация о вертикальной структуре трендов температуры воздуха в атмосфере, полученная на основе наблюдений, необходима для исследования изменений климата. Статья представляет серии трендов первого и второго порядка для температуры воздуха на стандартных высотах в атмосферном слое 0-30 км над уровнем моря для различных месяцев, сезонов, для года – в целом для земного шара, Северного и Южного полушарий за период радиозондовых наблюдений 1964-2018 гг. Цель данной статьи и ряда других работ авторов – показать долгопериодные изменения в атмосфере за один период наблюдений для основных аэрологических величин. Исследования проведены на основе данных глобального массива результатов радиозондирования атмосферы *CARDS*, дополненных текущими данными, собираемыми с каналов связи в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». Метод интерполяции на базе кубического сплайна Акимы был использован для расчетов значений температуры воздуха на основе стандартных уровней по давлению и особых точек вертикального профиля. Линейные тренды были рассчитаны для каждой станции с помощью метода наименьших квадратов. Статистики, полученные для каждой станции, были осреднены с учетом площади влияния станции. Для земного шара и обоих полушарий было найдено следующее. Вертикальная структура линейных трендов первого и второго порядка аномалий температуры воздуха неоднородна в слое 0-30 км. Потепление в слое 0-8 км и похолодание в слое 16-30 км зафиксировано для всех месяцев. По мере приближения к 2018 г. наибольшее усиление изменения температуры воздуха при рассмотрении года в целом определено в слоях 6-10 и 14-16 км. Соответствующие тренды были определены с доверительной вероятностью более 95%.

Ключевые слова. Климат, температура, атмосфера, данные радиозондирования, земной шар, Северное, Южное, полушарие.

Seasonal and geographical features of the vertical structure of temperature trends in the Earth's atmosphere (in the 0-30 km layer) assessed using radiosonde data

O.A. Aldukhov, *I.V. Chernykh**

Russian Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center,
6, Koroleva str., 249035, Obninsk, Russian Federation

* Correspondence address: *civ@meteo.ru*

Abstract. The information about the vertical structure of trends in the atmospheric air temperature obtained from observations is necessary to study climate change. The paper presents the series of the first- and second-order trends in air temperature at standard heights in the 0-30 km atmospheric layer above sea level. Trends are obtained from radiosonde observations over the period of 1964-2018 for different months, seasons and for the year as a whole, for the globe and for the Northern and Southern Hemispheres. The goal of this paper and some other research papers is to show the longtime changes in the atmosphere for the main aerological values over one period of observations. Results of observations from the *CARDS* global aerological dataset that were updated with the current data from RIHMI-WDC were used in this research. The Akima cubic spline interpolation method was used to calculate air temperature values on the basis of standard pressure levels and specific points of vertical profiles. The linear trends were estimated for each station by using the least squares method. The statistics obtained for all stations were averaged taking into account the area of the station influence. The following was found for the globe and for both hemispheres. The vertical macrostructures of the first-order and second-order linear trends in air temperature anomalies are not uniform in the 0-30 km atmospheric layer above sea. Warming at 0-8 km and cooling at 16-30 km were detected for all months. With approaching to 2018 the highest intensifying in air temperature changes was fixed at 6-10 km and at 14-16 km for the year as a whole. The corresponding trends were detected with confidence level of more than 95%.

Keywords. Climate, temperature, atmosphere, radiosonde data, globe, Northern Hemisphere, Southern Hemisphere.

Введение

В связи с происходящими изменениями климата (Hartmann et al., 2013; Стерин, 2004; Груза и др., 1992; Ранькова, 2005; Бекряев, 2022) информация о вертикальной структуре трендов аэрологических величин, полученная на основе данных наблюдений, необходима для исследования климата атмосферы и его изменений. Знания об изменениях температуры, включая структурные изменения и изменения во взаимосвязи между тропосферой и стратосферой, имеют большое значение для понимания динамики атмосферы и ее воздействия на глобальный и региональный климат. Однако данные о тренде призем-

ной температуры, особенно над сушей, имеют ряд ограничений, которые могут внести неопределенность, т.к. на данные приповерхностной температуры оказывают влияние эффекты пограничного слоя, такие, как инверсии, кроме того, на них влияют урбанизация или другие изменения окружающей среды.

Суть современных тенденций изменения температуры в свободной атмосфере сводится к потеплению в тропосфере (850-300 гПа) и похолоданию в нижней стратосфере (100-50 гПа) (Доклад ..., 2020, 2021; Стерин, 1999; 2004; Hartmann et al., 2013; IPCC 2014). В данной работе приведены оценки трендов аномалий температуры воздуха на стандартных высотах в слое атмосферы 0-30 км над уровнем моря с учетом сезонных и географических особенностей. Знания о вертикальной структуре трендов температуры в атмосфере Земли могут быть полезны для принятия оптимальных стратегий реагирования на происходящие изменения климата атмосферы.

Следует отметить, что на величину расчетных трендов влияет выбор исходного массива данных, а также период, за который они оценивались (Стерин, 2004; Груза и др., 1992). В частности, оценки трендов за различные периоды (т.н. скользящие периоды) выполнялись в т.ч. в работе (Ранькова, 2005).

Исследования вертикальной структуры многолетних статистик аэрологических величин и ее долгопериодных изменений были проведены авторами для отдельных станций (Алдухов, Черных, 2015), для земного шара в целом (Aldukhov, Chernykh, 2019; Chernykh, Aldukhov, 2020), а также для его отдельных регионов, в частности для Арктики (Алдухов, Черных, 2018; Черных, Алдухов, 2020) за разные периоды радиозондовых наблюдений. Ряд работ был посвящен исследованию вертикальной структуры трендов аэрологических величин в разных атмосферных слоях за один период радиозондовых наблюдений 1964-2018 гг., например, температуры и влажности воздуха в атмосферном слое 0-2 км (Алдухов, Черных, 2021; Chernykh, Aldukhov, 2020); относительной влажности в слое 0-30 км (Chernykh, Aldukhov, 2022).

При изучении изменений климата важны оценки линейных трендов во временных рядах аномалий средних значений основных метеорологических величин и их среднеквадратических отклонений (σ) (тренды первого порядка), а также оценки их изменения в зависимости от периода расчета трендов (тренды второго порядка).

Данная работа является частью исследований вертикальной структуры трендов аэрологических величин на уровне земли и в разных атмосферных слоях за один период радиозондовых наблюдений 1964-2018 гг. Цель статьи – исследовать внутригодовые изменения вертикальной структуры трендов первого и второго порядка температуры воздуха (T) в атмосферном слое 0-30 км над уровнем моря для Северного и Южного полушария на фоне ее изменения для земного шара, по данным радиозондирования за 1964-2018 гг. Для достижения этой цели были рассчитаны средние значения, тренды первого и второго порядка аномалий средних значений температуры воздуха и соответствующих значений среднеквадратических отклонений на стандартных высотах в слое атмосферы 0-30 км над уровнем моря для различных месяцев, сезонов и года – в целом для земного шара, Северного и Южного полушарий за

указанный выше период радиозондовых наблюдений; проведен совместный анализ внутригодовых изменений их вертикальной структуры; определены соответствующие интервалы внутригодовых изменений рассчитанных статистик для стандартных высот в изучаемом слое атмосферы и месяцы, в которые были отмечены абсолютные минимумы и максимумы статистических характеристик, а также высоты, на которых они были зафиксированы.

Методы и материалы

Предметом особого внимания при использовании глобальных данных радиозондовых наблюдений для климатических оценок являются качество и однородность данных, используемых при расчетах (Доклад..., 2020, 2021; Стерин, 1999; 2004; Eskridge et al., 1995). Анализ данных аэрологических наблюдений имеет свою специфику по сравнению с другими метеорологическими наблюдениями, т.к. на многих уровнях в атмосфере имеется множество пропусков. Основная причина этого – недостаточная высота подъема радиозонда. Данные по тропосфере являются более благополучными как в отношении обеспеченности, так и относительно возникновения систематических ошибок, связанных с максимальной высотой полета зондов (Стерин, 2004). Однако, кроме изменений максимальной высоты полетов зондов, существуют и другие источники возможной неоднородности рядов температуры, полученных по данным радиозондирования (недостаточное число точек наблюдения, и их неравномерное географическое распределение, смена датчиков, изменение методик, алгоритмов и программ обработки) (Eskridge et al. 1995; Gaffen, 1993). При анализе результатов расчетов необходимо учитывать, что наиболее плотно аэрологическими станциями покрыты умеренные широты Северного полушария и сравнительно редко – Южного полушария, Африка и океанские территории. Одной из основных характеристик радиозондирования атмосферы является его вертикальное разрешение, которое в долгопериодных массивах со временем в основном увеличивается в связи с развитием системы радиозондирования. За 1964-2017 гг. многолетнее глобальное среднее разрешение для слоя атмосферы 0-30 км составляет около 0.7 км, для нижнего слоя тропосферы оно существенно более высокое и составляет около 0.4 км, соответственно многолетнее глобальное среднее число уровней наблюдения составляет 42 уровня и 8 уровней (Алдухов, Черных, 2015).

Исследования были проведены на основе данных глобального массива результатов радиозондирования атмосферы *CARDS* (Comprehensive Aerological Reference Data Set) (Eskridge et al., 1995), прошедших процедуру комплексного контроля качества (Алдухов, Черных, 2013) и дополненных проконтролированными текущими данными, собираемыми с каналов связи в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» (Руденкова, 2010), для периода 1964-2018 гг. Для расчетов были включены только наблюдаемые и восстановленные во время прохождения процедуры контроля значения. Необходимым условием для включения станции в исследование было наличие наблюдений за 15 лет из полного периода наблюдений, включая 2018 г. После нескольких этапов обработки исходных данных по

глобальной аэрологической сети: объединения близкорасположенных станций, взаимно заменяемых в процессе эксплуатации, исключения коротких и очень старых рядов наблюдения, был сформирован массив данных по 774 станциям глобальной аэрологической сети за период 1964-2018 гг.

Выбор периода наблюдений 1964-2018 гг. обусловлен тем фактом, что за более ранний период, конец 1950-х – начало 1960-х годов, однородных данных радиозондовых наблюдений на глобальной аэрологической сети недостаточно для климатических расчетов ввиду ряда причин (Алдухов, Черных, 2013; Зайцева, 1990; Стерин, 2004). При расчетах были использованы данные радиозондовых измерений, проводимых в сроки 0 и 12 ч ВСВ (Всемирное скоординированное время).

Условием для включения месяца в расчеты трендов было наличие 15 измерений за месяц и 15 лет из рассматриваемого 55-летнего периода наблюдений, включая 2018 г. Если число наблюдений за месяц на некотором уровне составляло менее 30% от среднего числа наблюдений на всех уровнях в слое 0-30 км, то данные на таком уровне в расчеты не включены. Это сделано для возможности объективного сопоставления результатов расчетов на разных уровнях.

Метод интерполяции на базе кубического сплайна Акимы (Де Бор, 1985) был использован для расчетов значений T на стандартных высотах в слое 0-30 км над уровнем моря на основе стандартных уровней по давлению и особых точек вертикального профиля. Согласно (Алдухов, Черных, 2013) она обеспечивает для большинства аэрологических параметров наиболее точную интерполяцию с наименьшей погрешностью по сравнению с другими ее видами. Долгопериодные тенденции изменения метеорологических величин, характеризующих состояние климатической системы, исследовались с использованием метода наименьших квадратов.

В (Aldukhov, Chernykh, 2020) для изучения характера долгопериодных изменений метеорологических величин, в частности, для возможности предположения об изменении трендов в следующие ближайшие годы, были введены логически обоснованные понятия трендов первого и второго порядка. Напомним их определения. Рассмотрим линейную аппроксимацию $\tilde{F}(t, t_0, t_1)$ метеовеличины $F(t)$ на временном отрезке $t \in [t_0, t_1]$:

$$\tilde{F}(t, t_0, t_1) = a_1(t_0, t_1) \cdot t + b_1(t_0, t_1), \quad t_0 \leq t \leq t_1,$$

которая минимизирует интеграл квадрата разности $\tilde{F}(t, t_0, t_1) - F(t)$ на временном отрезке $t \in [t_0, t_1]$:

$$\int_{t_0}^{t_1} \left(\tilde{F}(t, t_0, t_1) - F(t) \right)^2 \cdot dt \rightarrow \min.$$

Трендом первого порядка является коэффициент $a_1(t_0, t_1)$. Он показывает среднюю скорость изменения $F(t)$ на изучаемом временном отрезке $t \in [t_0, t_1]$ и соответствует классическому линейному тренду. Как отмечалось выше, на величину расчетных трендов влияет выбор исходного массива данных, а

также период, за который они оценивались (Груза и др., 1992; Ранькова, 2005; Стерин, 2004). При анализе достаточно длинного ряда значений метеовеличины $F(t)$ возникает вопрос о том, как скорость изменения метеовеличины $F(t)$ зависит от начальной точки t_0 по мере приближения ее к t_1 – концу отрезка? Для ответа на этот вопрос процедура линейной аппроксимации была применена к временным рядам трендов первого порядка $a_1(\tau, t_1)$:

$$\tilde{a}_1(\tau, t_0, t_1) = a_2(t_0, t_1) \cdot \tau + b_2(t_0, t_1), \quad \tau \in [t_0, t_1] .$$

Трендом второго порядка является коэффициент $a_2(t_0, t_1)$. Он показывает среднюю скорость изменения тренда первого порядка в зависимости от приближения начальной точки отрезка t_0 к фиксированной конечной точке t_1 .

Для определения значимости трендов использовался критерий Стьюдента. На рисунках тренды с доверительной вероятностью не менее 95% отмечены сеткой.

Для аномалий средних значений температуры воздуха на стандартных высотах в изучаемом слое атмосферы для месяцев, сезонов и года в целом были рассчитаны тренды первого и второго порядка. Тренды второго порядка были оценены по соответствующим временным рядам трендов первого порядка за последовательно уменьшающиеся на один год периоды наблюдения 1964-2018, 1965-2018, ... до 2003-2018 гг. При вычислении аномалий за базовый период (период осреднения при расчете среднего значения метеовеличины, относительно которого рассчитываются аномалии) был выбран полный 55-летний период наблюдений 1964-2018 гг.

Статистики, полученные для каждой станции, были осреднены с учетом площади влияния станции. Статистики для месяцев и сезонов были двукратно сглажены. Было использовано сглаживание по трем точкам, при котором центральной точке присваивался двойной вес, а двум крайним – единичный вес. Использование сглаженных статистических характеристик позволяет более наглядно представить внутригодовые изменения их вертикальной структуры в изучаемых слоях атмосферы.

Для визуализации изменений средних значений и трендов с высотой была использована линейная интерполяция соответствующих значений, рассчитанных для стандартных высот в атмосферном слое 0-30 км над уровнем моря.

Ниже под сезонами подразумеваются: зима: декабрь-февраль; весна: март-май; лето: июнь-август; осень: сентябрь-ноябрь.

В качестве примера на рис. 1 приведены временные ряды годовых аномалий температуры воздуха на уровне земли для земного шара, сглаженные временные ряды, линейные тренды первого и второго порядка аномалий за 1964-2018 гг. Линейные тренды первого и второго порядка за весь период равны 0.12°C за десятилетие и 0.054°C за десятилетие² соответственно. Рис. 2 показывает тренды первого и второго порядка для временных рядов годовых значений среднеквадратических отклонений температуры, они равны -0.053°C за десятилетие и 0.016°C за десятилетие². Все эти тренды определены с доверительной вероятностью 99 %.

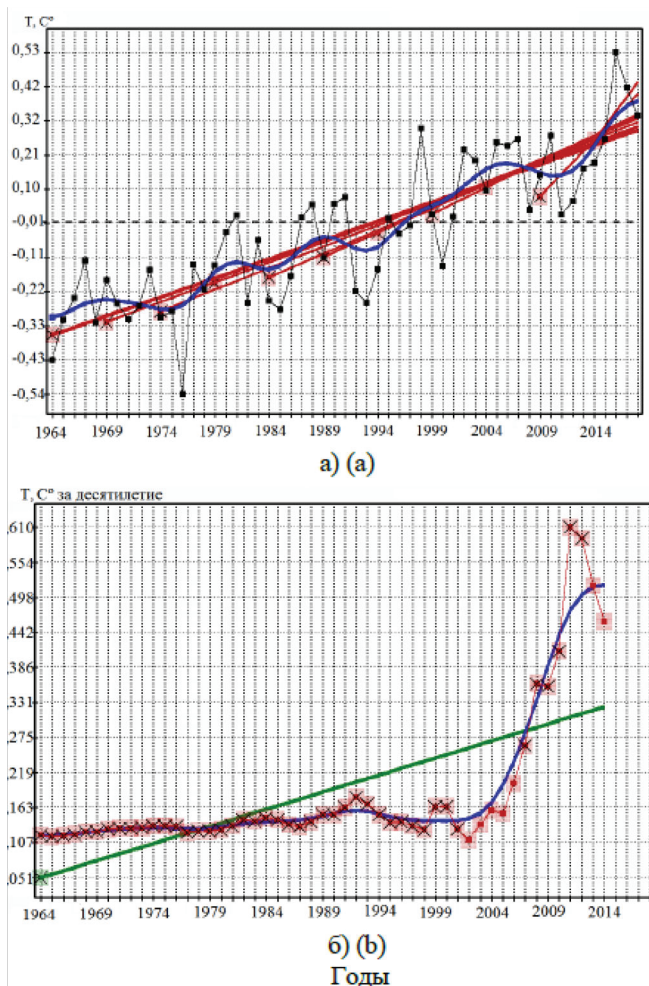


Рисунок 1. Тренды первого (а, C° за десятилетие) и второго (б, C° за десятилетие²) порядка аномалий средних годовых значений температуры воздуха T (C°) на уровне земли для земного шара, определенные для периода наблюдений 1964-2018 гг.

Аномалии были вычислены по отношению к многолетним средним значениям T за полный период. Черные точки (а) – временные ряды аномалий средних годовых значений температуры T (C°) на уровне земли; красные линии (а) – тренды первого порядка аномалий средних годовых значений температуры T (C°) на уровне земли для периодов с 5-летним шагом: 1964-2018, 1969-2018, ... 2009-2018 гг.; красные точки (б) – временные ряды трендов первого порядка для соответствующих периодов с шагом в 1 год; голубые линии – соответствующие сглаженные временные ряды; зеленые линии – соответствующие тренды второго порядка

Figure 1. First (C° per decade) and second-order (C° per decade²) trends in anomalies of means for annual air temperatures T (C°) at the surface level over the Globe for the observational period of 1964-2018

The anomalies were calculated with respect to the long-term mean values T for the full period. Black points (a) are time series of anomalies of means for annual temperatures T (C°) at the surface level; red lines (a) are the first order trends in anomalies of means for annual temperatures T at the surface level for the corresponding periods with the 5-year step: 1964-2018, 1969-2018, ... 2009-2018; red points (b) are the time series of the first order trends for the corresponding periods with the one-year step, blue lines are the relevant smoothed time series, green lines (b) are the second-order trends

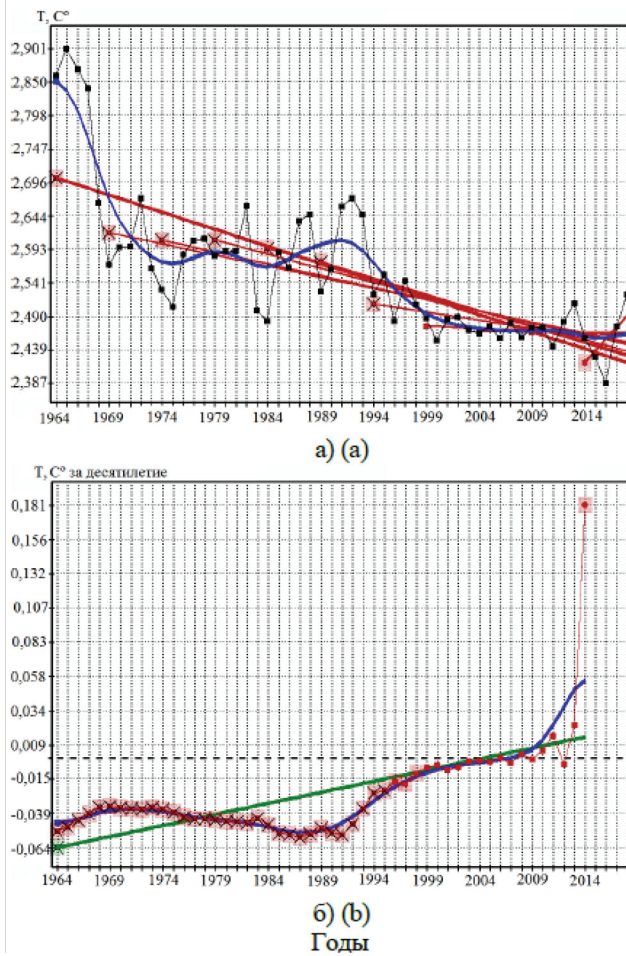


Рисунок 2. Тренды первого (C° за десятилетие) и второго (C° за десятилетие²) порядка среднеквадратических отклонений σ_T температуры воздуха T (C°) на уровне земли для земного шара, определенные по данным наблюдений за 1964-2018 гг.

Черные точки (а) – временные ряды среднеквадратических отклонений σ_T температуры воздуха на уровне земли; красные линии (а) – тренды первого порядка среднеквадратических отклонений σ_T температуры T (C°) на уровне земли для периодов с 5-летним шагом: 1964-2018, 1969-2018, ... 2009-2018 гг.; красные точки (б) – временные ряды трендов первого порядка для соответствующих периодов с шагом в 1 год; голубые линии – соответствующие сглаженные временные ряды; зеленые линии – соответствующие тренды второго порядка

Figure 2. First (C° per decade) and second-order (C° per decade²) trends in standard deviations σ_T for air temperature T at the surface level over the Globe for the observational period of 1964-2018. Black points (a) are time series of standard deviations σ_T for air temperatures T (C°) at the surface level; red lines (a) are the first order trends in standard deviations σ_T for annual temperatures T at the surface level for the corresponding periods with the 5-year step: 1964-2018, 1969-2018, ... 2009-2018; red points (b) are the time series of the first order trends for the corresponding periods with the one-year step, blue lines are the relevant smoothed time series, green lines (b) are the second-order trends

Рис. 1а и 2а демонстрируют, что глобальное потепление на уровне земли было определено вместе с уменьшением среднеквадратических отклонений температуры, соответствующие тренды первого порядка положительные и отрицательные соответственно. Согласно рис. 1б (см. голубые линии) наиболее

значительное увеличение скорости потепления определено начиная с 2002 г. Согласно рис. 2б (см. голубые линии) тренды первого порядка среднеквадратических отклонений температуры будучи отрицательными делают поворот к положительным значениям начиная приблизительно с 1991 г. В результате этого тренды второго порядка среднеквадратических отклонений температуры (см. зеленые линии) становятся слабо положительными.

Результаты

Изменения средних значений T и трендов их аномалий

В табл. 1 представлены диапазоны внутригодовых изменений многолетних средних месячных значений T, трендов первого и второго порядка их аномалий в слое атмосферы 0-30 км для земного шара, Северного и Южного полушарий за период 1964-2018 гг., а также месяцы, в которые были определены соответствующие максимальные и минимальные значения и высоты, на которых они были зафиксированы.

На рис. 3-5 представлена вертикальная структура многолетних средних, трендов первого и второго порядка аномалий температуры в изучаемом слое для разных месяцев, сезонов и года в целом для земного шара (а), Северного (б) и Южного (в) полушарий. Табл. 1 и рис. 3-5 показывают, что вертикальная структура как многолетних средних, так и линейных трендов первого и второго порядка аномалий температуры воздуха неоднородна в пространстве и во времени.

Таблица 1. Диапазоны (Δ) внутригодовых изменений многолетних средних месячных значений T , ($^{\circ}\text{C}$), трендов первого ($^{\circ}\text{C}$ за десятилетие) и второго ($^{\circ}\text{C}$ за десятилетие²) порядка их аномалий в слое атмосферы 0-30 км для земного шара, Северного и Южного полушарий за период 1964-2018 гг.

N – число наблюдений. В числителе в скобках приведен месяц (мм), в который был определен максимум/ минимум и в знаменателе – высота (h), на которой он был определен

Table 1. Ranges (Δ) of intra-annual variations of monthly averaged values for T ($^{\circ}\text{C}$), and the first- ($^{\circ}\text{C}$ per decade) and second-order ($^{\circ}\text{C}$ per decade²) decadal trends in their anomalies in the 0-30-km atmospheric layer for the globe and for the Northern and Southern Hemispheres over the period of 1964-2018

N – is the number of soundings. The numerator shows in brackets the month (mm) in which maximum/ minimum values were determined. The height (h) at which maximum/ minimum values were determined is given in the denominator

$\Delta_{\text{средние}},$ $^{\circ}\text{C} (\text{мм}) / \text{h}$	$\Delta_{\text{тренды 1 порядка}},$ $^{\circ}\text{C за десятилетие} (\text{мм}) / \text{h}$	$\Delta_{\text{тренды 2 порядка}},$ $^{\circ}\text{C за десятилетие}^2 (\text{мм}) / \text{h}$	$N,$ млн
Земной шар			
$\frac{-66.56(01) - 18.69(07)}{17 \text{ км} \quad 00 \text{ км}}$	$\frac{-0.382 (11) - 0.174 (08)}{18 \text{ км} \quad 2 \text{ км}}$	$\frac{-0.038 (06) - 0.171 (11)}{25 \text{ км} \quad 15 \text{ км}}$	23.9
Северное полушарие			
$\frac{-67.17 (12) - 20.98 (08)}{17 \text{ км} \quad 00 \text{ км}}$	$\frac{-0.375 (06) - 0.202 (04)}{20 \text{ км} \quad 1 \text{ км}}$	$\frac{-0.060 (06) - 0.223 (05)}{25 \text{ км} \quad 10 \text{ км}}$	20.7
Южное полушарие			
$\frac{-68.79 (07) - 18.47 (02)}{17 \text{ км} \quad 00 \text{ км}}$	$\frac{-0.526 (11) - 0.164 (09)}{18 \text{ км} \quad 2 \text{ км}}$	$\frac{-0.057 (02) - 0.159 (12)}{25 \text{ км} \quad 15 \text{ км}}$	3.2

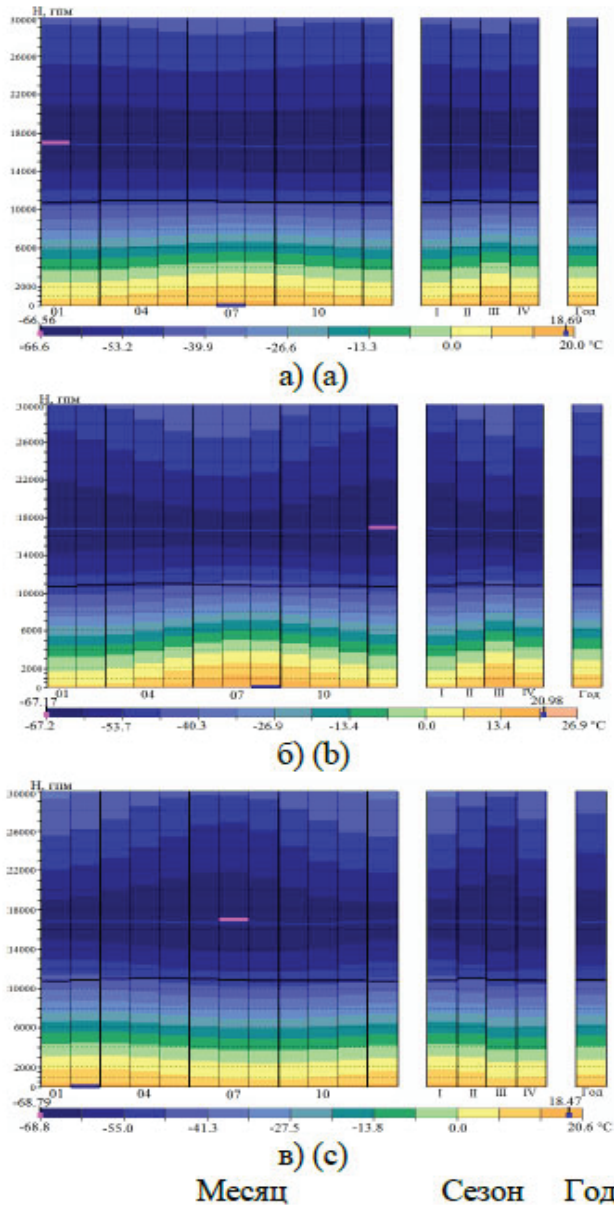


Рисунок 3. Многолетние средние T ($^{\circ}\text{C}$) в слое атмосферы 0-30 км за год в целом, для каждого месяца, сезона. 1964-2018 гг.

На рисунках 1-6: (а) – для земного шара, (б) – для Северного и (в) – для Южного полушарий. Сезоны: I (зима) – ДЯФ, II (весна) – МАМ, III (лето) – ИИА, IV (осень) – СОН. Синие и розовые отрезки соответствуют максимальным и минимальным значениям. Статистики для месяцев и сезонов были двукратно сглажены. Было использовано сглаживание по трем точкам

Figure 3. Long-term means for T ($^{\circ}\text{C}$) in the 0-30-km layer for the year as a whole, for each month and season. 1964-2018

In figures 1-6: (a) – for the Globe, (b) – for the Northern and (c) – for the Southern hemispheres. Seasons: Winter – DJF, spring – MMA, summer – JJA, autumn – SON. Blue and pink segments correspond to maximum and minimum values. The statistics for months and seasons were subject to twofold smoothing. The three-points smoothing was used

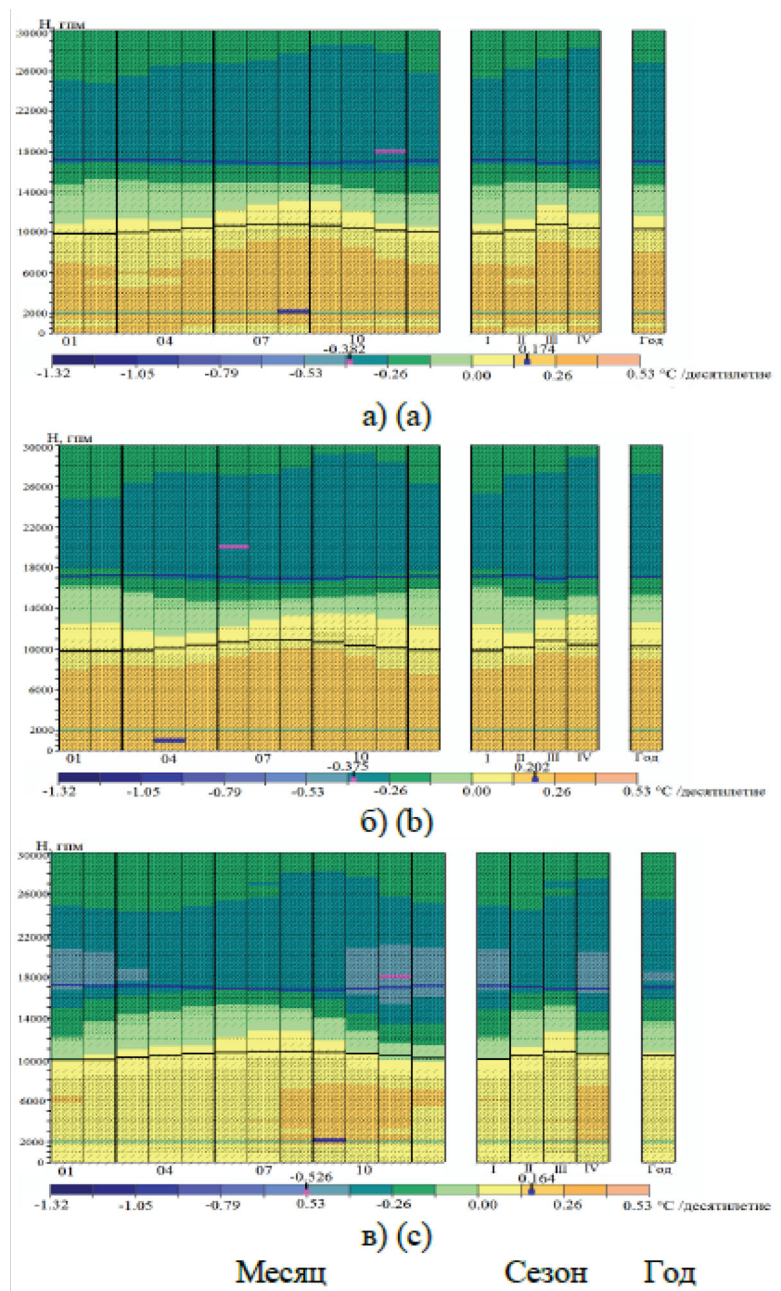


Рисунок 4. Тренды первого порядка аномалий средних значений T ($^{\circ}\text{C}$ за десятилетие) в слое атмосферы 0-30 км за год в целом, для каждого месяца, сезона. 1964-2018 гг.

На рисунках 2, 3, 5, 6 тренды с доверительной вероятностью не менее 95% отмечены сеткой

Figure 4. First-order trends in anomalies of means for T ($^{\circ}\text{C}$ per decade) in the 0-30-km layer for the year as a whole, for each month and season. 1964-2018

In Figures 2, 3, 5, 6 trends with confidence level of not less than 95% are marked by lattice

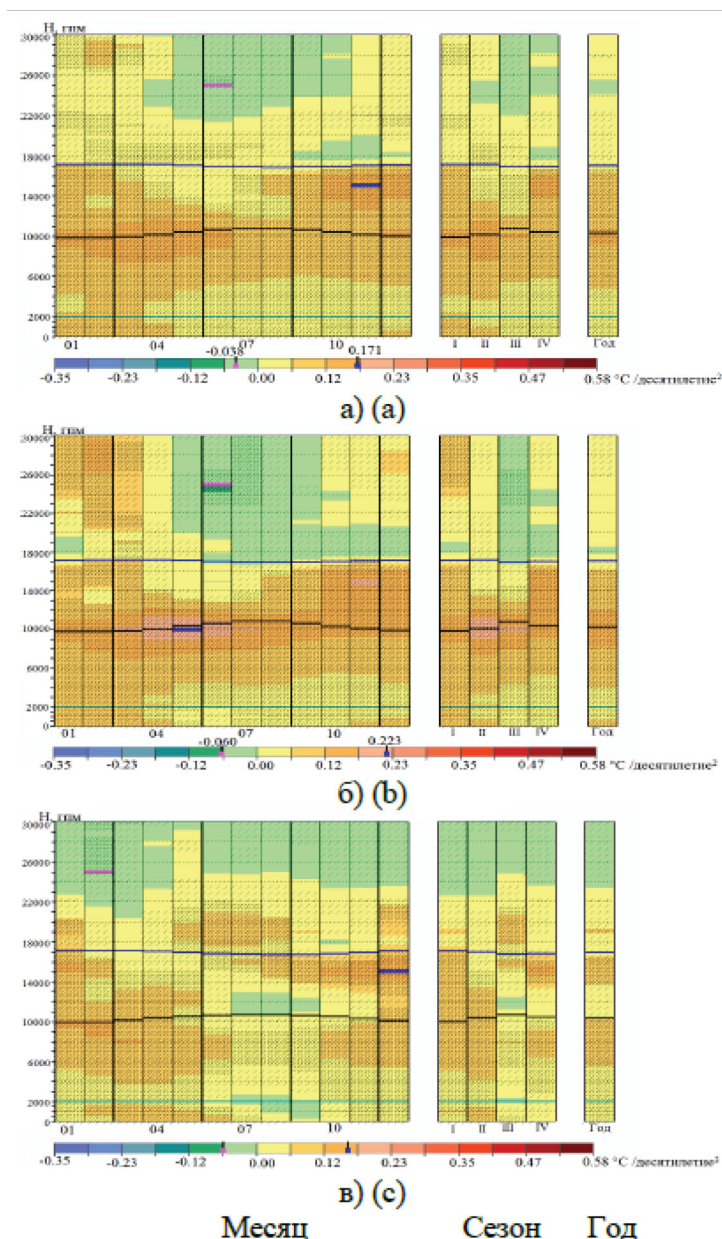


Рисунок 5. Тренды второго порядка аномалий средних значений T ($^{\circ}\text{C}$ за десятилетие²) в слое атмосферы 0-30 км за год в целом, для каждого месяца, сезона. 1964-2018 гг.

Figure 5. Second-order trends in anomalies of means for T ($^{\circ}\text{C}$ per decade²) in the 0-30-km layer for the year as a whole, for each month and season. 1964-2018

Для земного шара диапазон внутригодовых изменений многолетних средних месячных T в изучаемом слое составляет от -66.56 до 18.69°C , минимальное значение определено в январе на высоте 17 км, а максимальное значение – на высоте 0 км в июле. Диапазон внутригодовых изменений трендов

первого порядка аномалий многолетних средних месячных для T в слое 0-30 км составляет от -0.382 до 0.174°C за десятилетие. Минимальное значение трендов первого порядка видно на высоте 18 км в ноябре, а максимальное значение – на высоте 2 км в августе. Потепление в слое 0-10 км и похолодание в слое 14-30 км было определено с доверительной вероятностью более 95% для всех месяцев. Наиболее интенсивное потепление зафиксировано для всех месяцев в основном во всем слое 1-7 км, а также в слое 0-1 км – с сентября по апрель, на высотах 7-9 км – с июля по август. Наибольшее похолодание определено в слое 17-25 км для всех месяцев и дополнительно в слоях 25-26 км, 25-27 км и 25-28-км – для весны, лета и осени соответственно. Тренды первого порядка были определены с доверительной вероятностью менее 95% только в слое 10-13 км – для всех месяцев.

Для земного шара интервал внутригодовых изменений трендов второго порядка аномалий многолетних средних месячных для температуры в слое 0-30 км составляет от -0.038 до 0.171°C за десятилетие². Минимальное и максимальное значения трендов второго порядка были определены в июне на высоте 25 км и в ноябре на высоте 15 км соответственно. Тренды второго порядка аномалий многолетних средних месячных значений T положительны в слое 0-17 км в основном с доверительной вероятностью более 95% для всех месяцев. Это означает в случае положительных трендов первого порядка (в слое 0-10 км) усиление потепления, а в случае отрицательных трендов первого порядка (в слое 13-17 км) это означает ослабление похолодания по мере приближения к 2018 г. Тренды второго порядка в слое 17-30 км определены в основном с доверительной вероятностью менее 95% для всех месяцев. Мы видим для T как положительные значения трендов второго порядка в слое 17-30 км зимой, весной и осенью, так и отрицательные значения в слое 23-30 км с мая по август. Это означает ослабление похолодания в слое 17-30 км зимой, весной и осенью и его усиление с мая по август в слое 23-30 км по мере приближения к 2018 г.

Как для Северного, так и для Южного полушария потепление в слое 0-8 км и похолодание в слое 16-30 км видно для всех месяцев (рис. 4б, 4в); по мере приближения к 2018 г. наибольшие изменения T определены для зимы в слое 5-17 км, для весны – в слоях 0-1 и 4-13 км, для осени – в слоях 7-9 и 14-16 км, при рассмотрении года в целом – в слоях 6-10 и 14-16 км (рис. 5б, 5в). В результате исследований были выявлены некоторые различия для Северного и Южного полушарий. Перечислим основные из них. По мере приближения к 2018 г. в Северном полушарии для всех зимних месяцев и при рассмотрении года в целом видно усиление потепления в слое 0-0.5 км. Минимальное значение трендов первого порядка (-0.526°C за десятилетие) было определено на высоте 18 км в Южном полушарии в ноябре, в то время как максимальное значение (0.202°C за десятилетие) было найдено на высоте 1 км в Северном полушарии в апреле. Амплитуда внутригодовых изменений для трендов первого порядка аномалий средних месячных значений T в слое 0-30-км для Северного полушария (0.577°C за десятилетие) меньше, чем для Южного полушария (0.690°C за десятилетие). При этом амплитуда внутригодовых изменений для трендов второго порядка аномалий средних месячных

значений T в слое 0-30-км для Северного полушария (0.283°C за десятилетие²) больше, чем для Южного полушария (0.216°C за десятилетие²).

Изменения среднеквадратических отклонений и их трендов

В табл. 2 представлены диапазоны внутригодовых изменений среднеквадратических отклонений σ_T , трендов первого и второго порядка σ_T , в слое атмосферы 0-30 км для земного шара, для Северного и Южного полушарий за период 1964-2018 гг., а также месяцы, в которые были определены соответствующие максимальные и минимальные значения и высоты, на которых они были зафиксированы.

Таблица 2. Диапазоны ($\Delta\sigma_T$) внутригодовых изменений многолетних месячных среднеквадратических отклонений σ_T , ($^{\circ}\text{C}$), трендов первого ($^{\circ}\text{C}$ за десятилетие) и второго ($^{\circ}\text{C}$ за десятилетие²) порядка среднеквадратических отклонений σ_T в слое атмосферы 0-30 км для земного шара, для Северного и Южного полушарий за период 1964-2018 гг.
 N – число наблюдений. В числителе в скобках приведен месяц (мм), в который был определен максимум/минимум и в знаменателе – высота (h), на которой он был определен

Table 2. Ranges ($\Delta\sigma_T$) of intra-annual variations of long-term monthly standard deviations σ_T , ($^{\circ}\text{C}$), and the first- ($^{\circ}\text{C per decade}$) and second-order ($^{\circ}\text{C per decade}^2$) decadal trends in long-term monthly standard deviations σ_T in the 0–30 km atmospheric layer for the Globe and for the Northern and Southern Hemispheres over the period of 1964-2018
 N – is the number of soundings. The numerator shows in brackets the month (mm) in which maximum/minimum values were determined. The height (h) at which maximum/minimum values were determined is given in the denominator

$\Delta\sigma_T$ $^{\circ}\text{C}(\text{мм})/h$	$\Delta\sigma_T$ тренды 1 порядка $^{\circ}\text{C за десятилетие}(\text{мм})/h$	$\Delta\sigma_T$ тренды 2 порядка $^{\circ}\text{C за десятилетие}^2(\text{мм})/h$	N , млн
Земной шар			
$\frac{4.27(08) - 16.08(02)}{30 \text{ км} \quad 00 \text{ км}}$	$\frac{-0.128(01) - 0.193(09)}{1 \text{ км} \quad 23 \text{ км}}$	$\frac{-0.114(10) - 0.050(01)}{21 \text{ км} \quad 30 \text{ км}}$	23.9
Северное полушарие			
$\frac{3.15(06) - 17.48(02)}{27 \text{ км} \quad 00 \text{ км}}$	$\frac{-0.089(01) - 0.113(01)}{1 \text{ км} \quad 29 \text{ км}}$	$\frac{-0.108(04) - 0.076(09)}{27 \text{ км} \quad 25 \text{ км}}$	20.7
Южное полушарие			
$\frac{3.93(03) - 15.93(08)}{30 \text{ км} \quad 00 \text{ км}}$	$\frac{-0.093(02) - 0.262(09)}{00 \text{ км} \quad 23 \text{ км}}$	$\frac{-0.220(10) - 0.082(08)}{21 \text{ км} \quad 13 \text{ км}}$	3.2

На рис. 6-8 для земного шара (а), для Северного (б) и Южного (в) полушарий представлена вертикальная макроструктура среднеквадратических отклонений σ_T , трендов первого и второго порядка σ_T в изучаемом слое для месяцев, сезонов и года в целом.

Для земного шара интервал внутригодовых изменений среднеквадратических отклонений составляет от 4.27 до 16.08°C , амплитуда изменений – 11.81°C . Минимальное значение σ_T было определено в августе на высоте 30 км и максимальное – в феврале на высоте 0 км. Диапазон внутригодовых изменений трендов первого порядка σ_T составляет от -0.128 до 0.193°C за десятилетие, амплитуда изменений – 0.321°C за десятилетие. Среднеквадратическое отклонение убывает в слое 0-10 км для всех месяцев, в то время как в слое 18-30 км

оно возрастает с мая по октябрь с доверительной вероятностью более 95%. Минимальное значение трендов первого порядка σ_T видно в январе на высоте 1 км и максимальное – в сентябре на высоте 23 км. Интервал внутригодовых изменений трендов второго порядка среднеквадратических отклонений в слое 0-30 км составляет от -0.114 до 0.050C° за десятилетие², амплитуда изменений – 0.164C° за десятилетие². Отрицательные значения трендов второго порядка σ_T в слое 17-28 км с апреля по ноябрь означают ослабление роста σ_T в этом слое, а их положительные значения в слое 0-10 км с июня по октябрь – ослабление уменьшения σ_T в этом слое по мере приближения к 2018 г.

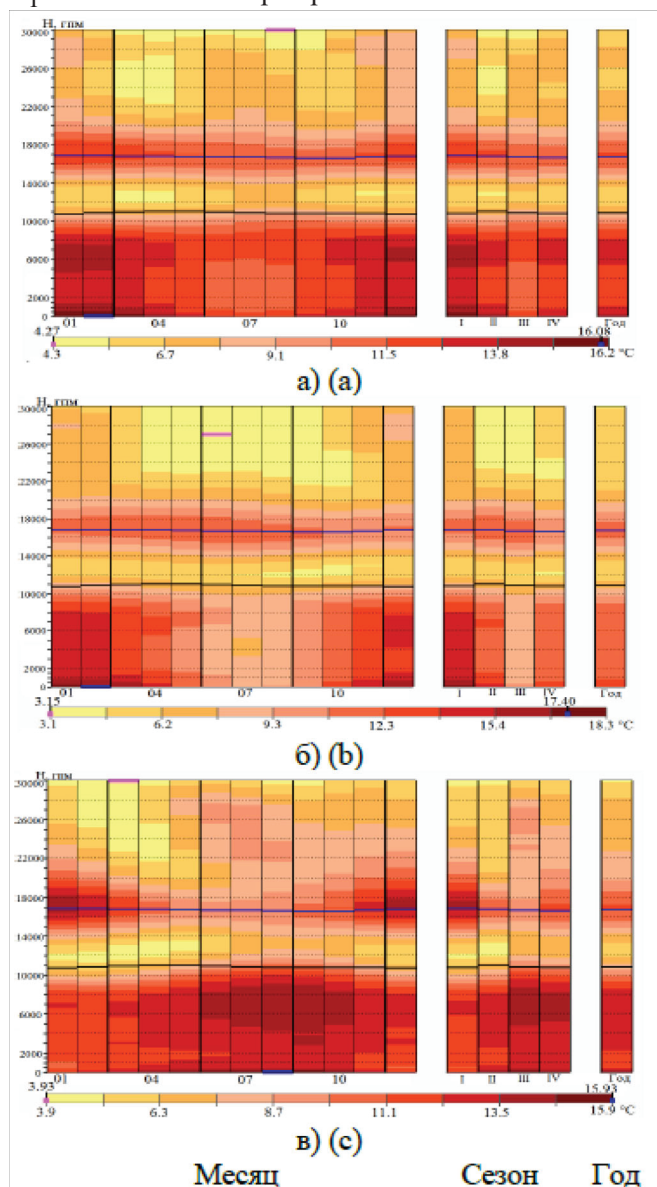


Рисунок 6. Многолетние среднеквадратические отклонения σ_T (C°) в слое атмосферы 0-30 км за год в целом, для каждого месяца, сезона. 1964-2018 гг.

Figure 6. Long-term standard deviations σ_T , (C°) in the 0-30-km layer for the year as a whole, for each month and season. 1964-2018

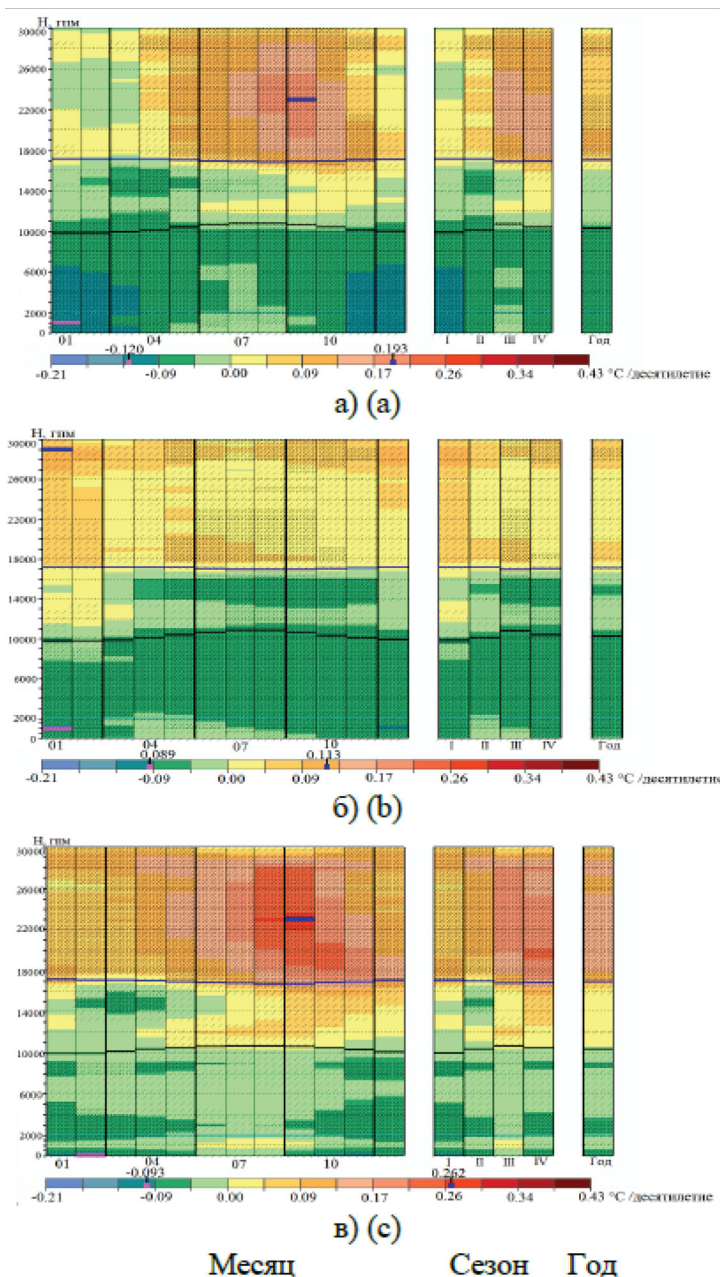


Рисунок 7. Тренды первого порядка среднеквадратических отклонений σ_T ($^{\circ}\text{C}$ за десятилетие) в слое атмосферы 0-30 км за год в целом, для каждого месяца, сезона. 1964-2018 гг.

Figure 7. First-order trends in standard deviations σ_T ($^{\circ}\text{C}$ per decade) in the 0-30 km layer for the year as a whole, for each month and season. 1964-2018

Для Северного и Южного полушарий максимальные многолетние значения среднеквадратических отклонений, 17.48 и 15.93 $^{\circ}\text{C}$, зафиксированы в последний месяц соответствующего холодного сезона, в феврале и августе, на высоте 00 км. Минимальные многолетние значения σ_T , 3.15 и 3.93 $^{\circ}\text{C}$, опреде-

лены для Северного и Южного полушария в июне и марте на высотах 27 и 30 км соответственно.

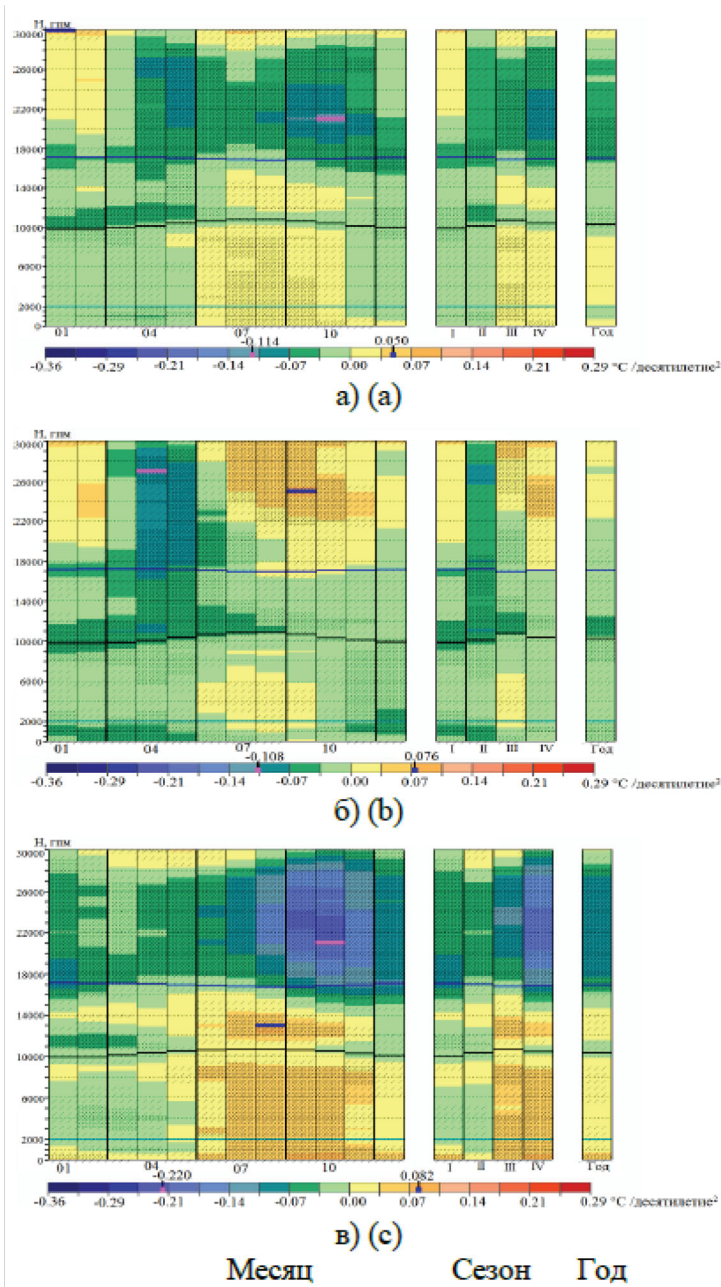


Рисунок 8. Тренды второго порядка среднеквадратических отклонений σ_T ($^{\circ}\text{C}$ за десятилетие²) в слое атмосферы 0-30 км за год в целом, для каждого месяца, сезона. 1964-2018 гг.

Figure 8. Second-order trends in standard deviations σ_T ($^{\circ}\text{C}$ per decade²) in the 0-30 km layer for the year as a whole, for each month and season. 1964-2018

Для обоих полушарий во все месяцы видны отрицательные тренды первого порядка в слое 0-10 км и положительные – в слое 18-30 км, при этом во

все месяцы доверительная вероятность трендов более 95% в слое 0-10 км для Северного полушария, а в слое 18-30 км – для Южного полушария. В слое 10-18 км видны как положительные, так и отрицательные тренды первого порядка; их доверительная вероятность зависит от месяца, высоты над уровнем моря и полушария, в основном она менее 95%. Анализ данных табл. 2 показал, что для Северного и Южного полушарий амплитуда внутригодовых изменений среднеквадратических отклонений составляет $14.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $12.00\text{ }^{\circ}\text{C}$, трендов первого порядка $\sigma_T = 0.202$ и $0.355\text{ }^{\circ}\text{C}$ за десятилетие, трендов второго порядка $\sigma_T = 0.184$ и $0.302\text{ }^{\circ}\text{C}$ за десятилетие² соответственно.

Дискуссия

Анализ расчетов, выполненных на основе глобальных аэрологических массивов за 1964-2018 гг. показал, что вертикальная макроструктура средних значений температуры воздуха, линейных трендов первого и второго порядка их аномалий неоднородна в атмосферном слое 0-30 км над уровнем моря для земного шара, для Северного и Южного полушарий. Аналогичное утверждение справедливо и для среднеквадратических отклонений, их трендов первого и второго порядка.

Для земного шара потепление в слое 0-10 км и похолодание в слое 14-30 км определено для всех месяцев. По мере приближения к 2018 г. наибольшие изменения T определены в слоях: для зимы – 0-2 и 4-17 км, для весны – 0-1 и 4-14 км, для лета – 6-12 км, для осени – 6-17 км, при рассмотрении года в целом – 5-16 км.

Для обоих полушарий потепление в слое 0-8 км и похолодание в слое 16-30 км зафиксировано для всех месяцев. По мере приближения к 2018 г. наибольшие изменения T определены в слоях: для зимы – 5-17 км, для весны – 0-1 и 4-13 км, для осени – 7-9 и 14-16 км, при рассмотрении года в целом – 6-10 и 14-16 км.

Соответствующие тренды были определены с доверительной вероятностью более 95 %.

На примере Северного полушария было проведено сравнение результатов, представленных в данной работе и в (Доклад, 2020, 2021). Оно показало согласование в определении современных тенденций изменения температуры в свободной атмосфере, суть которых сводится к потеплению в тропосфере (850-300 гПа) и похолоданию в нижней стратосфере (100-50 гПа). Наиболее интересен вопрос о согласованности оценок изменения температуры в свободной атмосфере, рассчитанных за период по 2018 г. и полученных независимыми экспертами с использованием данных по 2019 и 2020 годы. Согласно рис. 4б и 5б, в тропосфере определены положительные тренды первого и второго порядка аномалий средних годовых значений температуры; согласно (Доклад, 2020, 2021), среднегодовой тренд температуры в тропосфере в 2019 и 2020 г. увеличился по сравнению с прошлым годом, 2018 и 2019 соответственно.

На рис. 4б и 5б в слое 15-30 км видны значимые отрицательные тренды первого порядка аномалий средних годовых значений температуры и положи-

тельные тренды второго порядка в слое 16-30 км с доверительной вероятностью менее 95%. Согласно (Доклад, 2020, 2021) для нижней стратосферы, абсолютное значение среднегодового тренда температуры в нижней стратосфере в 2019 г. не изменилось по сравнению с предыдущим (2018) годом и в 2020 г. оно уменьшилось, по сравнению с предыдущим (2019) годом.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИТР 3.2. Мониторинг глобального климата и климата Российской Федерации и ее регионов, включая Арктику. Развитие и модернизация технологий мониторинга. Авторы благодарны доктору физ.-мат. наук А.М. Стерину за поддержку исследований и обсуждение статьи, что позволило улучшить ее текст.

Список литературы

Алдухов, О.А., Черных, И.В. (2013) *Методы анализа и интерпретации данных радиозондирования атмосферы. Т. 1. Контроль качества и обработка данных*, Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, 306 с.

Алдухов, О.А., Черных, И.В. (2015) *Методы анализа и интерпретации данных радиозондирования атмосферы. Т. 3. Влажность и температура в атмосфере, статистические характеристики*, Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, 494 с.

Алдухов, О.А., Черных, И.В. (2018) Долгопериодные изменения скорости ветра в слое атмосферы 0-2 км над российской Арктикой по данным радиозондирования за 1964-2016 гг., *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 52-66.

Алдухов, О.А., Черных, И.В. (2021) Географическое распределение трендов первого и второго порядка аномалий среднегодовой температуры воздуха на разных высотах в атмосферном слое 0-2 км над Арктикой по результатам радиозондовых наблюдений за 1964-2018 гг., в сб.: *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, вып. 188, Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, с. 93-114.

Бекряев, Р.В. (2022) Статистические аспекты количественной оценки полярного усиления. I. Отношение трендов, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 5-17.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я., Рочева, Э.В. (1992) Структура долгопериодных трендов глобальной температуры воздуха, в сб.: *Мониторинг и вероятностный прогноз климата*, СПб, Гидрометеиздат, с. 3-20.

Де Бор, К. (1985) *Практическое руководство по сплайнам*, М., Радио и связь, 304 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 г. (2020) М., Росгидромет, 97 с, электронный ресурс. URL: <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/> (дата обращения 05 июля 2023).

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 г. (2021). М., Росгидромет, 104 с., электронный ресурс. URL: <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/> (дата обращения 05 июля 2023).

Зайцева, Н.А. (1990) *Аэрология*, Л., Гидрометеиздат, 325 с.

Ранькова, Э.Я. (2005) *Климатическая изменчивость и изменения климата за период инструментальных наблюдений*, дис. ...док. физико-математических наук, М., 67 с.

Руденкова, Т.В. (2010) Формат архивации текущих аэрологических данных, поступающих по каналам связи для ПЭВМ, В сб.: *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, вып. 174, Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, с. 41-63.

Стерин, А.М. (1999) Анализ линейных трендов в рядах температуры свободной атмосферы за 1958-1997 гг., *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 52-68.

Стерин, А.М. (2004) О чувствительности оценок трендов температуры тропосферы и нижней стратосферы по данным радиозондирования. 1. Выбор массива данных, длины ряда и методов анализа, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 21-36.

Черных, И.В., Алдухов, О.А. (2020) Тренды температуры и влажности в нижнем двухкилометровом слое атмосферы над российской Арктикой по данным радиозондирования, *Метеорология и гидрология*, № 9, с. 17-26.

Aldukhov, O.A., Chernykh, I.V. (2019) Trends of wind speed in low troposphere from global radiosonde data, *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, WGNE Blue Book, WMO, Geneva, p. 2-03-2-04, электронный ресурс. URL: <http://bluebook.meteoinfo.ru/>, 2019, p. 2-03-2-04 (дата обращения 05 июля 2023).

Aldukhov, O.A., Chernykh, I.V. (2020) First and second-order trends of air temperature at the surface level from global radiosonde data, *Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation*. Report No. 50. WCRP Report No.12/2020. Ed. E. Astakhova, July 2020, WMO, Geneva, p. 2-03-2-04, электронный ресурс. URL: <http://bluebook.meteoinfo.ru/>, 2020, p. 2-03-2-04 (дата обращения 05 июля 2023).

Chernykh, I.V., Aldukhov, O.A. (2020) Spatiotemporal distributions of global trends of humidity and temperature in the low troposphere, *Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation*. Report No. 50. WCRP Report No.12/2020. Ed. E. Astakhova, July 2020, WMO, Geneva, p. 2-07-2-08, электронный ресурс. URL: <http://bluebook.meteoinfo.ru/>, 2020, p. 2-07-2-08 (дата обращения 05 июля 2023).

Chernykh, I.V., Aldukhov, O.A. (2022) Vertical Distribution of Trends of Relative Humidity in the 0-30 km Atmospheric Layer over the Northern and Southern Hemispheres from Radiosounding Data, *Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation*. Report No. 52.

WCRP Report No. 4/2022. Ed. E. Astakhova, July 20226, WMO, Geneva, p. 2-07-2-08, электронный ресурс. URL: <http://bluebook.meteoinfo.ru/>, 2022, p. 2-07-2-08 (дата обращения 05 июля 2023).

Estridge, R.E., Alduchov, O.A., Chernykh, I.V., Zhai, P., Polansky, A.C., Doty, S.R. (1995) A comprehensive aerological reference dataset (CARDS): rough and systematic errors, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 76, no. 10, pp. 1759-1775.

Gaffen, D.J. (1993) Historical Changes in Radiosonde Instruments and Practices, *Instruments and Observing Methods*. Rep. N. 50, Geneva, WMO, 123 p.

Hartmann, D.L., Klein, Tank, A.M. G., Rusticucci, M., Alexander, L.V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F.J., Dlugokencky, E.J., Easterling, D.R., Kaplan, A., Soden, B.J., Thorne, P.W., Wild, M., & Zhai, P.M. (2013) *Observations: Atmosphere and Surface*, in Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. & Midgley P.M. (eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 15-24.

IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* in Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

References

Alduhov, O.A., Chernyh, I.V. (2013) *Metody analiza i interpretacii dannyh radiozondirovaniya atmosfery. T. 1. Kontrol' kachestva i obrabotka dannyh*. [Methods of analysis and interpretation of the atmosphere radiosonde observations data. Vol 1. Quality control and data processing], Obninsk, Russia, 306 p.

Alduhov, O.A., Chernyh, I.V. (2015) *Metody analiza i interpretacii dannyh radiozondirovaniya atmosfery. T. 3. Vlazhnost' i temperatura v atmosfere: statisticheskie harakteristiki* [Methods of analysis and interpretation of the atmosphere radiosonde observations data. Vol. 3. Humidity and temperature in the atmosphere: Statistics], Obninsk, Russia, 494 p.

Alduhov, O.A., Chernyh, I.V. (2018) Dolgoperiodnye izmeneniya skorosti vetra v sloe atmosfery 0-2 km nad rossijskoj Arktikoj po dannym radiozondirovaniya za 1964-2016 gg. [Long-term Variations in Wind Speed in the Atmospheric Layer of 0-2 km over the Russian Arctic from Radiosonde Data for 1964-2016], *Meteorologiya i gidrologiya*, no 6, pp. 52-66.

Alduhov, O.A., Chernyh, I.V. (2021) Geograficheskoe raspredelenie trendov pervogo i vtorogo poryadka anomalij srednegodovoj temperatury vozduha na raznyh vysotah v atmosfernom sloe 0-2 km nad Arktikoj po rezul'tatam radiozondovyh nablyudenij za 1964-2018 gg. [Geographical distribution of first and second-order trends in average annual air temperature anomalies on different heights in 0-2 km

atmospheric layer over Arctic from results of radiosounding for 1964-2018], *V sb. Trudy VNIIGMI-MCD – Proc. RIHMI-WDC*, no. 188, pp. 93-114.

Bekryaev, R.V. (2022) Statisticheskie aspekty kolichestvennoj ocenki polyarnogo usileniya. I. Otnoshenie trendov. [Statistical Aspects of Quantitative Estimation of Polar Amplification. Part 1: The Ratio of Trends], *Meteorologiya i gidrologiya*, № 6, s. 5-17. *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 47, no. 6, pp. 419-427.

Gruza, G.V., Ran'kova, E.Ya, Rocheva, E.V. (1992) Struktura dolgoperiodnyh trendov global'noj temperatury vozduha [Structure of long-term trends in global air temperature], *V sb. «Monitoring i veroyatnostnyj prognoz klimata»*, St. Petersburg, Russia, pp. 3-20.

De Bor, K. (1985) *Prakticheskoe rukovodstvo po splajnam* [A Practical guide to splines], Moscow, Russian, 304 p.

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2019 g. (2020) [A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2019], Moscow, Russian, 97 p., available at: <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/> (accessed 05 июля 2023).

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2020 g. (2021) [A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2020], Moscow, Russian, 104 p., available at: <http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/> (accessed 05 июля 2023).

Zajceva, N.A. (1990) *Aerologiya* [Aerology], Leningrad, Russia, 325 p.

Ran'kova, E.Ya. (2005) Klimaticheskaya izmenchivost' i izmeneniya klimata za period instrumental'nyh nablyudenij [Climatic variability and climate changes during the period of instrumental observations], extended abstract of Doctor's thesis, Moscow, Russian, 67 p.

Rudenkova, T.V. (2010) Format arhivacii tekushchih aerologicheskikh dannyh, postupayushchih po kanalam svyazi dlya PEVM [Format for archiving of the current aerological data, received from GTS for PC], *v sb. Trudy VNIIGMI-MCD, Proc. RIHMI-WDC*, no. 174, pp. 41-63.

Sterin, A.M. (1999) Analiz linejnyh trendov v ryadah temperatury svobodnoj atmosfery za 1958-1997 gg. [Analysis of linear trends in the free atmosphere temperature series for 1958-1997], *Meteorologiya i Gidrologiya, Russian Meteorology and Hydrology*, no. 5, pp. 52-68.

Sterin, A.M. (2004) O chuvstvitel'nosti ocenok trendov temperatury troposfery i nizhnej stratosfery po dannym radiozondirovaniya. 1: Vybor massiva dannyh, dliny ryada i metodov analiza [Sensitivity of Estimated Trends of Tropospheric and Lower Stratospheric Temperature from Radiosonde Data. Part 1. Choice of Data Set, Length of Series, and Analysis Methods], *Meteorologiya i Gidrologiya, Russian Meteorology and Hydrology*, no. 5, pp. 21-36.

Chernykh, I.V., Aldukhov, O.A. (2020) Trendy temperatury i vlazhnosti v nizhnem dvuhkilometrovom sloe atmosfery nad rossijskoj Arktikoj po dannym radiozondirovaniya [Temperature and Humidity Trends in the Lower Atmospheric 2-km Layer over the Russian Arctic According to Radiosonde Data], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 9, p. 17-26, *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 45, no. 9, pp. 615-622.

Aldukhov, O.A., Chernykh, I.V. (2019) Trends of wind speed in low troposphere from global radiosonde data, *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, WGN Blue Book, WMO, Geneva, p. 2-03-2-04, электронный ресурс. URL: <http://bluebook.meteoinfo.ru/>, 2019, p. 2-03-2-04 (дата обращения 05 июля 2023).

Aldukhov, O.A., Chernykh, I.V. (2020) First and second-order trends of air temperature at the surface level from global radiosonde data, *Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation*. Report No. 50. WCRP Report No.12/2020. Ed. E. Astakhova, July 2020, WMO, Geneva, p. 2-03-2-04, электронный ресурс. URL: <http://bluebook.meteoinfo.ru/>, 2020. p. 2-03-2-04 (дата обращения 05 июля 2023).

Chernykh, I.V., Aldukhov, O.A. (2020) Spatiotemporal distributions of global trends of humidity and temperature in the low troposphere, *Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation*. Report No. 50. WCRP Report No.12/2020. Ed. E. Astakhova, July 2020, WMO, Geneva, p. 2-07-2-08, электронный ресурс. URL: <http://bluebook.meteoinfo.ru/>, 2020, p. 2-07-2-08 (дата обращения 05 июля 2023).

Chernykh, I.V., Aldukhov, O.A. (2022) Vertical Distribution of Trends of Relative Humidity in the 0-30 km Atmospheric Layer over the Northern and Southern Hemispheres from Radiosounding Data, *Research activities in Earth system modelling. Working Group on Numerical Experimentation*. Report No. 52. WCRP Report No. 4/2022. Ed. E. Astakhova, July 2022, WMO, Geneva, p. 2-07-2-08, электронный ресурс. URL: <http://bluebook.meteoinfo.ru/>, 2022, p. 2-07-2-08 (дата обращения 05 июля 2023).

Eskridge, R.E., Aldukhov, O.A., Chernykh, I.V., Zhai, P., Polansky, A.C., Doty, S.R. (1995) A comprehensive aerological reference dataset (CARDS): rough and systematic errors, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 76, no. 10, pp. 1759-1775.

Gaffen, D.J. (1993) Historical Changes in Radiosonde Instruments and Practices, *Instruments and Observing Methods*. Rep. N. 50, Geneva, WMO, 123 p.

Hartmann, D.L., Klein, Tank, A. M. G., Rusticucci, M., Alexander, L.V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F.J., Dlugokencky, E.J., Easterling, D.R., Kaplan, A., Soden, B.J., Thorne, P.W., Wild, M., & Zhai, P.M. (2013) *Observations: Atmosphere and Surface*, in Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. & Midgley P.M. (eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 15-24.

IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* in Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

Поступила в редакцию: 23.08.2023.

Доработана после рецензирования: 18.09.2023.

Принята к публикации: 06.11.2023 г.

Для цитирования / For citation:

[Алдухов, О.А.], Черных, И.В. (2023) Сезонные и географические особенности вертикальной структуры трендов температуры в атмосфере Земли (в слое 0-30 км), оцененные по данным радиозондирования, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 4, с. 482-505, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-482-505.

[Aldukhov, O.A.], Chernykh, I.V. (2023) Seasonal and geographical features of the vertical structure of temperature trends in the Earth's atmosphere (in the 0-30 km layer) assessed using radiosonde data, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 4, pp. 482-505, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-482-505.

Повторяемость слабых и сильных ветров в пограничном слое атмосферы на территории Российской Федерации, оцененная по данным многолетних аэрологических наблюдений

А.В. Хохлова

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации –
Мировой центр данных,
Россия, 249035, Обнинск, Королева, 6

Адрес для переписки: *anna_x@meteo.ru*

Реферат. Знание ветрового режима в нижнем слое атмосферы необходимо как для исследования климата и его изменчивости, так и для прикладных задач, в первую очередь, для задачи о распространения примеси. Климатические характеристики ветрового режима в пограничном слое, имеющиеся в ряде источников, получены по аэрологическим данным за 50-60-е годы прошлого века. Поэтому актуально получение их по более современным данным.

Характеристики ветрового режима, приведенные в статье, определены на основе аэрологических массивов Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД). Использованы данные более 100 российских аэрологических станций и станций с примыкающих территорий за период 1979-2022 гг. Для каждой станции на четырех уровнях высоты (поверхность земли, 100 м, 500 м и 1000 м) рассчитаны следующие величины: средние скорости ветра, повторяемость штилевых условий, повторяемость слабых и сильных ветров для четырех сезонов (зима, весна, лето, осень), а также построены временные ряды этих характеристик, осредненных по каждому последовательному году за весь исследуемый период. Представлены карты средних скоростей, повторяемостей штилевых условий, слабых и сильных ветров. Проанализированы особенности географических и сезонных распределений, а также характер зависимости характеристик от высоты. Показаны особенности ветрового режима на побережье океанов и в материковой зоне. Географическое распределение средней приземной скорости ветра в целом совпадает с распределением, приведенным в различных источниках. По временным рядам среднегодовых характеристик сделаны оценки их изменчивости. В силу значительной неоднородности временных рядов затруднительно сделать статистически обеспеченные оценки, поэтому численные значения коэффициентов линейных трендов в статье не приводятся. Рассмотрены только три градации – положительный тренд, отрицательный и близкий к нулю. Согласно полученным результатам можно сделать предположение об уменьшении скорости ветра в пограничном слое за последние 40 лет. Это проявляется прежде всего в увеличении повторяемости слабых ветров на большей части станций, а также в уменьшении средней скорости ветра и

повторяемости сильных ветров. С высотой эти особенности постепенно уменьшаются и на уровне 1000 м тенденции изменчивости практически не заметны. Это самая общая картина. На отдельных станциях временная изменчивость может иметь другие особенности.

Ключевые слова. Атмосфера, климат, пограничный слой, Россия, ветровой режим, изменчивость, аэрологические наблюдения.

The frequency of weak and strong winds in the atmospheric boundary layer on the territory of the Russian Federation assessed from data of long-term aerological observation

A.V. Khokhlova

Federal State Budgetary Establishment "Russian Institute of Hydrometeorological Information –
World Data Center (RIHMI-WDC)»,
6, Korolyov street, 249035, Obninsk, Russian Federation

Corresponding author: *anna_x@meteo.ru*

Abstract. Knowledge of the wind regime in the lower layer of the atmosphere is necessary both for the study of climate and its variability, and for applied problems, primarily for the problem of impurity propagation. Climatic characteristics of the wind regime in the boundary layer, available in a number of sources, were obtained from aerological data for the 50-60s of the last century. Therefore, it is important to obtain them according to more modern data.

The characteristics of the wind regime given in the article are determined on the basis of the aerological datasets of the Russian Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center (RIHMI-WDC). The data of more than 100 Russian aerological stations and stations from adjacent territories for the period 1979-2022 were used. For each station at four altitude levels (ground surface, 100 m, 500 m and 1000 m), the following values are calculated: average wind speeds, frequency of calm conditions, frequency of weak and strong winds for four seasons (winter, spring, summer, autumn), and time series of these characteristics averaged by for each consecutive year for the entire study period. Maps of average speeds, frequencies of calm conditions, weak and strong winds are presented. The features of geographical and seasonal distributions are analyzed, as well as the nature of the dependence of characteristics on height. The features of the wind regime on the ocean coast and in the mainland zone are shown. The geographical distribution of the average surface wind speed generally coincides with the distribution given in various sources. Estimates of their variability are made based on time series of average annual characteristics. Due to the significant heterogeneity of time series, it is difficult to make statistically reliable estimates, therefore numerical values of linear trend coefficients are not given in the article. Only three gradations are considered – positive trend, negative trend and close to zero. According to the results obtained, it is possible to make an assumption about the decrease in wind speed in the boundary layer over the past 40 years. This is manifested primarily in

an increase in the frequency of weak winds at most stations, as well as in a decrease in the average wind speed and the frequency of strong winds. With altitude, these features gradually decrease and at the level of 1000 m, the trends of variability are practically not noticeable. This is the most general picture. At individual stations, the time variability may have other features.

Keywords. Atmosphere, climate, boundary layer, Russia, wind regime, variability, upper-atmosphere observations.

Введение

Ветер является важной климатической компонентой, поскольку ветром обусловлен перенос тепла, влаги, аэрозоля и различных примесей. Климатические характеристики скорости ветра в пограничном слое необходимы для различных задач, как исследовательских, так и прикладных. Примеры исследований ветрового режима нижнего слоя атмосферы и его изменчивости для отдельных регионов можно найти в работах (Алдухов, Черных, 2018; Дивинский и др., 2020; Москаленко и др., 2016; Lei et al., 2023) и других. Для определения скорости ветра в нижнем слое атмосферы разработан ряд методов (Федосов, 2006; Voro et al., 2019), в которых получены эмпирические законы изменения скорости ветра с высотой. Поскольку высотные измерения имеются далеко не везде, где нужно знание ветра в нижнем слое, то ряд исследований посвящен вопросу оценки скорости ветра на высотах по приземным измерениям (Бызова и др., 1987; Хохлова, 2019).

Одна из основных прикладных задач, для которых нужно знание характеристик скорости ветра, это распространение примеси (Алдухов, Брюхань, 2013; Свод правил..., 2012; Atmospheric Dispersion..., 1980). В состав предпроектной изыскательской документации входят различные характеристики ветрового режима, в том числе, средние скорости в пограничном слое, повторяемость штилей и слабых ветров, распределение по направлениям на нескольких высотах в пределах пограничного слоя. Средние скорости ветра и характеристики слабых ветров по данным наблюдений входят в справочное издание о климатических условиях рассеяния примеси (Климатические характеристики..., 1983). Приведенные там сведения получены по данным примерно 130 аэрологических станций за десятилетний период 1959-1968 гг. Последний аэроклиматический справочник (Новый аэроклиматический справочник, 1987) выполнен на основе данных за 1961-1970 гг. Представляет интерес оценка ветрового режима в пограничном слое по более современным данным.

Ветровой режим характеризуется большим количеством параметров, в том числе, средней и результирующей скоростью, распределением по направлениям, повторяемостью скорости ветра в разных диапазонах, и другими. В настоящей работе представлены средние скорости ветра и повторяемости штилей, сильных и слабых ветров в нижнем слое атмосферы, определенные по многолетним радиозондовым данным на территории Российской Федерации и ближайших окрестностей. Сделана также попытка оценить временную изменчивость этих характеристик.

Данные и метод

Значения средних скоростей ветра и повторяемости различных ветровых условий получены на основе аэрологических массивов, создаваемых в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» (Казначеева, Руденкова, 1983; Руденкова, 2010). В нескольких массивах аэрологического банка хранятся данные, получаемые из глобальной аэрологической сети. В электронном виде имеются данные с июня 1978 г по российским станциям и станциям бывшего СССР и с 1984 по зарубежным станциям. Для расчетов отобраны более 100 действующих российских станций и несколько станций бывшего СССР и прилегающих территорий. За небольшим исключением наблюдения охватывают период 1978-2022 г. Основным требованием при выборе станций было минимальное количество пропусков в наблюдениях. В среднем при двухразовом зондировании и при отсутствии длительных пропусков общее количество зондирований составляет не менее 20000 для каждой станции.

Климатические характеристики скорости ветра получены для нескольких уровней высоты от приземного уровня до высоты 1000 м за весь период наблюдений, по сезонам за весь период наблюдений, и для каждого календарного года за период 1979-2022 гг. Под сезоном имеются в виду календарные времена года: зима – месяцы с декабря по февраль, весна – с марта по май, лето – с июня по август и осень – с сентября по ноябрь. В статье рассмотрены характеристики скорости ветра на приземном уровне, далее обозначаемом 10 м, и на высотах 100, 500 и 1000 м от уровня земли для летнего и зимнего сезонов. Последовательность обработки данных следующая.

- Для каждого зондирования выполняется вертикальная интерполяция скорости ветра на заданные высоты до 1000 м от уровня земли. Расчет скорости ветра на заданных высотах производится путем линейной интерполяции.
- Производится определение категории скорости ветра V по следующим условиям: штилевые условия $V \leq 1 \text{ м с}^{-1}$, слабый ветер $V \leq 2.0 \text{ м с}^{-1}$, сильный ветер $V \geq 10 \text{ м с}^{-1}$.

- Далее стандартным путем выполняется расчет средних значений и повторяемостей. Повторяемости определены как процент случаев выполнения заданного условия по отношению к общему количеству зондирований за рассматриваемый временной отрезок (весь период или сезон), при этом в расчетах участвуют только те случаи, в которых имеются данные на всех высотах.

Помимо средних характеристик ветрового режима представляет также интерес вопрос о его временной изменчивости – имеются ли какие-либо их систематические изменения. Для оценки изменчивости по временным рядам средних за год характеристик ветра получены коэффициенты линейных трендов, рассчитанные с помощью метода наименьших квадратов.

Результаты

Географические распределения скорости ветра и повторяемостей представлены для каждой станции отдельно. Это связано с тем, что освещение

данными отличается неравномерностью, а в некоторых регионах оно просто скудное. Кроме того, поскольку речь идет о нижнем слое атмосферы, в котором существенную роль играют местные условия, в первую очередь, ландшафтные, представляется нецелесообразным интерполировать скорость ветра в областях, бедных освещением, по данным отдаленных станций и строить поле изолиний. Иллюстрации приведены в основном для высот 100 и 1000 м.

Средняя скорость ветра

Средняя скорость ветра на двух уровнях высоты 100 и 1000 м для зимнего и летнего сезонов представлена на рис. 1. Особенности географического распределения и изменения скорости по сезонам и с высотой различны для материковой зоны и побережья океанов. Средние значения скоростей ветра в зимний сезон у поверхности земли на побережье Северного Ледовитого океана составляют $6-7 \text{ м с}^{-1}$, в материковой зоне европейской части не превышают 4 м с^{-1} и, соответственно, $5-6 \text{ м с}^{-1}$ и $3-4 \text{ м с}^{-1}$ в летний сезон. Наименьшие средние скорости ветра $1-2 \text{ м с}^{-1}$ отмечаются в Центральной и Восточной Сибири, то есть, в районе азиатского антициклона. С высотой скорость ветра увеличивается, но также различным образом: на побережье возрастание скорости ветра с высотой выражено слабее. На высоте 100 м скорости ветра в зимний сезон в среднем составляют $7-8 \text{ м с}^{-1}$ в прибрежных регионах, $4-6 \text{ м с}^{-1}$ в европейском регионе, и $3-4 \text{ м с}^{-1}$ в сибирском регионе. На высотах 500 и 1000 м имеется примерно такое же распределение, но значения скорости значительно больше. В зимнее время практически на всей территории и на всех высотах скорости ветра больше, чем в летнее. Исключение составляет регион Центральной и Восточной Сибири, где летняя скорость ветра превышает зимнюю. Сезонные различия увеличиваются с высотой: летняя скорость составляет в среднем 80-90% от зимней у поверхности земли и 70-75% от зимней на высоте 1000 м.

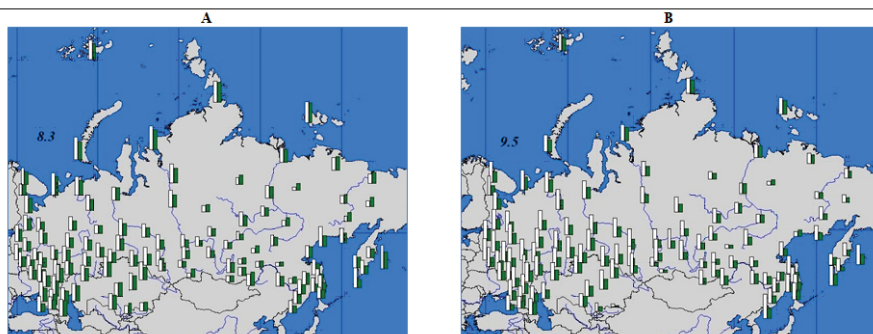


Рисунок 1. Средние скорости ветра для зимнего (белый цвет) и летнего (зеленый цвет) сезонов на высотах 100 м (А) и 1000 м (В)

Для иллюстрации масштаба около станции Малые Кармакулы (Новая земля) показано значение скорости на этой станции в зимний период

Figure 1. Average wind speeds for the winter (white) and summer (green) seasons at altitudes of 100 m (A) and 1000 m (B)

To illustrate the scale near the station Malye Karmakuly (Novaya Zemlya), the speed value at this station in winter is shown

Повторяемость штилей

На рис. 2 приведены карты повторяемости штилевых условий на высоте 10 м и 100 м. Повторяемость штилевых условий сильно различается для разных регионов. На побережье Северного Ледовитого океана штилевые условия наблюдаются редко, их повторяемость не превышает 4-6%. В материковой зоне на уровне земли повторяемость штилевых условий максимальна по сравнению с другими высотами. По распределению штилевых условий в материковой зоне можно выделить два больших региона: европейская часть и южная часть Центральной и Восточной Сибири. В европейской части повторяемость штилей в зимнее время у поверхности земли в среднем не превышает 10-15%, в летнее – 10-20%. Во втором регионе картина иная: повторяемость штилей достигает 40-50%, при этом в летнее время повторяемость штилей несколько меньше, чем в зимнее. В материковой зоне с высотой повторяемость штилевых условий падает, сохраняя примерно такое же географическое распределение.

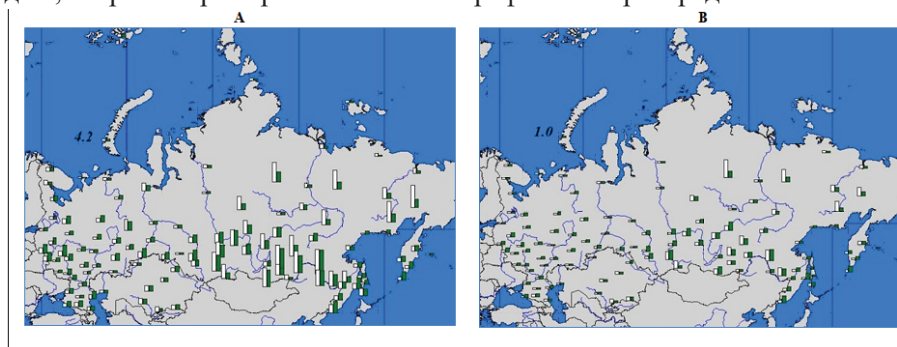


Рисунок 2. Повторяемость штилей в зимний (белый) и летний (зеленый) сезоны на высоте 10 м (А) и 100 м (В)

Около станции Малые Кармакулы (Новая земля) указана повторяемость в % для масштаба

Figure 2. The frequency of calms in the winter (white) and summer (green) seasons at an altitude of 10 m (A) and 100 m (B)

Near the station Malye Karmakuly (Novaya Zemlya), the frequency is indicated in % for the scale

Повторяемость слабых ветров

На рис. 3 приведены карты повторяемости слабых ветров на высоте 100 м и 1000 м. На побережье Северного Ледовитого океана слабые ветры наблюдаются редко и с высотой их повторяемость уменьшается. Уменьшение повторяемости с высотой имеет место во всех регионах. Во всех регионах в летнее время слабые скорости ветра наблюдаются чаще, чем в зимнее. Исключение составляет центральная и северная часть Якутии, где в зимнее время слабые ветры наблюдаются чаще, чем в летнее. Аналогично распределению штилей, в материковой части можно выделить два больших региона – европейский регион, где повторяемость слабых ветров на уровне земли составляет 20-30% в зимний период и 30-40% в летний, и южную часть Центральной и Восточной Сибири, где повторяемость слабых ветров существенно больше, чем в европейской части (50-70% и 45-60% соответственно). В области Восточно-Сибирского антициклона как штили, так и слабые ветры наблюдаются чаще в зимнее время. С высотой повторяемость слабых ветров падает, сохраняя примерно такое же географическое распределение.

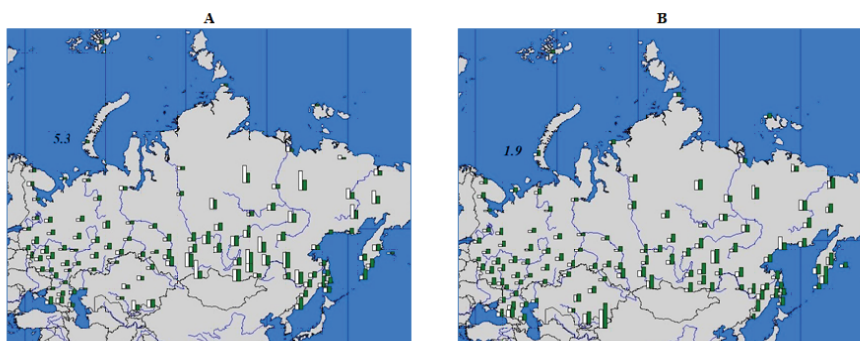


Рисунок 3. Повторяемость слабых ветров в зимний (белый) и летний (зеленый) на высотах 100 (А) и 1000 м (В)
Около станции Малые Кармакулы (Новая земля) указана повторяемость в % для масштаба
Figure 3. The frequency of weak winds in winter (white) and summer (green) at altitudes of 100 (A) and 1000 m (B)
Near the station Malye Karmakuly (Novaya Zemlya), the frequency is indicated in % for the scale

Повторяемость сильных ветров

На рис. 4 показана карта повторяемости сильных ветров в зимний и летний период. Повторяемость сильных ветров на нижних уровнях различна для разных регионов. На островах и побережье Северного Ледовитого океана и на побережье Камчатки на уровне земли она достигает 20-30% в зимнее время, в летнее же время она составляет не более 20%. В материковой зоне сильный ветер наблюдается только на юге европейской части на побережье Черного моря и вблизи него. На остальной территории в нижнем слое атмосферы сильный ветер наблюдается редко. С увеличением высоты их повторяемость возрастает, достигая в европейском регионе на высоте 500 м 40-50% в зимний период и 20-30% в летний. В области азиатского антициклона повторяемости сильных ветров на этой высоте существенно меньше: 15-20% в зимний сезон и 10-15 в летний.

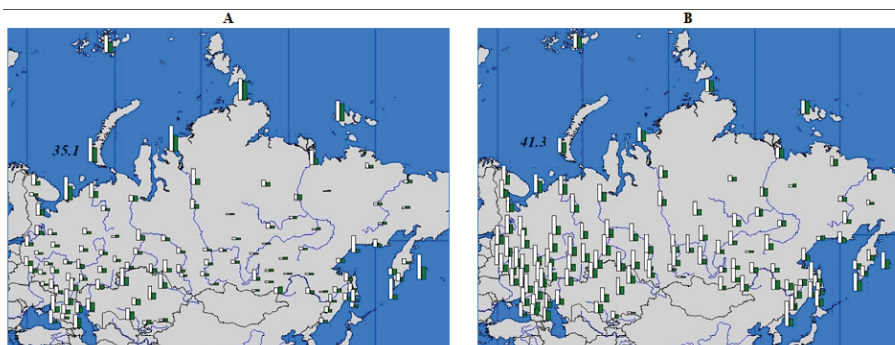


Рисунок 4. Повторяемость сильных ветров в зимний (белый) и летний (зеленый) на высотах 100 м (А) и 1000 м (В)
Около станции Малые Кармакулы (Новая земля) показана повторяемость в % для масштаба
Figure 4. The frequency of strong winds in winter (white) and summer (green) at altitudes of 100 m (A) and 1000 m (B)
Near the station Malye Karmakuly (Novaya Zemlya), the frequency in % for the scale is shown

Тенденции изменчивости

Для оценки тенденций изменчивости ветрового режима построены временные ряды средних значений скорости и повторяемостей за каждый год. По этим рядам сделаны оценки коэффициентов линейных трендов. Тенденции изменчивости для отдельных сезонов (только зима или только лето) не рассматривались.

В силу неоднородности рядов и естественной изменчивости ветрового режима затруднительно сделать статистически обеспеченные оценки. Неоднородность рядов в значительной мере обусловлена ухудшением качества зондирования в 90-е годы прошлого века, а также изменением локальных условий – переносом станции, сменой приборов, изменением окружающих условий и т.д. В связи с этим далее рассматриваются не количественные значения коэффициентов линейных трендов, а только три их градации: положительные, отрицательные и близкие к нулю.

На рис. 5 приведено географическое распределение тенденций изменчивости режима ветра на высоте 100 м. Коричневым цветом обозначены положительные коэффициенты линейных трендов, синим – отрицательные, белым – отсутствие заметных тенденций.

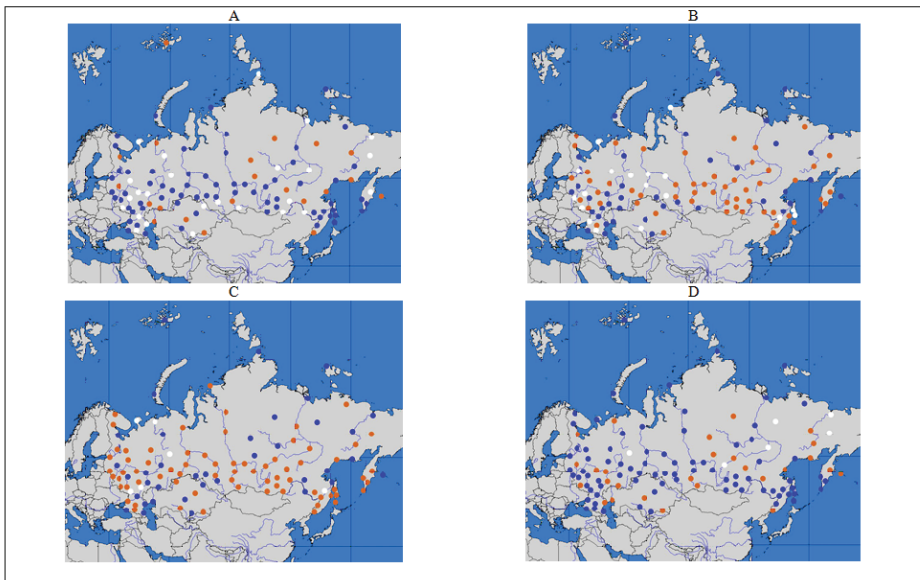


Рисунок 5. Тенденции изменчивости характеристик скорости ветра на высоте 100 м за период 1979-2022 гг.: средней скорости (А), повторяемости штилей (В), повторяемости слабых ветров (С), повторяемости сильных ветров (D)
Коричневый цвет обозначает положительную тенденцию, синий – отрицательную, белый – близкую к нулю

Figure 5. Trends in the variability of wind speed characteristics at an altitude of 100 m for the period 1979-2022: average speed (A), repeatability of calm (B), repeatability of weak winds (C), repeatability of strong winds (D)

Brown color indicates a positive trend, blue – negative, white – close to zero

Как можно видеть из рисунка, тенденции изменчивости характеристик скорости ветра имеют разнонаправленные знаки, но при этом можно отметить

некоторые общие закономерности, наблюдаемые на большом числе станций: увеличение повторяемости слабых ветров (рис. 5, С) и уменьшение повторяемости сильных ветров (рис. 5, D). В табл. 1 приведены преимущественные тенденции изменчивости характеристик ветрового режима на всех рассматриваемых высотах. Знак «+» означает увеличение, знак «-» уменьшение, 0 – отсутствие заметных тенденций. Знаки, перечисленные через запятую, означают наличие всех тенденций, начиная с преимущественной, знаки в скобках означают наличие тенденции в незначительной степени. С определенной степенью осторожности можно предположить, что в среднем в пограничном слое на рассматриваемой территории за последние 40 лет происходило замедление скорости ветра.

Таблица 1. Тенденции изменчивости характеристик ветрового режима в пограничном слое на территории Российской Федерации

Table 1. Trends in variability of wind regime characteristics in the boundary layer on the territory of the Russian Federation

Высота, м	Средняя скорость	Повторяемость штилей	Повторяемость слабых ветров	Повторяемость сильных ветров
10	-, (0,+)	-, +	+, (-)	-, +, 0
100	-, (0,+)	+, -, (0)	+, (-, 0)	-, +, (0)
500	-, 0, +	+, 0, -	+, -, (0)	-, +, (0)
1000	0, (-, +)	0, (+, -)	-, +, (0)	-, +, 0

При этом тенденции изменчивости в отдельных регионах могут иметь свои особенности. Так, можно отметить уменьшение повторяемости штилевых условий у поверхности земли на некоторых северных станциях, например, Малые Кармакулы, Тикси, Салехард. На этих станциях во вторую половину рассматриваемого периода у поверхности земли нулевая скорость ветра практически не наблюдалась, хотя в первую половину периода, примерно до 2000 г., повторяемость штилевых условий у поверхности земли на этих станциях была в пределах 5-30%. Возможно, это связано со сменой измерительных условий.

Дискуссия

В работе представлены средние характеристики ветрового режима в нижней части пограничного слоя атмосферы на территории Российской Федерации. Они получены по многолетним аэрологическим наблюдениям российских станций и станций, расположенных на окрестных территориях, за период 1979-2022 гг. Рассмотренные характеристики ветрового режима включают средние скорости и повторяемости штилевых условий, слабых и сильных ветров на нескольких уровнях до высоты 1000 м. Представляет интерес сравнение характеристик ветрового режима с аналогичными характеристиками, полученными по более ранним наблюдениям. В целом особенности распределения средней скорости ветра у поверхности земли совпадают с описанными ранее (Климат России, 2001; Климатические характеристики..., 1983; Национальный

атлас, 2004-2021 и др.). Отдельные детали могут не совпадать, поскольку в приведенных источниках использованы данные приземных станций, которых существенно больше, чем аэрологических. В ряде изданий (Климатические характеристики..., 1983) имеются данные о повторяемости слабых ветров на территории Сибири и Дальнего Востока. Сравнение показало, что по отдельным станциям имеются расхождения. Например, повторяемость приземных ветров со скоростью $V \leq 1 \text{ м с}^{-1}$ по станции Якутск составляет в зимний сезон 53.0% (настоящая работа) и 60.8% (Климатические характеристики..., 1983). В летний, соответственно, 15.2% и 34.2%. Соответствующие цифры по станции Владивосток: зима 28.8% и 11.2%, лето 40.5% и 11.2%.

Помимо средних характеристик получены оценки их временной изменчивости. Следует отметить, что построение тенденций изменчивости ветровых характеристик в нижнем слое атмосферы представляет собой определенную проблему. В значительной степени это связано с неоднородностью рядов, пропусками и уменьшением количества зондирований в 90-е годы, также, возможно, со сменой приборов. На отдельных станциях имеют место различные особенности. Например, на станции Ростов-на-Дону, начиная примерно с 2010 года, приземная скорость ветра существенно уменьшилась по сравнению с более ранним периодом. Это уменьшение прослеживается и на высотах, но на уровне 500 м оно уже не наблюдается. Можно предположить, что в этот период произошло изменение окрестных приземных условий. На ряде северных станций, как было сказано выше, во вторую половину рассматриваемого периода у поверхности земли практически не наблюдалась нулевая скорость ветра. Причины этого могут быть связаны как с естественной изменчивостью, так и с особенностями измерений.

В целом, согласно сделанным оценкам временной изменчивости характеристик ветрового режима, можно сделать предположение о замедлении скорости ветра в пограничном слое за последние 40 лет. Это проявляется прежде всего в увеличении повторяемости слабых ветров, а также в уменьшении средней скорости ветра и повторяемости сильных ветров. С высотой эти особенности постепенно уменьшаются и на уровне 1000 м тенденции изменчивости практически не заметны. Эти особенности отражают общую картину. На отдельных станциях могут проявляться другие закономерности.

Список литературы

- Алдухов, О.А., Брюхань, А.Ф. (2013) Оценка условий атмосферной дисперсии для размещения и проектирования атомных станций, *Атомная энергия*, т. 115, вып. 1, с. 44-47.
- Алдухов, О.А., Черных, И.В. (2018) Долгопериодные изменения скорости ветра в слое атмосферы 0-2 км над российской Арктикой по данным радиозондирования за 1964-2016 гг., *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 52-66.
- Бызова, Н.Л., Шнайдман, В.А., Бондаренко, В.Н. (1987) Расчет вертикального профиля ветра в пограничном слое атмосферы по наземным данным, *Метеорология и гидрология*, № 11, с. 75-83.

Дивинский, Б.В., Кубряков, А.А., Косьян, Р.Д. (2020) Межгодовая изменчивость параметров режима ветра и волнения Черного моря, *Морской гидрофизический журнал*, т. 36, № 4, с.367-382, URL: https://www.researchgate.net/publication/344713362_Mezgodovaa_izmenchivost_parametrov_rezima_vetra_i_volnenia_Cernogo_mora (дата обращения 22.08.2023)

Казначеева, В.Д., Руденкова, Т.В. (1985) Организация текущих аэрологических данных на магнитных лентах ЕС, *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, вып. 115, с. 91-108.

Климат России (2001) Под ред. Н.В. Кобышевой, СПб, Гидрометеиздат, 655 с.

Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере. Справочное пособие (1983) Под ред. Э.Ю. Безутлой, Л., Гидрометеиздат, 328 с.

Москаленко, Л.В., Мельников, В.А., Кузеванова, Н.И., Подымов, О.И. (2016) Разномасштабная изменчивость ветрового режима на прибрежной акватории северо-восточной части Черного моря, *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, № 1, с. 74-86. URL: <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-1-74-86> (07.06.2023), (дата обращения 22.08.2023).

Национальный атлас России. Т. 2. Природа. Экология (2004-2021), 495 с. URL: Ветровой режим , Том 2 @ НАЦИОНАЛЬНЫЙ АТЛАС РОССИИ (nationalatlas.ru), (дата обращения 22.08.2023).

Новый аэроклиматический справочник пограничного слоя атмосферы над СССР. Статистические характеристики ветра. (1987) Т. 2, Москва, Гидрометеиздат, 184 с.

Руденкова, Т.В. (2010) Формат архивации текущих аэрологических данных, поступающих по каналам связи для ПЭВМ, *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, вып. 174, с. 41-63.

Свод правил Инженерные изыскания для размещения, проектирования и строительства АЭС. Часть I. Инженерные изыскания для разработки предпроектной документации (выбор пункта и выбор площадки размещения АЭС) (2012). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200103171?ysclid=licuvb9qk-534398427> (дата обращения 22.08.2023).

Федосов, А.А. (2006) Аппроксимация профиля скорости ветра в пограничном слое атмосферы при неустойчивых и нейтральных состояниях атмосферы, *Фундаментальные исследования*, № 7, с. 64-64. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=5195> (дата обращения 22.08.2023).

Хохлова, А.В. (2019) Определение климатических характеристик скорости ветра на высотах до 600-650 м по приземным измерениям, *Труды ВНИИГМИ-МЦД*, вып. 185, с. 175-186.

Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting, a Safety Guide (1980) *IAEA Safety Series*, N 50-SG-S3, Vienna IAEA, 108 pp.

Boro, D., Venance, D.H., Kossi, I., Bado, N., Kieno, F., Bathiebo, J. (2019) Vertical profile of wind speed in the atmospheric boundary layer, assessment of wind resource on the Bobo Dioulasso Site in Burkina Faso, *Smart Grid and*

Renewable Energy, vol. 10, pp. 257-278, available at: [http:// 10.4236/sgre.2019.1011016](http://10.4236/sgre.2019.1011016) (дата обращения 22.08.2023).

Lei, L., Zhou, Chan, P.W., Zhou, Q., Yang, H.-L. (2023) Variation of virtual temperature and wind in the atmospheric boundary layer over the pearl river estuary during 2011-2020, *Frontiers in Environmental Science*, vol. 10, available at: https://www.researchgate.net/publication/366908109_Variation_of_virtual_temperature_and_wind_in_the_atmospheric_boundary_layer_over_the_pearl_river_estuary_during_2011-2020 (дата обращения 22.08.2023).

References

Alduxov, O.A, Bryuxan, A.F. (2013) Ocenka uslovij atmosfernoj dispersii dlya razmeshheniya i proektirovaniya atomny'x stancij [Assessment of atmospheric dispersion conditions for the placement and design of nuclear power plants], *Atomnaya energiya*, vol. 115, issue 1, pp. 44-47.

Alduxov, O.A., Cherny'x, I.V. (2018) Dolgoperiodny'e izmeneniya skorosti vetra v sloe atmosfery' 0-2 km nad rossijskoj Arktikoj po dannym radiozondirovaniya za 1964-2016 gg. [Long-period changes in wind speed in the atmospheric layer 0-2 km above the Russian Arctic according to radiosonding data for 1964-2016], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 6, pp. 52-66.

By'zova, N.L., Shnajdman, V.A., Bondarenko, V.N. (1987) Raschet vertikal'nogo profilya vetra v pograničnom sloe atmosfery' po nazemnym dannym [Calculation of the vertical wind profile in the boundary layer of the atmosphere based on ground data], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 11, pp. 75-83.

Divinskij, B.V., Kubryakov, A.A., Kos'yan, R.D. (2020) Mezhhodovaya izmenchivost' parametrov rezhima vetra i volneniya Chernogo moray [Interannual variability of the parameters of the wind regime and waves of the Black Sea], *Morskoy gidrofizicheskij zhurnal*, vol. 36, no. 4, pp. 367-382. Available at URL: https://www.researchgate.net/publication/344713362_Mezhhodovaya_izmenchivost_parametrov_rezhima_vetra_i_volneniya_Cernogo_mora (07.06.2023) (accessed 22.08.2023).

Kaznacheeva, V.D., Rudenkova, T.V. (1985) Organizaciya tekushchix aerologicheskix dannyx na magnitnyx lentax ES [Organization of current aerological data on EU magnetic tapes], *Trudy VNIIGMI-MCzD*, issue 115, pp. 91-108.

Klimat Rossii [The climate of Russia] (2001) in N.V. Koby'sheva (ed), St. Petersburg, Russia, 655 pp.

Klimaticheskie xarakteristiki uslovij rasprostraneniya primesej v atmosfere. Spravochnoe posobie [Climatic characteristics of the conditions for the propagation of impurities in the atmosphere. Reference manual] (1983) in E'.Yu. Bezugloj (ed.), Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 328 pp.

Moskalenko, L.V., Mel'nikov, V.A., Kuzevanova, N.I., Pody'mov, O.I. (2016) Raznomasshtabnaya izmenchivost' vetrovogo rezhima na pribrezhnoj akvatorii severo-vostočnoj chasti Chernogo moray [Multi-scale variability of the wind regime in the coastal waters of the northeastern part of the Black Sea],

Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya, no. 1, pp. 74-86. Available at URL: <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-1-74-86> (07.06.2023) (accessed 22.08.2023).

Nacional'nyj atlas Rossii. Vol. 2. Priroda. E'kologiya (2004-2021) [National Atlas of Russia, vol. 2. Nature. Ecology], 495 p. Available at URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/172.html> (accessed 22.08.2023).

Novyj ae'roklimaticheskij spravochnik pogranichnogo sloya atmosfery nad SSSR. Vol. 2. Statisticheskie xarakteristiki vetra (1987) [New ae'agroclimatic reference of the boundary layer of the atmosphere over the USSR. Vol. 2. Statistical characteristics of the wind], Gidrometeoizdat, Moscow, Russia, 184 p.

Rudenkova, T.V. (2010) Format arxivacii tekushhix ae'rologicheskix danny'x, postupayushhix po kanalam svyazi dlya PE`VM [Format for archiving current aerological data received via communication channels for a PC], *Trudy VNIIGMI-MCzD*, issue 174, pp. 41-63.

Svod pravil (2012) Inzhenerny'e izy'skaniya dlya razmeshheniya, proektirovaniya i stroitel'stva AE`S. Chast' I. Inzhenerny'e izy'skaniya dlya razrabotki predproektnoj dokumentacii (vy`bor punkta i vy`bor ploshhadki razmeshheniya AE`S) [Code of Rules. Engineering surveys for the placement, design and construction of nuclear power plants. Part I. Engineering surveys for the development of pre-project documentation (selection of the point and selection of the NPP site)]. Available at URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200103171?ysclid=licuwb9qk534398427> (accessed 22.08.2023)

Fedosov, A.A. (2006) Approksimaciya profilya skorosti vetra v pogranichnom sloe atmosfery` pri neustojchivy`x i nejtral`ny`x sostoyaniyax atmosfery` [Approximation of the wind velocity profile in the atmospheric boundary layer under unstable and neutral atmospheric conditions], *Fundamental'ny'e issledovaniya*, no. 7, pp. 64-64. Available at URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=5195> (accessed: 22.08.2023).

Xoxlova, A.V. (2019) Opredelenie klimaticheskix xarakteristik skorosti vetra na vy`sotax do 600-650 m poprizemny`m izmereniyam [Determination of climatic characteristics of wind speed at altitudes up to 600-650 m by surface measurements], *Trudy VNIIGMI-MCzD*, issue 185, pp. 175-186.

Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting, a Safety Guide (1980) *IAEA Safety Series*, N 50-SG-S3, Vienna IAEA, 108 pp.

Boro, D., Venance, D.H., Kossi, I., Bado, N., Kieno, F., Bathiebo J. (2019) Vertical profile of wind speed in the atmospheric boundary layer and assessment of wind resource on the Bobo Dioulasso Site in Burkina Faso, *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 10, pp. 257-278, available at: <http://10.4236/sgre.2019.1011016> (дата обращения 22.08.2023).

Lei, L., Zhou, Chan, P.W., Zhou, Q., Yang, H.-L. (2023) Variation of virtual temperature and wind in the atmospheric boundary layer over the pearl river estuary during 2011-2020, *Frontiers in Environmental Science*, vol. 10, available at: https://www.researchgate.net/publication/366908109_Variation_of_virtual_

temperature_and_wind_in_the_atmospheric_boundary_layer_over_the_pearl_river_estuary_during_2011-2020 (дата обращения 22.08.2023).

Поступила в редакцию: 29.08.2023 г.

Доработана после рецензирования: 15.09.2023 г.

Принята к публикации: 06.11.2023 г.

Для цитирования / For citation:

Хохлова, А.В. (2023) Повторяемость слабых и сильных ветров в пограничном слое атмосферы на территории Российской Федерации, оцененная по данным многолетних аэрологических наблюдений, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 4, с. 506-519, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-506-519.

Khokhlova, A.V. (2023) The frequency of weak and strong winds in the atmospheric boundary layer on the territory of the Russian Federation assessed from data of long-term aerological observation, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 4, pp. 506-519, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-506-519.

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ КЛИМАТОЛОГИЯ

Полное библиографическое описание всех статей журнала представлено в Научной электронной библиотеке **elibrary.ru** с целью формирования Российского индекса научного цитирования (**РИНЦ**).

Журнал входит в **ПЕРЕЧЕНЬ ВАК** рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Все публикуемые статьи рецензируются. В среднем период рассмотрения статей при однократном рецензировании составляет 4 месяца.

Осуществляется анонимное рецензирование одним-двумя рецензентами как из числа членов редколлегии журнала, так и внешними рецензентами. Все публикуемые статьи проходят проверку на плагиат с помощью <https://www.antiplagiat.ru/>, результаты которой документируются и хранятся в архиве.

Редакция журнала «Фундаментальная и прикладная климатология» признает обязательными для соблюдения авторами, рецензентами, членами редколлегии и сотрудниками редакции требования «**Кодекса этики научных публикаций**», разработанного и утвержденного Комитетом по этике научных публикаций, а также заявляет об отсутствии злоупотреблений служебным положением в деятельности редакции.

Публикация в журнале бесплатная.

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

FUNDAMENTAL AND APPLIED CLIMATOLOGY

Full bibliographic description of all articles published in the journal is presented in the Scientific Electronic Library (elibrary.ru) for the formation of the Russian Science Citation Index (RSCI).

The journal is included into the List of Peer-reviewed Scientific Journals (compiled by Supreme Qualification Council), where basic scientific results of PhD and DSc dissertations must be published.

All papers submitted are peer-reviewed. The average review period for a single review is 4 months.

Anonymous review is carried out by one or two reviewers from among the members of the Editorial Board of the journal, as well as by external reviewers. All published articles are checked for plagiarism using <https://www.antiplagiat.ru/>, the results of which are documented and stored in the archive.

The Editorial Office of "Fundamental and applied climatology" finds it obligatory for authors, reviewers, editorial board members and editorial staff to meet requirements of the "Code of Ethics for Scientific Publications", developed and approved by the Committee on Scientific Publications Ethics as well as declares no conflicts of interest in the activities of the Editorial Board.

Publication in the journal is free of charge.

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