

ISSN 2410-8758



Фундаментальная и прикладная климатология

Fundamental and
Applied Climatology

Том 10 № 4

2024

Фундаментальная и прикладная климатология том 10 № 4 / 2024 г.

Federal Service
for Hydrometeorology
and Environmental
Monitoring (Roshydromet)

ISSN 2410-8758

FUNDAMENTAL AND APPLIED
CLIMATOLOGY

Volume 10 № 4

Moscow 2024

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ
КЛИМАТОЛОГИЯ**

Том 10 № 4 2024 год

Научный редактор: М.Ю. Бардин

Выпускающий редактор: В.А. Гинзбург

Технические редакторы:

Л.В. Кудрявцева, И.М. Брускина

Корректор: Л.В. Цибизова

Верстка: Л.А. Прохорова

Формат: 160 x 260

Печать цифровая

Бумага офсетная

Печатных листов:

Тираж 150 экз.

Заказ №

Свидетельство о регистрации СМИ:

ПИ № ФС77-74294 Подписано в печать

Отпечатано в типографии

Федеральная служба
по гидрометеорологии и мониторингу
окружающей среды
(Росгидромет)

ISSN 2410-8758

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ
КЛИМАТОЛОГИЯ**

Том 10 № 4

Москва 2024

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), А.М. Стерин (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, А.Б. Полонский, Л.А. Прохорова (ответственный секретарь), Э.Я. Ранькова, В.А. Семенов, Ю.Б. Скачков, 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), A.M. Sterin, (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, A.B. Polonskiy, L.A. Prokhorova (Executive Secretary), E.Ya. Rankova, V.A. Semenov, Yu.B. Skachkov, 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

Нашему журналу – 10 лет!.....	461
-------------------------------	-----

ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБЗОРЫ

Алейников А.А., Липка О.Н.

Изменение оледенения Новой Земли по данным дистанционного зондирования.....	464
--	-----

Анахаев К.Н., Беликов В.В., Анахаев А.А.

Усовершенствование модели селевых кадастров с использованием расчетной оценки склонового стока.....	492
--	-----

Башмаков И.А.

Глобальные рынки аммиака: перспективы развития и декарбонизации.....	510
---	-----

**Бердин В.Х., Уледова Н.В., Кевбрина И.А., Миронов А.А., Попов Н.В.,
Третьяк О.С., Бобылев П.М., Кабанов Н.С., Гитарский М.Л.**

Актуализация оценок эмиссии метана в угледобывающей промышленности России.....	541
---	-----

МОНИТОРИНГ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Кирпичников И.А.

Исторические известия о климатических условиях, погодных и природных явлениях на территории России в письменных источниках XVII века: опыт составления базы данных и перспективы изучения.....	561
---	-----

CONTENTS

EVENTS AND COMMEMORATIVE DATES

Our journal is 10!.....	461
-------------------------	-----

STUDIES AND REVIEWS

Aleynikov A.A., Lipka O.N.

Changes in glaciation of Novaya Zemlya according to remote sensing data.....	464
--	-----

Anakhaev K.N., Belikov V.V., Anakhaev A.A.

Improvement of the mudflow inventory model using the estimates of slope runoff.....	492
---	-----

Bashmakov I.A.

Global ammonia markets: development and decarbonization prospects.....	510
--	-----

Berdin V.Kh., Uledova N.V., Kevbrina I.A., Mironov A.A., Popov N.V., Tret'yak O.S., Bobylev P.M., Kabanov N.S., Ginarskiy M.L.

The update of methane emission estimates for the coal mining sector in the Russian Federation.....	541
--	-----

CLIMATE SYSTEM MONITORING

Kirpichnikov I.A.

Historical documentary evidence related to climatic conditions, weather and natural phenomena on the territory of Russia in the seventeenth-century written historical sources: construction of the database and research perspectives.....	561
---	-----

СОБЫТИЯ И ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ

Нашему журналу – 10 лет!

*С.М. Семенов,
главный редактор,
член-корреспондент РАН,
научный руководитель
Института глобального
климата и экологии
имени академика
Ю.А. Израэля*



Отечественные ученые внесли весомый вклад в становление и развитие климатологии. Их труды имели мировую известность в XX веке. Наши современники продолжают эту традицию, и их роль в мировом сообществе климатологов весьма заметна. Результаты исследований климата публиковались и в ведущих академических журналах, и в ведомственных периодических изданиях Гидрометеорологической службы страны. Однако специализированного научного журнала, посвященного проблемам фундаментальной и прикладной климатологии, в стране не было. В то же время необходимость в таком периодическом издании была очевидной, поскольку проблемы современного изменения климата оказались в фокусе внимания и правительств, и научных кругов, и профильных общественных организаций. Число научных программ и проектов в этой области существенно увеличилось. Соответственно возросла и потребность информировать заинтересованных читателей, прежде всего, коллег по цеху о результатах работы.



А.В. Фролов

В 2014 г. я обратился к Александру Васильевичу Фролову, в то время – руководителю Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), с предложением организовать издание научного журнала, посвященного проблемам климата в широком смысле. Предложение было поддержано, и эта работа поручена Институту глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля (ИГКЭ).

Тематически сфера охвата нашего журнала определена следующим образом: 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, результаты мониторинга климатической системы. Публикуются также материалы о значительных событиях в научном мире, связанных с проблемой климата. Журнал выходит 4 раза в год.

Сообразно своей широкой тематике наш журнал имеет многочисленную редколлегию, в которую входят известные ученые из институтов Гидрометеорологической службы страны и Российской академии наук, а также из высших учебных заведений. Они работают в разных городах – Москве, Санкт-Петербурге, Обнинске, Новосибирске, Тюмени, Иркутске, Якутске, Владивостоке, Севастополе, Одессе, Минске. Это – эксперты в климатологии и сопряженных разделах других наук. Среди них – четыре члена Российской академии наук.

Все научные журналы, как известно, имеют свой «характер», свой стиль взаимодействия с авторами при рассмотрении поступающих рукописей. Для нашего журнала характерно особенно бережное отношение к поступающим рукописям и стремление так взаимодействовать с авторами, чтобы в максимальной степени помогать им доводить рукопись до публикации, даже если в начальной версии она не была совершенной. Взаимодействуя с авторами, мы стремимся к тому, чтобы автор объяснил контекст (т.е. частью какой более широкой проблемы является его тема), четко описал использованный метод и полученные результаты, охарактеризовал их новизну, сравнивая с работами других авторов. Конечно, методические и фактические ошибки неприемлемы. Все остальное – на ответственности автора.

Рассматривая на заседании редколлегии рукописи, получившие положительные отзывы рецензентов, члены редколлегии весьма часто дополнительно просматривают рукописи и составляют свое мнение о них как на основании отзывов рецензентов, так и на основании собственного впечатления.

Быть членом нашей редколлегии – нелегкая работа, и мне хотелось бы выразить им искреннюю признательность за этот труд. Особая благодарность – заместителям главного редактора кандидату физико-математических наук Михаилу Юрьевичу Бардину (ИГКЭ), доктору физико-математических наук Александру Марковичу Стерину (Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных, ВНИИГМИ-МЦД) и ответственному секретарю редколлегии Ларисе Александровне Прохоровой (ИГКЭ).

Выпуск периодического издания – большие хлопоты в отношении технического редактирования тома, верстки статей, подготовки оригинал-макета, корректуры статей в контакте с авторами, взаимодействия с типографией. Всю эту нелегкую работу делает команда сотрудников ИГКЭ под руководством члена редколлегии, выпускающего редактора, кандидата географических наук Вероники Александровны Гинзбург. Сердечное им спасибо.



А.М. Стерин



М.Ю. Бардин



В.А. Гинзбург



Л.А. Прохорова

За прошедшие 10 лет с момента выхода первого номера журнала у нас публиковались известные российские ученые, а также специалисты из Беларуси, Азербайджана, Танзании, Венесуэлы и Швеции. Мы весьма ценим интерес международного научного сообщества к нашему изданию.

Мы стараемся своевременно информировать читателей о событиях и памятных датах, связанных с историей и современным развитием фундаментальной и прикладной климатологии. В том числе публикуется информация о деятельности Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) и о содержании научных докладов, выпускаемых МГЭИК.

В заключение хотел бы поблагодарить всех авторов, которые проявили интерес к нашему журналу и выбрали именно это издание для того, чтобы донести свои научные идеи и результаты до читателей. Мы с нетерпением ожидаем поступления их следующих рукописей, и, конечно, будем с энтузиазмом приветствовать и новые имена.

Изменение оледенения Новой Земли по данным дистанционного зондирования

*А.А. Алейников¹⁾, О.Н. Липка^{1,2)}**

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

²⁾ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Россия, 109028, г. Москва, Покровский бульвар, д. 11

*Адрес для переписки: olipka@mail.ru

Реферат. В условиях изменений климата оледенение архипелага Новая Земля сокращается, что подтверждается данными дистанционного зондирования. Для оценки была использована картосхема ледников Новой Земли по состоянию на 1952 г., мозаика космических снимков программы «Corona» за 1961-1962 гг.; мозаика Landsat-7 ETM+ за август 2001 г.; мозаика Landsat-8 OLI/TIRS и Landsat-7 ETM+ за август-сентябрь 2013 г.; мозаика Landsat-8 OLI/TIRS за август 2023 г. и Sentinel-2A/B за сентябрь 2023 г. Сравнение покрытой льдом площади конца летнего сезона 2023 г. с картами и таблицами Каталога ледников СССР показало суммарное сокращение до $21\,702 \pm 108 \text{ км}^2$, т.е. на 9.9%. Наиболее активно процесс деградации проходит южнее 74.5° с.ш. , где площадь оледенения сократилось на 33.3%. Средняя скорость сокращения ледников Новой Земли выросла с $29.8 \text{ км}^2/\text{год}$ в период 1961-2001 гг. до $57.7 \text{ км}^2/\text{год}$ за период 2013-2023 гг. Сокращение ледников бассейна Баренцева моря происходит интенсивнее сокращения ледников бассейна Карского моря в среднем 1.7 раза.

Ключевые слова. Новая Земля, изменения климата, дистанционное зондирование, деградация оледенения.

Changes in glaciation of Novaya Zemlya according to remote sensing data

*A.A. Aleynikov¹⁾, O.N. Lipka^{1,2)}**

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

²⁾ National Research University Higher School of Economics,
11, Pokrovsky Boulevard, 109028, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: olipka@mail.ru

Abstract. In the context of climate change, glaciation of the Novaya Zemlya archipelago is decreasing, which is confirmed by remote sensing data. For the assessment, we used a map of Novaya Zemlya glaciers as of 1952, a mosaic of space images from the Corona program for 1961-1962; Landsat-7 ETM+ mosaic for August 2001; mosaic of Landsat-8 OLI/TIRS and Landsat-7 ETM+ for August – September 2013; Landsat-8 OLI/TIRS mosaic for August 2023 and Sentinel-2A/B for September 2023. A comparison of the ice-covered area at the end of the 2023 summer season with maps and tables of the USSR Glacier Catalog showed a total reduction to $21702 \pm 108 \text{ km}^2$, i.e. by 9.9%. The deglaciation process is most active south of 74.5° N , where the glaciation area has decreased by 33.3%. The average rate of shrinkage of Novaya Zemlya glaciers increased from $29.8 \text{ km}^2/\text{year}$ in 1961-2001 up to $57.7 \text{ km}^2/\text{year}$ in 2013-2023. The reduction of glaciers in the Barents Sea basin is more intense than near the Kara Sea on average in 1.7 times.

Keywords. Novaya Zemlya archipelago, climate change, remote sensing, glaciation degradation.

Введение

Деграция оледенения горных систем материков, а также островов Арктики считается одним из наиболее очевидных и доказанных проявлений изменений климата (Roe et al., 2017; IPCC, 2019). Наблюдаемая в настоящее время скорость потери массы арктических ледников выше, чем в любой из периодов за последние 4000 лет (IPCC, 2019), и увеличилась в XXI веке (Hugonnet et al., 2021). Регулярно выходят публикации, в которых на основе данных дистанционного зондирования оценивается динамика площадей ледников или линейная скорость отступления, оценивается изменение массы (Ciraci et al., 2018; Li et al., 2019; Hock, Huss, 2021; Tepes et al., 2021; Dussaillant, et al., 2024). Как правило, фиксируется и анализируется состояние ледниковых систем на определенный период времени по отношению к некому базовому периоду с разной степенью детализации. Т.к. периоды выбираются разные, довольно трудно сопоставлять полученные результаты. Даже в тех случаях, когда исследованием были охвачены все зоны материкового и островного оледенения России (Котляков и др., 2015; Хромова и др., 2021), информация быстро устаревает, т.к. отступление краевой части ледника продолжается и может достигать более 20 м/год (Алейников, Липка, 2018).

Негативные последствия деградации оледенения включают снижение водообеспеченности аридных регионов, формирование прорывоопасных ледниковых озер, отступление береговой линии арктических островов, распреснение прилегающих акваторий, формирование айсбергов и др. (Carey et al., 2017; IPCC, 2019; Davison et al., 2020; IPCC, 2022; Третий оценочный доклад..., 2022). В целях планирования хозяйственной деятельности и обеспечения безопасности населения необходимо получать регулярно обновляющуюся и подготовленную по единой системе информацию о состоянии ледников, которая в контексте адаптации к изменениям климата может рассматриваться как часть климатического обслуживания.

Современное оледенение арктических островов России играет доминирующую роль в природе этих областей и служит важным естественным природным индикатором изменения климата. Важнейшей особенностью ледников данного региона является то, что заметная доля потерь состоит из айсбергов, а не из жидкой воды (Второй оценочный..., 2014). Прослеживается связь интенсивности айсбергообразования, включая количество айсбергов, ежегодно откалывающихся от выводных ледников Земли Франца-Иосифа, Северной Земли и Новой Земли, с аномалиями температуры приповерхностного воздуха в Арктике. Максимальная айсберговая активность ледников наблюдалась в рекордно теплом 2020 г., когда размер наибольшего айсберга составил 5 км (Бычкова и др., 2024).

Расположенные на арктических островах ледниковые системы приурочены к зоне наиболее быстрого повышения температуры воздуха на территории нашей страны в последние десятилетия: 0.8-1.2°C/год. Однако после 2020 г. намечилось некоторое понижение температуры на побережье Северного Ледовитого океана. Количество осадков не меняется или слабо убывает на архипелагах Новая Земля, Северная Земля, Новосибирских островах. На акватории арктических морей минимальная ледовитость в сентябре сокращалась с 1996 г. и за десять лет уменьшилась в восемь раз: с 1892 тыс. км² до 234 тыс. км². В последующие годы площадь колебалась вблизи этого уровня с минимальным значением 26.3 тыс. км² в 2020 г. (Доклад об особенностях климата..., 2024). Северо-восточную часть Баренцева и восточную часть Карского морей вдоль побережья Новой Земли охватил процесс «атлантификации»: в последние десятилетия наблюдаются значительные положительные аномалии температуры воды в зимний сезон (1.5-2°C), что связано с общим сокращением ледяного покрова в Северном Ледовитом океане и возрастанием влияния океанского тепла на приповерхностный слой океана и ледяной покров (Третий оценочный..., 2022).

Для оценки изменений ледников, в том числе арктических островов, необходимо использовать как минимум два параметра: линейная мера отступления и площадь. Линейная мера – расстояние, на которое отступил или наступил ледник, не вполне достаточна и во многих случаях (особенно для широкого фронта ледника) не характеризует полностью реальные изменения. То же относится и к отдельно взятой площадной мере, так как, например, узкие языки ледников могут заметно сократиться при малых потерях площади (Оледенение Северной..., 2006).

Целью исследования является оценка изменения ледников в условиях меняющегося на примере крупного района оледенения (архипелаг Новая Земля) на нескольких временных горизонтах и сопоставление скоростей деградации. Для этого решались задачи:

- разработка методики исследования, опирающейся на доступные данные, которая может быть использована для любого района оледенения России;
- тестирование предлагаемой методики на примере архипелага Новая Земля;

- сопоставление результатов дешифрирования данных дистанционного зондирования и картографических материалов;
- оценка скоростей изменения оледенения для рассматриваемых временных интервалов.

Материалы и методика

Система регулярной оценки динамики площадей ледников (скорость деградации) с использованием данных дистанционного зондирования за регулярные периоды наблюдений может быть организована следующим образом.

В качестве наиболее ранней исходной картографической информации, охватывающей все ледниковые системы страны, можно использовать данные Каталога ледников СССР (1966-1982). Он был составлен по решению, принятому секцией гляциологии Межведомственного геофизического комитета при президиуме Академии наук СССР в марте 1962 г. (Котляков и др., 2015). В Каталоге по бассейновому принципу были выделены районы, которые соответствовали томам описания (рис. 1). Для каждой ледниковой системы приводятся данные о площадях, по картам возможно оценить длины ледников на момент сбора информации для тома. Использование единой унифицированной системы отсчета тем самым позволяет обеспечить сравнимость результатов.

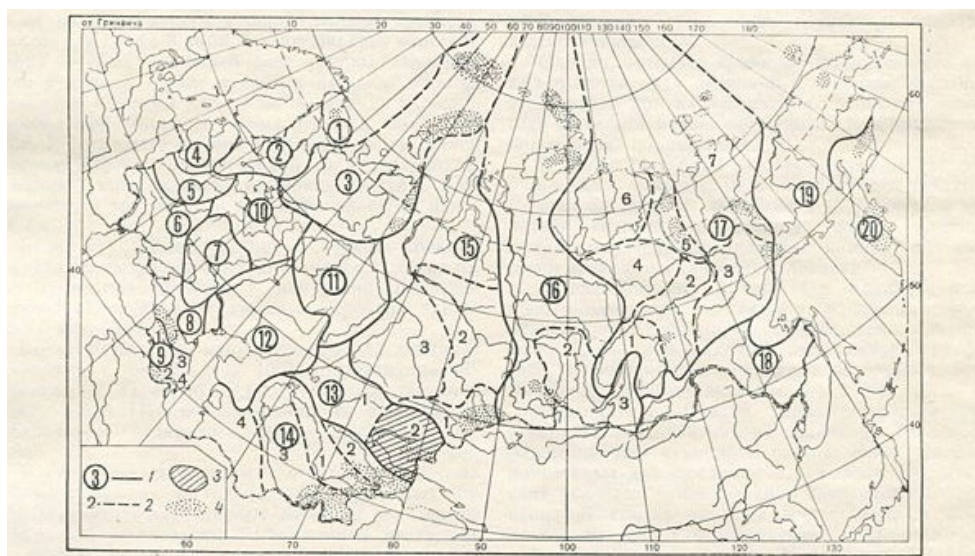


Рисунок 1. Схема деления территории СССР на тома и выпуски Каталога ледников (1966-1982)

1 – номера томов и границы отнесения к ним территорий; 2 – номера выпусков и границы отнесения к ним территорий; 3 – территории, сведения о которых включены в спецвыпуск; 4 – районы современного оледенения

Figure 1. Scheme of dividing the territory of the USSR into volumes and issues of the Catalog of Glaciers (1966-1982)

1 – volume numbers and boundaries of the territories indicated for them; 2 – numbers of issues and boundaries of territories assigned to them; 3 – territories, information about which is included into a special volume; 4 – areas of modern glaciation

В качестве базовой линии для разных временных интервалов можно использовать следующие данные:

1) Каталог ледников СССР (исходные схемы составлены по результатам аэрофотосъемки 1952 г.);

2) открытые данные космической съемки программы Corona, которая была разработана Управлением по науке ЦРУ при поддержке ВВС США. Предназначалась для слежения за наземными объектами потенциального противника, в основном: СССР, КНР, странами Варшавского договора. Действовала с июня 1959 до мая 1972 г. Снимки в панхроматическом спектре, имеют высокое разрешение (3.5-5 метров), но нуждаются в пространственной привязке и ортотрансформации (Dashora et al., 2007);

3) космические снимки Landsat-5 TM; Landsat-7 ETM+; Landsat-8/OLI/TIRS 1984 г. (с пространственным разрешением – 30 м, панхроматический канал – 15 м);

4) космические снимки Sentinel-2A/B (10 м) доступны с 2015 г.;

5) в литературных источниках публикуются данные наземных наблюдений для отдельных ледников, в том числе массбалансовые;

6) Каталог ледников России Института географии РАН, по данным снимков Sentinel на 2016-2019 гг. (Хромова и др., 2021).

Таким образом, для любого района оледенения на территории России можно оценить изменение площади оледенения для нескольких сопоставимых временных горизонтов, используя данные: Каталога ледников СССР (или CORONA) за период 1950-1970-е годы – в зависимости от наличия исходной информации; данные по состоянию на 80-е гг. по снимкам Landsat-5 TM; данные на начало XXI века (1999-2003 гг.) по более современным снимкам Landsat-7 ETM; данные для 2013-2023 гг. доступны по снимкам Landsat-8/OLI/TIRS, а начиная с 2015 г. – и по снимкам Sentinel-2A/B, имеющим более высокое пространственное разрешение.

Использованные материалы для оценки динамики ледников Новой Земли:

1) картосхема ледников Новой Земли, опубликованная в «Каталоге ледников СССР» (1978). Для определения положения и изменения фронтов всех выводных ледников было использовано 13 листов топографических карт масштаба 1:200 000, составленных по данным аэрофотосъемки 1952 г. Схемы, собранные в мозаику ледников Новой Земли из Каталога ледников СССР, представлены на рис. 2а;

2) мозаика космических снимков, полученных по космической программе «Corona» (USGS)¹⁾ за 1961-1962 гг. (рис. 2б);

3) мозаика космических снимков Landsat-7 ETM+ за август 2001 г. (рис. 3а), (USGS), 2001 г. был выбран нами как последний год работы спутника Landsat-7 ETM+ в полноценном режиме;

4) мозаика космических снимков Landsat-8 OLI/TIRS и Landsat-7 ETM+ за август-сентябрь 2013 г., т.к. 2013 г. – дата запуска нового спутника Landsat-8 OLI/TIRS рис. 3б, (USGS);

¹⁾US Geological Survey, available at: URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 02.10.2024).

5) мозаика космических снимков Landsat-8 OLI/TIRS за август 2023 г. (рис. 4а) и Sentinel-2A/B(Copernicus²⁾) на конец периода абляции – начало сентября 2023 г. (рис. 4б).

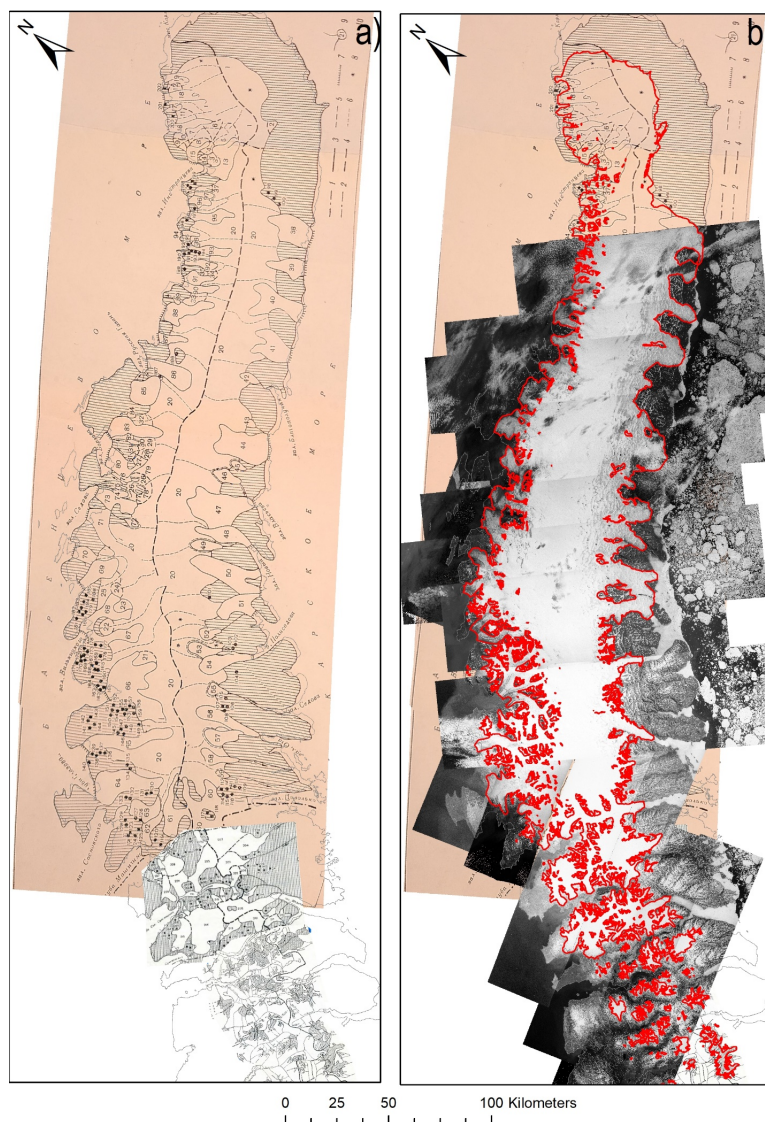


Рисунок 2. Схема расположения ледников: а) – картосхема из «Каталога ледников СССР», отражающая состояние ледников на 1952 г.; б) – наложение мозаики космических снимков по программе Corona за 1961 г. на картосхему 1952 г.

Красным цветом отрисован совместный контур ледников 1952-1961 г. Большая часть ледников отрисована по снимку 1961 г., крайние северные и южные участки по схеме 1952 г.

Figure 2. The scheme of glaciers: а) – map from the “Catalog of Glaciers of the USSR”, as the state of glaciers in 1952; б) – overlaying a mosaic of space images of Corona program 1961 on the map from 1952. The joint contour of glaciers from 1952-1961 is marked by red. Most of the glaciers are drawn according to image 1961 (b), and the extreme northern and southern sections are drawn using map 1952

²⁾The Earth observation component of the European Union’s Space programme. available at: URL: <https://dataspace.copernicus.eu> (дата обращения 02 октября 2024).

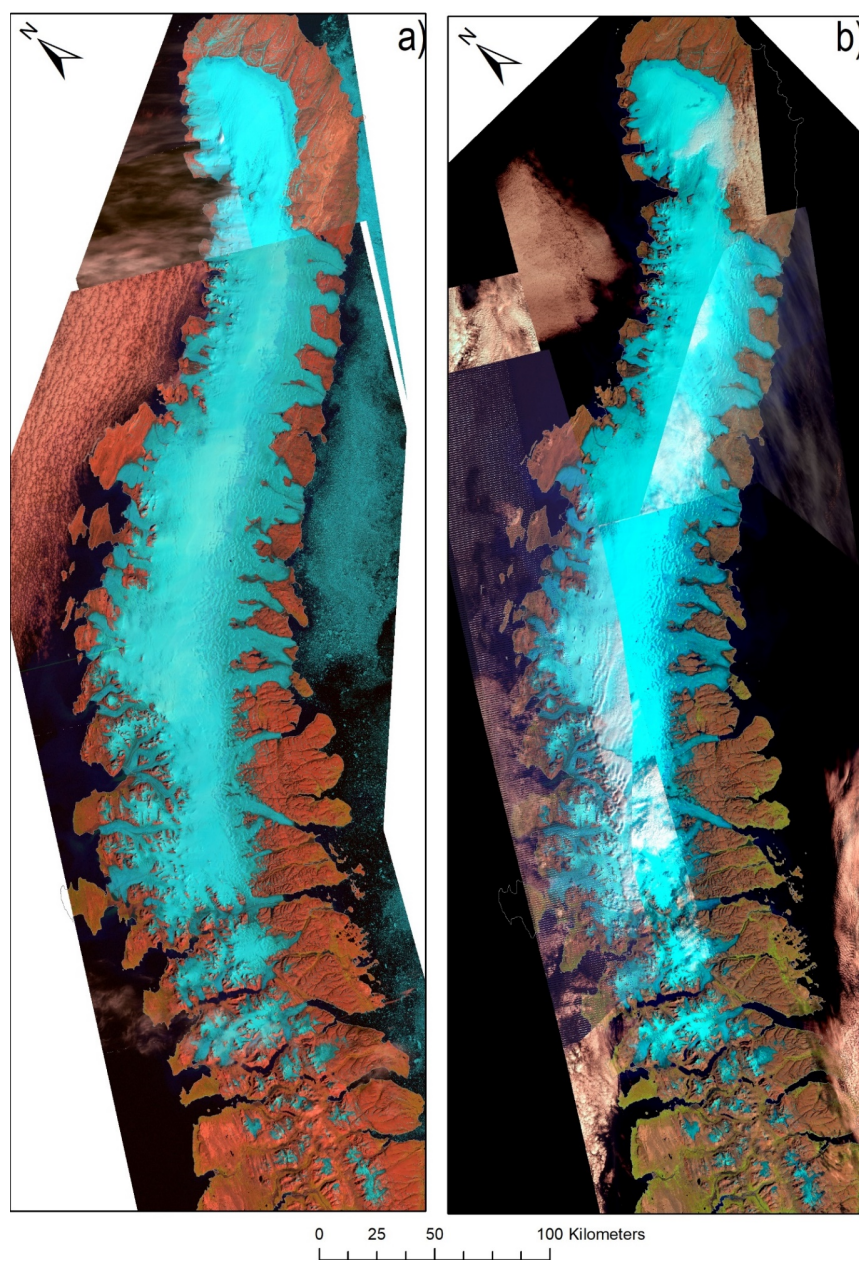


Рисунок 3. Мозаика космических снимков: а) Landsat-7 ETM+ за август 2001 г;
б) Landsat-8 OLI/TIRS, Landsat-7 ETM+ за август-сентябрь 2013 г.

Figure 3. Mosaic of satellite images: a) Landsat-7 ETM+ for August 2001; b) Landsat-8 OLI/TIRS, Landsat-7 ETM+ for August-September 2013

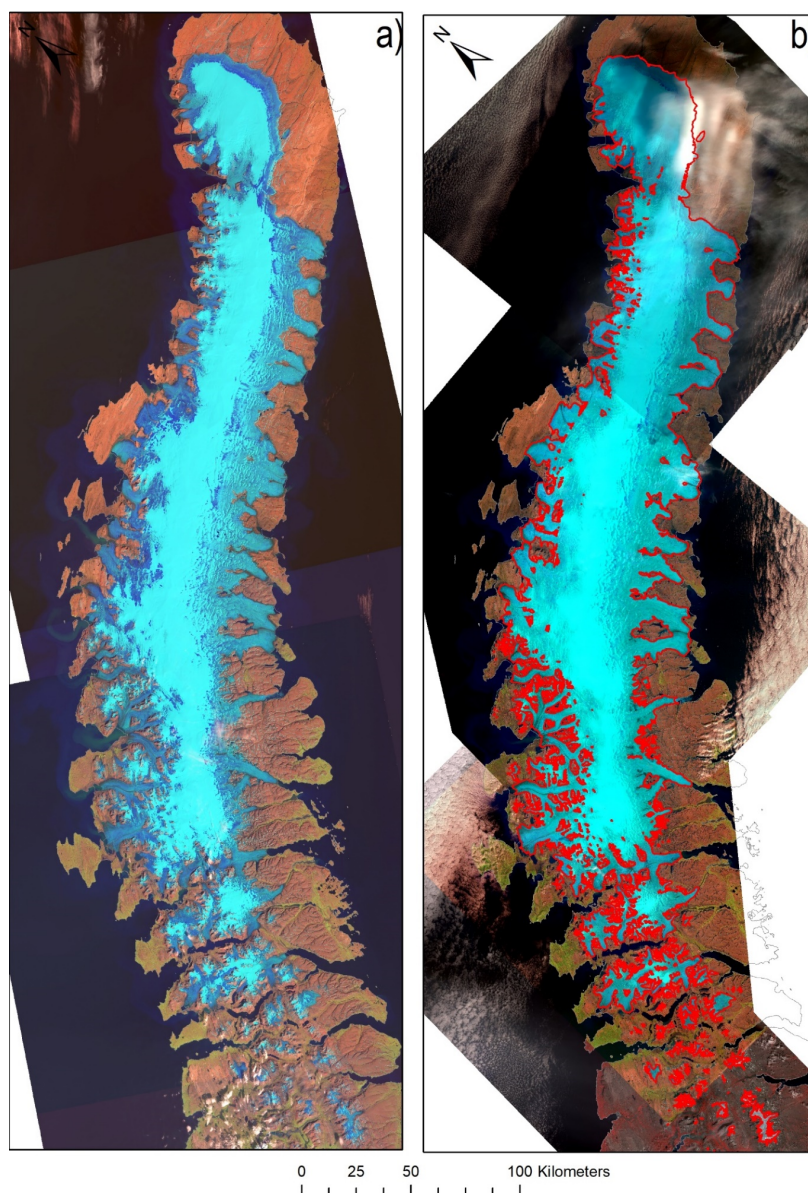


Рисунок 4. Мозаика космических снимков: а) Landsat-8 OLI/TIRS за август 2023 г.;
б) Sentinel-2 за сентябрь 2023 г.

Красным цветом отрисован итоговой контур ледников в 2023 г.

Figure 4. Mosaic of satellite images: a) Landsat-8 OLI/TIRS for August 2023;
b) Sentinel-2 for September 2023

The red line marks the final contour of the glaciers in 2023

Методы дешифрирования и картографирования

Картирование открытого льда и снежного покрова по космическим снимкам мы осуществляли методом спектральной классификации с последующей ручной коррекцией. Данный метод основан на спектральных призна-

ках, в качестве которых служит набор спектральных яркостей, зарегистрированных многозональным снимком. При дешифрировании ледников по серии многозональных снимков, используется эффект оптимального отображения различных объектов в определенных зонах спектра для разделения снежного покрова, льда и скальных поверхностей. Мы использовали комбинацию спектральных каналов в ближнем инфракрасном спектре – NIR : RED : GREEN (4:3:2 – для Landsat-7 ETM+, 5:4:3 – для Landsat-8/9 OLI/TIRS и 8:4:3 для Sentinel 2A/B); и в среднем инфракрасном спектре – SWIR : NIR : GREEN (7:4:2 – для Landsat-7 ETM+, 7:5:3 – для Landsat-8/9 OLI/TIRS и 11:8:3 для Sentinel 2A/B).

Задача компьютерного дешифрирования снимков сводится к кластеризации – разбиению всех пикселей цифрового снимка на несколько групп. При использовании кластеризации мы заранее задаем количество классов, которые хотим получить.

ISODATA – один из наиболее популярных алгоритмов, используемых для классификации по спектральной яркости «без учителя». Он базируется на кластеризации изображения, основанной на разнице между средними значениями кластеров (минимальном спектральном расстоянии между центрами классов). Перед началом классификации неизвестно: сколько и каких объектов есть на снимке. После проведения классификации необходимо дешифрирование полученных классов, чтобы определить, каким именно объектам они соответствуют (рис. 5).

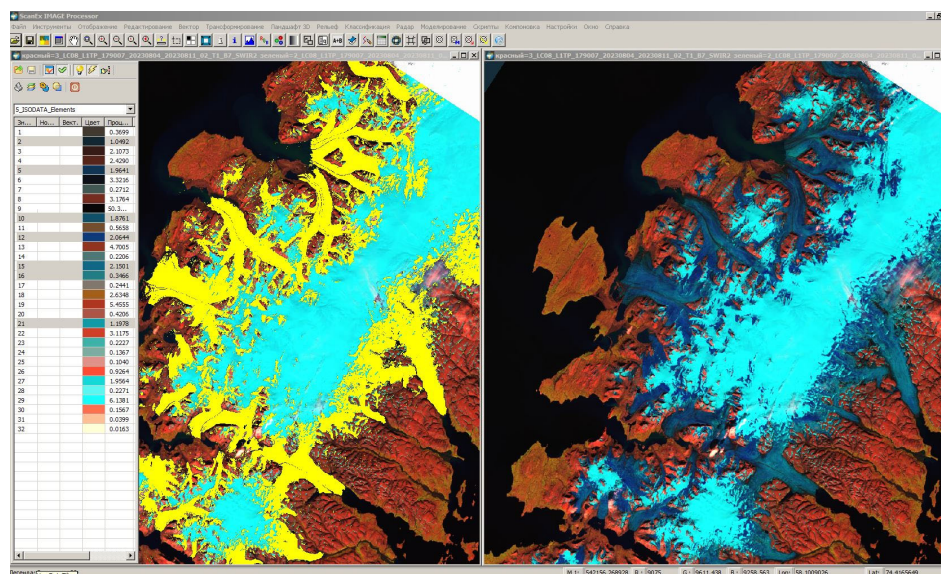


Рисунок 5. Применение метода спектральной классификации. Разбивка изображения на 32 класса по спектральной яркости. Выделение класса ледовой поверхности (жёлтый цвет на левом снимке). Правый снимок – спектральное изображение в инфракрасных тонах. (Каналы SWIR-NIR-GREEN)

Figure 5. Application of the spectral classification method. Dividing the image into 32 classes according to spectral brightness. Identification of the class of the ice surface (yellow color in the left photo). The right image is a spectral image in infrared tones. (SWIR-NIR-GREEN channels)

Затем оператор объединяет классы, которые соответствуют ледовому и снежному покрову, и изображение переводится в векторный формат по классам льда и снега (рис. 6).

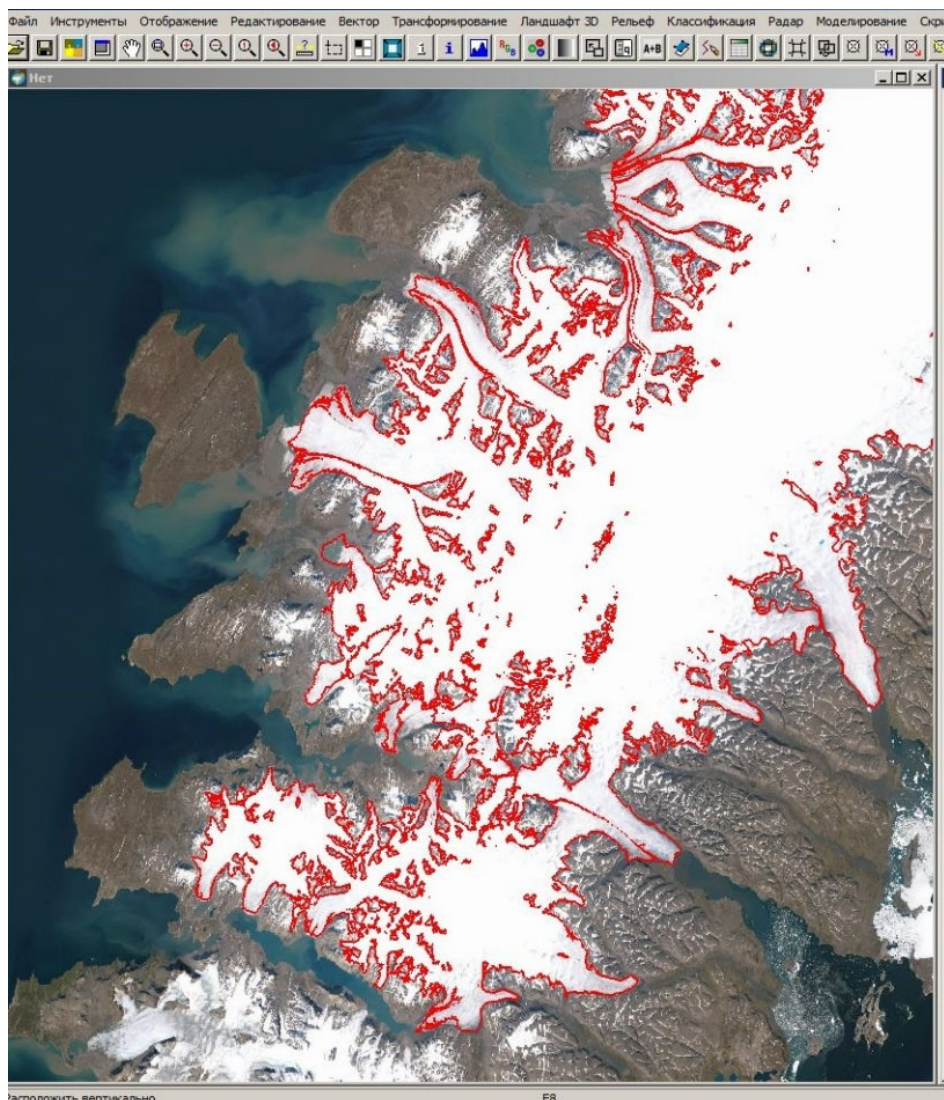


Рисунок 6. Автоматическая векторизация изображения по классу льда и снега (красный контур)

Figure 6. Automatic vectorization of an image by ice and snow class (red line)

Дальнейшее дешифрирование и коррекция осуществлялась в векторном формате. Ручная корректировка результатов классификации заключалась в проверке результатов автоматической классификации, отбраковки поверхностей, покрытых снегом, но не относящихся к ледникам, а также дешифрировании контуров, покрытых поверхностной мореной.

Таким образом мы получили векторные слои ледников Новой Земли 2023 г. (по данным Sentinel-2A/B и Landsat-8 OLI/TIRS), 2013 г. (по данным

Landsat-8 OLI/TIRS и Landsat-7 ETM+) и 2001 года (по данным Landsat-7 ETM+).

Космические снимки программы Corona 1961/1962 гг. и схемы ледников из Каталога ледников СССР геопривязывали и ортотрансформировали с использованием цифровой модели рельефа (для снимков программы Corona) по космическим снимкам Sentinel-2A/B 2023 г. Точность привязки для снимков Corona соответствовала точности привязки Sentinel – ± 20 м.

Схемы ледников из каталога СССР (рис. 2а) были представлены в Каталоге ледников СССР в масштабе 1:1 000 000. Точность привязки контуров к снимкам Sentinel оценивается порядка ± 250 -300 м из-за отсутствия картографической проекции и мелкого масштаба опубликованного оригинала схемы. Толщина линии контуров ледников на схеме в Каталоге соответствует 150-200 м на местности. Поэтому для сравнения и уточнения площадей ледников использовалась наложенная мозаика космических снимков Corona за 1961 г. на картосхему 1952 г. (рис. 2б). Векторный слой 1952/1961 гг. был получен при помощи ручной оцифровки.

Таким образом, были получены векторные слои ледников Новой Земли за четыре срока: 1952/1961; 2001; 2013 и 2023 гг. Для рабочего проекта использовалась географическая система координат WGS-1984, UTM, Zone 41N.

Изображения одной и той же территории снимаются в разных условиях. На качество изображения влияют погодные колебания, разница в освещенности, облачность, тени, отбрасываемые на исследуемый объект. На земле могут оставаться сезонные участки снега (снежники), которые спектрально похожи на заснеженные ледники. Для оценки неопределенности площади вручную скорректированных контуров ледников применяется буфер, который равняется 1 пикселю разрешения космического снимка (Paul et al., 2013). Для слоя 1952/1961 гг. нами был использован буфер ± 50 м, для слоев 2001 и 2013 гг. – ± 30 м, для слоя 2023 г. – ± 10 м.

Результаты и обсуждение

Оледенение Новой Земли по площади занимает первое место в Российской Арктике (Котляков и др., 2015; Ледники России, 2020). Горная система Новой Земли, состоящая из нескольких параллельных хребтов, сдвинута к баренцевоморскому побережью (Каталог ледников СССР, 1978). Абсолютные высоты: 400-1500 м. Общий объем льда на современном этапе оценивается в 69 км^3 . Предположительно, с конца Малого ледникового периода до 20-х гг. XXI в. было утрачено около 17% объема ледников Новой Земли (Reinthalер, Paul, 2024).

Основу новоземельского оледенения составляет обширный ледниковый покров Северного острова, состоящего из ледникового щита и его северного продолжения – Северного ледникового купола (Ледники России, 2020). В центральных областях лёд перекрывает подлёдный рельеф, а в краевых частях появляются многочисленные нунатаки и выводные ледники. Южнее широты

74.5° расположены области горно-покровного оледенения – это сравнительно небольшие ледяные плато с плоской и слабовыпуклой поверхностью. На юге острова Северный и на севере острова Южный разбросаны многочисленные горные ледники и ледники малых форм (рис. 7).

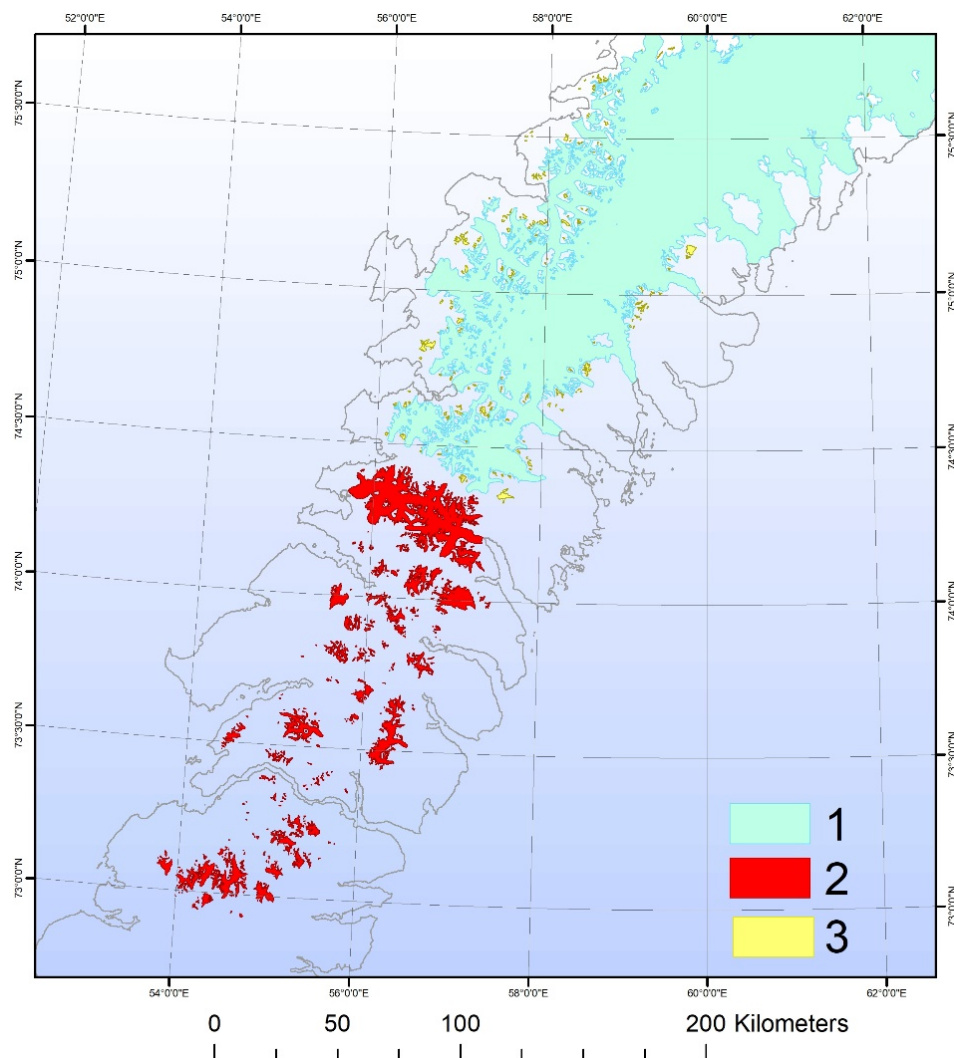


Рисунок 7. Ледники Новой Земли

1 – Покровное оледенение с поперечными выводными ледниками; 2 – горно-покровное, горное оледенение и ледники малых форм южнее широты 74.5°; 3 – горное оледенение и ледники малых форм севернее широты 74.5°с.ш.

Figure 7. Glaciers of Novaya Zemlya

1 – Cover glaciation with transverse outlet glaciers; 2 – mountain cover, mountain glaciation and small glaciers south of 74.5°N; 3 – mountain glaciation and small glaciers north of 74.5°N

Оледенение Новой Земли, согласно Каталогу ледников СССР (1978), в 1952 г. составляло около 23 645.4 км². По картографическим материалам В.С. Корякин (1997) оценил общую убыль оледенения Новой Земли для четырёх периодов: 1913-1933 гг. – 38 км² (0.4%), 1933-1959 гг. – 186 км² (2.2%),

1959-1973 гг. – 133 км² (1.4%), 1973-1988 гг. – 67 км² (0.7%) (Корякин, 1997). По нашим данным, сокращение площади ледников, начиная с 1952 г., шло более высокими темпами.

По данным (Zeeberg, Forman, 2001), отступление выводных ледников на севере Новой Земли в первой половине XX века было относительно быстрым (более 300 м/год), но во второй половине XX века они убывали вдвое медленнее, и между 1964 и 1993 гг. половина из исследованных этими авторами ледников были стационарными (Zeeberg, Forman, 2001; Оледенение Северной..., 2006). По нашим данным, скорость отступления ледников с 1952 по 2001 гг. действительно была неравномерна, существенно выше для ледников бассейна Баренцева моря.

На рис. 8 и 9 показаны примеры отступления краев выводных ледников Новой Земли. Многие выводные ледники за 70 лет отступили более чем на 5-7 км по стрещню ледникового потока. При помощи снимков спутников программы Corona 1961 г. мы смогли уточнить границы льда недостаточно подробно отрисованных на схеме 1952 г., в том числе и более мелких ледников. В итоге мы получили базовый контур ледников 1952-1961 гг. (рис. 26), который использовался в расчётах изменения ледников за 70-летний период.

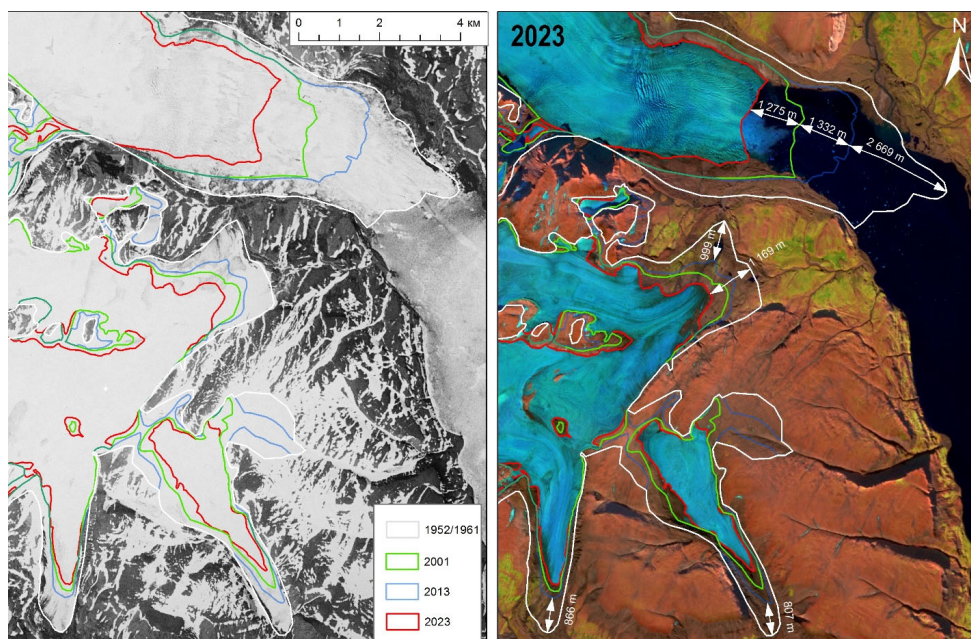


Рисунок 8. Пример отступления краев долинных выводных ледников Витте (№ 208), Ярошевского (№ 210) и Рейгардта (№ 211), согласно нумерации Каталога ледников СССР, на склонах юго-восточного побережья о. Северный, Карское море, залив Медвежий. Левый снимок – по программе Corona, 1961 г., правый – Sentinel-2A, 2023 г.

Figure 8. An example of the retreat of the edges of the valley outlet glaciers Witte (208), Yaroshevsky (210) and Reigardt (211), according to the numbering of the Catalog of Glaciers of the USSR, on the slopes of the southeastern coast of the island. Northern, Kara Sea, Bear Bay. The left image is from the Corona program, 1961, the right is Sentinel-2A, 2023

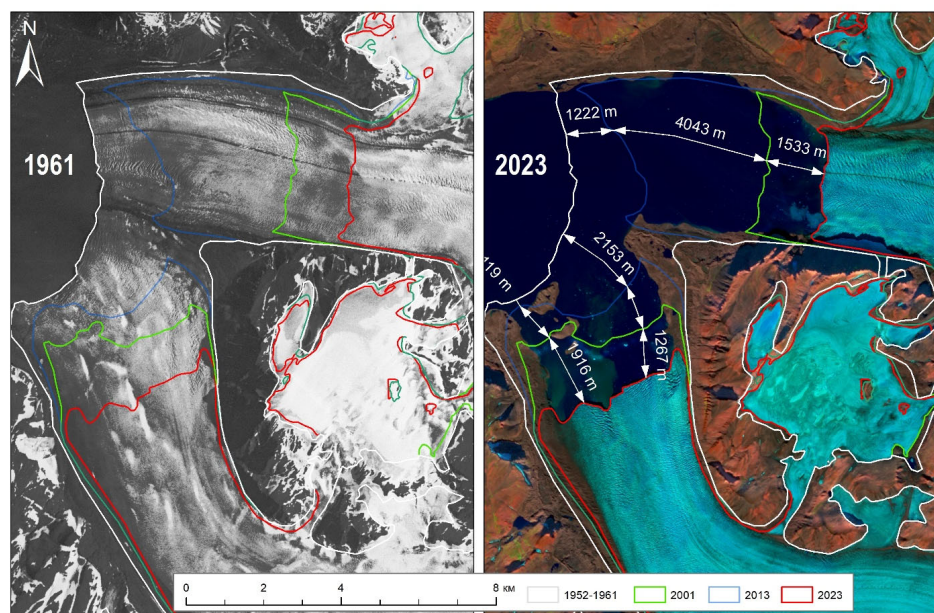


Рисунок 9. Пример отступления краев выводных ледников Вильницкого южный и Вильницкого северный (№ 67, № 68 согласно нумерации Каталога ледников СССР) на склонах западного побережья о. Северный, Баренцево море

Левый снимок – по программе Corona, 1961 г., правый – Sentinel-2A, 2023 г.

Figure 9. An example of the retreat of the edges of the Vilnitsky southern and Vilnitsky northern outlet glaciers (No. 67, No. 68 according to the numbering of the USSR Glacier Catalog) on the slopes of the western coast of Northern Island, Barents Sea

The left image is from the Corona program, 1961, the right is Sentinel-2A, 2023

2023 г. оказался очень благоприятен для съёмки. В этот год было много безоблачных дней в конце периода абляции и лето было аномально жарким. Всё это облегчило дешифрирование снега и льда. Благодаря новому спутнику Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м, что в 3 раза больше, чем у снимков Landsat, мы получили контуры ледников 2023 г. с максимальной проработкой.

Мы сравнивали 2 основных контура ледников Новой Земли: 1952-1961 гг. и 2023 г. И дополнительно, промежуточные контура – 2001 и 2013 гг. Для отдельных ледников мы анализировали космическую съёмку 1977 г. (снимки по программе Corona) и 1986 г. (Landsat-5 TM).

По результатам дешифрирования космических снимков Новой Земли мы смогли оценить отступление ледников Новой Земли, а также получили значения суммарной площади оледенения за 3 срока: 2001 г., 2013 г. и 2023 г. в сравнении с временным горизонтом 1952/1961 гг., который был принят нами за 100% (табл. 1).

По материалам базы данных «Ледники России» Института географии РАН (2020), площадь оледенения Новой Земли в результате дешифрирования космических снимков Sentinel и Landsat 2019 г. составляла 22 241.4 км², что довольно близко к полученным нами результатам с учетом погрешностей.

Недавние оценки изменения площади 480 ледников Новой Земли, по космическим снимкам Landsat, для трех временных горизонтов (Ali et al., 2023) несколько ниже наших, не отражают эффект распада ледников. Возможны методические отличия при дешифрировании поверхностных морен на языках ледников (табл. 1).

Таблица 1. Суммарная площадь оледенения Новой Земли, количество ледников

Table 1. Total area of Novaya Zemlya glaciation, number of glaciers

Годы	Количество ледников	Данные	Площадь, км кв.	%
1952	242*	Каталог ледников СССР	23 645**	98.1
1952/1961	330***	авторские	24 107*** ± 548****	100.0
1986/1989	480	Ali et al., 2023	22 990 ± 301	
2000/2001	480	Ali et al., 2023	22 525 ± 308	
2001	479	авторские	22 914 ± 350	95.1
2013	531	авторские	22 279 ± 335	92.4
2019	729	Институт географии РАН, 2020	22 241	92.3
2019/2021	480	Ali et al., 2023	21 670 ± 292	
2023	705	авторские	21 702 ± 108	90.0

- * – согласно векторному слою, полученному по схеме Каталога ледников СССР;
 ** – согласно таблице Каталога ледников СССР;
 *** – согласно наложенной мозаики космических снимков Corona и картосхемы 1952 г.;
 **** – оценка точности для авторских оценок приводится по доверительным границам (ширина буфера соответствует разрешению раstra).

Как видно из табл. 1, суммарная площадь оледенения Новой Земли, полученная по космическим снимкам 1961 г. и отрисованная по схеме из Каталога ледников СССР (24 106.6 км²), отличается от цифры, приведённой в таблице Каталога ледников СССР (23 645.4 км²) на 461.2 км². Мы предполагаем, что в 1952 г. часть ледников не была отдешифрирована.

Суммарно оледенение Новой Земли сократилось с 1952/1961 гг. почти на 10%. При этом количество ледников увеличилось в 2.1 раза за счёт распада более крупных ледников на части в процессе отступления. Ряд мелких ледников в Каталоге обозначен точками с номерами, т.к. они не выражались в масштабе схемы. В таблице площадей ледников сведения о них указаны. Предположительно, некоторые небольшие ледники могли быть пропущены в ходе аэрофотосъемки, а некоторые отдешифрированы слишком схематично из-за снежного покрова или недоучтены участки, покрытые поверхностной мореной.

Обобщение полученных результатов показывает, что практически все фронты выводных ледников Новой Земли отступили по стрелю на километры, за исключением нескольких стабильных. На рис. 10 показан один из

таких ледников – ледник Ога (№ 56 Каталога ледников СССР). Действительно, в среднем за период 1973/1976-2015 гг. выводные ледники (в том числе обрывающиеся во внутренние водоемы) отступали в 3-3.5 раза быстрее, чем те, которые заканчивались на суше (Carr et al., 2017). При этом интенсивность отступления выводных ледников Новой Земли в большинстве случаев ниже, чем для Земли Франца-Иосифа, Северной Земли или Шпицбергена (Kochtitzky et al., 2022).

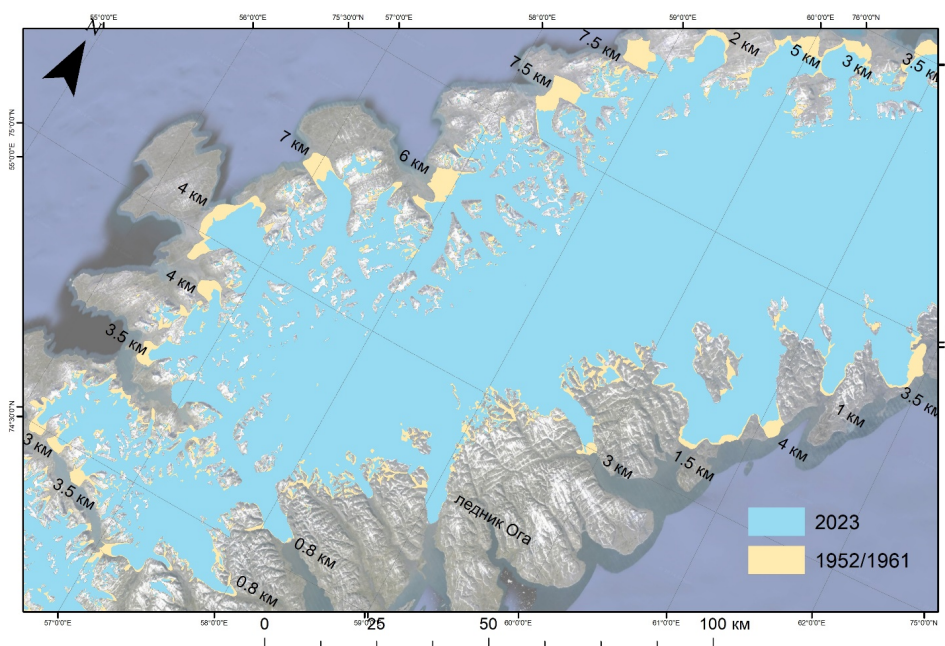


Рисунок 10. Значения отступления некоторых выводных ледников

Figure 10. Retreat values of some outlet glaciers

В табл. 2 и 3 представлены площади ледникового щита и оледенения южной части ледникового района (рис. 7), где сосредоточено наибольшее количество небольших горных ледников со средней площадью 2.6 км^2 . Ледниковый щит сократился на 8.1% с 1961 г. (табл. 2). Южнее широты 74.5° картина деградации выглядит иначе. Суммарное сокращение площади на данном участке значительно выше и составляет 33.26% (табл. 3).

Таблица 2. Площадь ледникового щита с выводными ледниками (рис. 8)

Table 2. Area of the ice sheet with outlet glaciers (Fig. 8)

Годы	Площадь, км кв.	%
1952/1961	21 867.7	100.0
2001	20 981.0	96.0
2013	20 496.1	93.7
2023	20 098.4	91.9

Таблица 3. Суммарная площадь горно-покровного, горного оледенения и ледников малых форм южнее широты 74.5° (рис. 8)

Table 3. Total area of reticular glaciation, mountain glaciers and small glaciers south of 74.5°N (Fig. 8)

Годы	Количество ледников	Площадь, км кв.	%
1952/1961	284	2202.1	100.0
2001	380	1833.3	83.3
2013	394	1650.5	75.0
2023	492	1469.6	67.0

Скорость отступления ледников не была постоянной. С 1961 по 2001 гг. оледенение Новой Земли сокращалось со средней скоростью 29.8 км²/год, с 2001 по 2013 гг. – со скоростью 52.9 км²/год. И за последний период с 2013 по 2023 гг. скорость сокращения ледников Новой Земли достигла 57.7 км²/год. Предположительно, 32 ледника (18% площади оледенения) могли быть пульсирующими (Grant et al., 2009).

Оценки изменения массы также фиксируют неравномерность процесса деградации. Так, потеря массы ледников Новой Земли увеличилась с 10 ± 5 Гт/год в 2003-2009 гг. до 14 ± 4 Гт/год в 2010-2016 гг., с коротким периодом почти нулевого баланса массы между 2009 и 2011 гг. Увеличение потери массы вызывают с повышением температуры атмосферного воздуха (Ciraci et al., 2018). По другим оценкам, изменение массы ледников в 2010-2020 гг. осталось в пределах 10.7 ± 0.9 Гт/год (Jakob, Gourmelen, 2023).

К факторам, которые напрямую влияют на деградацию ледников и могут зависеть от изменения климата относятся: увеличение продолжительности безлёдного периода (водная поверхность свободна ото льда), а также повышение температуры приземного слоя атмосферного воздуха и слоя перемешивания морской воды. Для Баренцева моря с 1979 г. отмечается сокращение площади, покрытой льдом, в зимний период, а для Карского моря – увеличение площади, свободной ото льда, в летний период (IPCC, 2019). Прослеживается статистически значимая отрицательная связь между региональной протяженностью морского льда в конце лета (Баренцево и Карское моря) и количеством дней наблюдаемого таяния ледников Новой Земли (Zhao et al., 2014).

По данным дистанционного зондирования, сокращение площади ледников бассейна более теплого Баренцева моря шло активнее, чем Карского (рис. 11), что согласуется с данными Программы арктического мониторинга и оценки (AMAP, 2011) и других исследователей (Terpes et al., 2021). Действительно, благодаря теплым течениям, годовые суммы потоков тепла с поверхности Баренцева моря в среднем в 3-4 и в 5-6 раз, для потоков H (явное тепло) и LE (скрытое тепло) соответственно, превышают значения для Карского моря, а в отдельные годы могут различаться в десятки раз (Суркова, Романенко, 2021).

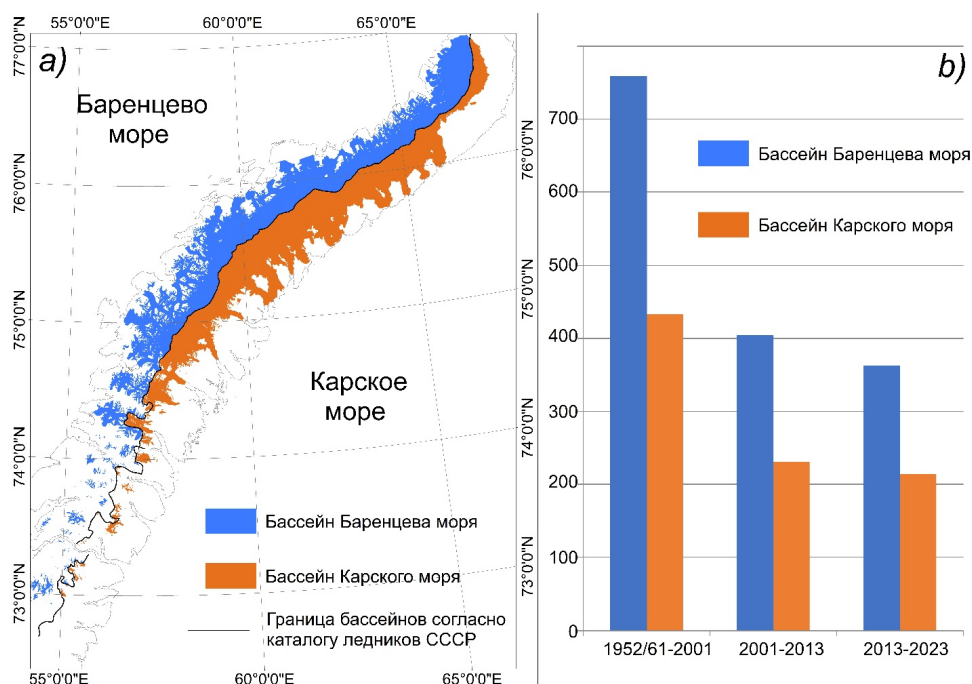


Рисунок 11. Бассейны Баренцева и Карского моря согласно Каталогу ледников СССР
(a) сокращение площади ледников Новой Земли (км²) по бассейнам (б)

Figure 11. Basins of the Barents and Kara Seas according to the USSR Glacier Catalog
(a) reduction in the area of Novaya Zemlya glaciers (km²) by the sea basins (b)

В публикациях отмечается вклад фёнов в деградацию ледников Гренландии и Антарктиды. Высказывается предположение, что эффект может проявляться и для Новой Земли (Naacker et al., 2024). Действительно, разница температур между теплым Баренцевым морем, большая часть акватории которого даже зимой остается свободной ото льда, и холодным Карским морем способствуют возникновению сильных локальных ветров. Однако высота горной цепи в пределах 1200-1500 м недостаточна для разогрева стекающих воздушных масс (в отличие от Гренландии), т.е. формируется холодная Новоземельская бора, которая характерна не только в летнее, но и в зимнее время (Ефимов, Комаровская, 2018).

Айсберги

Для выводных ледников Новой Земли на скорость изменения фронтальных частей немалое влияние оказывает айсберговый сток. Предполагается, что именно он может являться основной составляющей потери массы в нижней части выводных ледников (Cart et al., 2014), тогда как выше 500 м решающую роль играет именно таяние (Melkonian et al., 2016).

Изменения расхода льда на айсберги определяются глубиной морских вод у фронтов ледников, рельефом морского дна и берегов в местах выхода ледников, распределением температур, локальными течениями, приливным

режимом и др. (Второй оценочный..., 2014). Оценить вклад айсбергов в уменьшение площади ледников принципиально возможно при помощи интерпретации космических радарных изображений. Нам удалось обнаружить на снимках результаты откалывания и разрушения айсбергов в 2023 г. для ледников Витте и Полисадова (рис. 12, 13).

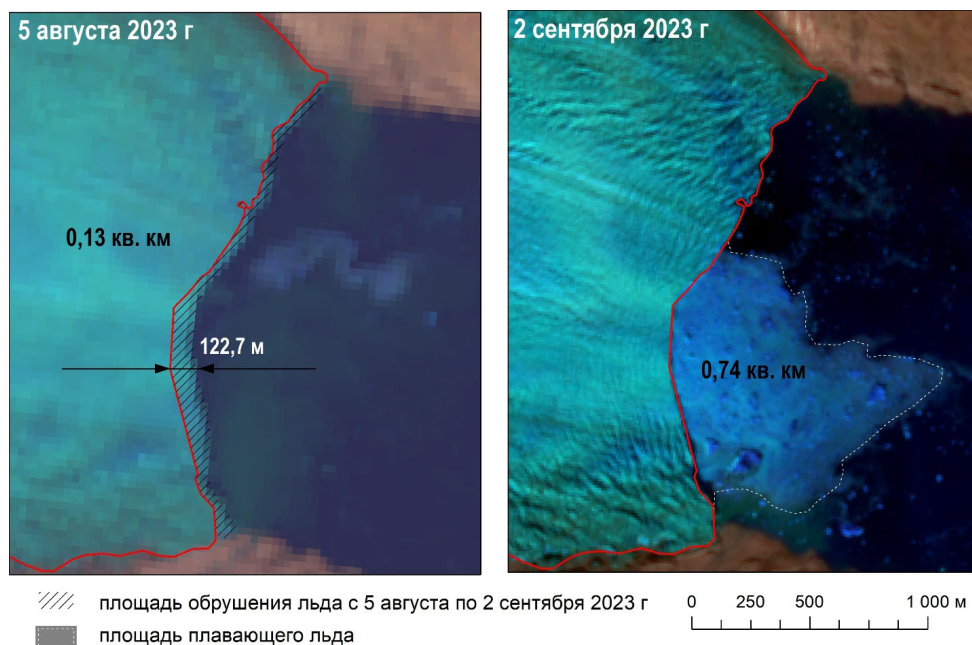


Рисунок 12. Язык ледника Витте (№ 208), о. Северный, Карское море, залив Медвежий
Левый снимок – Landsat-8 OLI/TIRS от 5 августа; правый снимок –
Sentinel-2A от 2 сентября 2023 г.

Стрелкой показано отступление ледника за месяц и площадь растаявшего льда

Figure 12. Tongue of the Witte glacier (208) in Northern Island, Kara Sea, Bear Bay
Left image – Landsat-8 OLI/TIRS from August 5; right image –
Sentinel-2A from September 2, 2023.

The arrow shows the retreat of the glacier over the month and the area of melted ice

Язык ледника Витте отступил на 122 м, в обрушения льда сформировалось поле плавающих льдов площадью 0.7 км^2 , тогда как площадь уменьшения ледника составляет 0.13 км^2 за месяц. Язык ледника Полисадова отступил на 588 м за 1.5 месяца, в обрушения льда сформировалось поле плавающих льдов площадью 7.2 км^2 , а площадь уменьшения ледника составляет 0.92 км^2 за этот период.

Точная оценка вклада айсберговой составляющей в разрушение фронта ледников является трудоемкой задачей и требует ежедневного мониторинга по данным дистанционного зондирования.

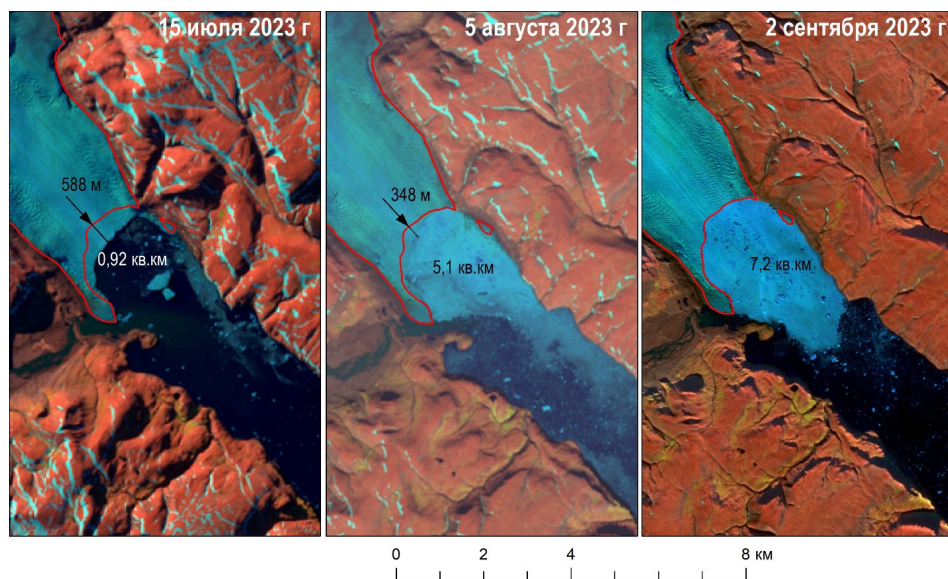


Рисунок 13. Язык ледника Полисадова (№ 54), о. Северный, Карское море, бухта Полисадова. Левый снимок – Landsat-8 OLI/TIRS от 15 июля; центральный снимок – Landsat-8 OLI/TIRS от 5 августа; правый снимок – Sentinel-2A от 2 сентября 2023 г. Стрелкой показано отступление ледника за полтора месяца. Цифрами на левом рисунке – площадь растаявшего льда, а на среднем и правом – площадь плавающих льдов от обвала ледника (в км²)

Figure 13. Tongue of the Polisadov glacier (54) in Northern Island, Kara Sea, Polisadov Bay. Left image – Landsat-8 OLI/TIRS from July 15; central image – Landsat-8 OLI/TIRS from August 5; right image – Sentinel-2A from September 2, 2023. The arrow shows the retreat of the glacier over a month and a half. The numbers in the left figure are the area of melted ice, and in the middle and right are the area of floating ice from the glacier collapse (in km²)

Выводы

Суммарная площадь оледенения Новой Земли, по данным дистанционного зондирования, на конец периода абляции 2023 г. составила 21 702.3 км². Оледенение Новой Земли сократилось на 9.9% с 1952/1961 гг.

Оледенение Новой Земли южнее 74.5° с.ш. сократилось с 1952/1961 гг. по 2023 г. еще более существенно: на 33.3%.

Средняя скорость сокращения площади ледников Новой Земли выросла с 29.8 км²/год в период 1961-2001 гг. до 57.7 км²/год в период 2013-2023 гг. Единичные ледники остаются стабильными.

Сокращение ледников Баренцева моря происходит интенсивнее сокращения ледников бассейна Карского моря в среднем в 1.7 раза.

На примере ледников Витте и Полисадова в 2023 г. оценен масштаб айсберговой активности. Линейное отступление ледника может достигать 588 м за 1.5 месяца, в результате обрушения льда сформировалось поле плавающих льдов, площадью 7.2 км², а площадь уменьшения ледника составляет 0.92 км² за этот период.

Согласно результатам расчетов четырех моделей CMIP5, Баренцево море может стать полностью свободным ото льда зимой после 2050 г. в условиях сценария RCP8.5 (IPCC, 2019; Onarheim, Årthun, 2017). Прогнозируется, что к 2100 г. ледники Российской Арктики утратят около половины своей массы в зависимости от сценариев изменения климата (Rounce et al., 2023). Необходим регулярный мониторинг оледенения арктических островов по единой методике для контроля происходящих изменений и своевременного принятия решений, с учетом масштабных планов развития Арктической зоны Российской Федерации.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы госзадания № АААА-А20-120070990079-6 ФГБУ «ИГКЭ».

Список литературы

- Алейников, А.А., Липка, О.Н. (2018) Деграляция покровного оледенения острова Ушакова по материалам космических съемок, *Земля из космоса*, № 9 (25), с. 32-39.
- Бычкова, И.А., Смирнов, В.Г., Михальцева, С.В., Платонова, Е.В. (2024) Айсберговая опасность в морях Арктической зоны Российской Федерации в условиях современных климатических изменений, *Проблемы Арктики и Антарктики*, т. 70, № 1, с. 71-86.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации* (2014) Под ред. В.М. Катцова, С.М. Семенова, М., Росгидромет, 1009 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 год* (2024) М., Росгидромет, 104 с.
- Ефимов, В.В., Комаровская, О.И. (2018) Сезонная изменчивость и гидродинамические режимы новоземельской боры, *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*, т. 54, № 6, с. 684-698.
- Каталог ледников СССР, т. 3, Северный край, Часть 2, Новая Земля* (1978) Л., Гидрометеиздат, 112 с.
- Каталог ледников СССР (1966-1982) в 20 томах*, Л., Гидрометеиздат.
- Корякин, В.С. (1997) Ледники Новой Земли, *Земля и Вселенная*, № 1, с. 17-24.
- Котляков, В.М., Хромова, Т.Е., Носенко, Г.А., Попова, В.В., Чернова, Л.П., Муравьев, А.Я., Рототаева, О.В., Никитин, С.А., Зверкова, Н.М. (2015), *Современные изменения ледников горных районов России*, М., Тов-во научных изданий КМК, 288 с.
-

Ледники России (2020) ГИС online для визуализации и анализа данных о состоянии ледников России, полученных на основе космической информации по состоянию на вторую декаду XXI в., М., Институт географии РАН, электронный ресурс, URL: <https://sites.google.com/view/glaciersrussia/> (дата обращения 02 октября 2024).

Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху (2006) Отв. ред. В.М. Котляков, М., Ин-т географии РАН, 482 с.

Суркова, Г.В., Романенко, В.А. (2021) Изменение климата и теплообмен между атмосферой и океаном в Арктике на примере Баренцева и Карского морей, *Проблемы Арктики и Антарктики*, т. 67, № 3, с. 280-292.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2022) Под ред. В.М. Катцова, СПб., Наукоемкие технологии, 676 с.

Хромова, Т.Е., Носенко, Г.А., Глазовский, А.Ф., Муравьев, А.Я., Никитин, С.А., Лаврентьев, И.И. (2021) Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016-2019 гг.), *Лед и снег*, т. 61, № 3, с. 341-358.

Ali, A., Dunlop, P., Coleman, S., Kerr, D., McNabb, R.W., Noormets, R. (2023) Glacier area changes in Novaya Zemlya from 1986-89 to 2019-21 using object-based image analysis in Google Earth Engine, *Journal of Glaciology*, vol. 69, no. 277, pp. 1305-1316.

AMAP (2011) *Snow, Water and Permafrost in the Arctic (SWIPA). Climate Change and the Cryosphere*, Oslo, Arctic Monitoring and Assessment (AMAP), Xii +, 538 p.

Carey, M., Molden, O.C., Rasmussen, M.B., Jackson, M., Nolin, A.W., Mark, B.G. (2017) Impacts of glacier recession and declining meltwater on mountain societies, *Annals of the American Association of Geographers*, vol. 107, no. 2, pp. 350-359.

Carr, J.R., Bell, H., Killick, R., Holt, T. (2017) Exceptional retreat of Novaya Zemlya's marine-terminating outlet glaciers between 2000 and 2013, *The Cryosphere*, vol. 11, no. 5, pp. 2149-2174.

Carr, J.R., Stokes, C., Vieli, A. (2014) Recent retreat of major outlet glaciers on Novaya Zemlya, Russian Arctic, influenced by fjord geometry and sea-ice conditions, *Journal of Glaciology*, vol. 60, no. 219, pp. 155-170.

Ciraci, E., Velicogna, I., Sutterley, T.C. (2018) Mass balance of Novaya Zemlya archipelago, Russian High Arctic, using time-variable gravity from grace and altimetry data from ICES at and Cryosat-2, *Remote Sensing*, vol. 10, no. 11, p. 1817.

Dashora, A., Lohani, B., Malik, J.N. (2007) A repository of earth resource information – the Corona satellite programme, *Current Science*, vol. 92, no. 7, pp. 926-932.

Davison, B.J., Cowton, T.R., Cottier, F.R., Sole, A.J. (2020). Iceberg melting substantially modifies oceanic heat flux towards a major Greenlandic tidewater glacier, *Nature communications*, vol. 11, no. 1, p. 5983.

Dussaillant, I., Hugonnet, R., Huss, M., Berthier, E., Bannwart, J., Paul, F., Zemp, M. (2024) Annual mass changes for each glacier in the world from 1976 to 2023, *Earth System Science Data Discussions*, vol. 2024, pp. 1-41.

Grant, K.L., Stokes, C.R., Evans, I.S. (2009) Identification and characteristics of surge-type glaciers on Novaya Zemlya, Russian Arctic, *Journal of Glaciology*, vol. 55, no. 194, pp. 960-972.

Haacker, J., Wouters, B., Fettweis, X., Glissenaar, I.A., Box, J.E. (2024) Atmospheric-river-induced foehn events drain glaciers on Novaya Zemlya, *Nature Communications*, vol. 15, no. 1, p. 7021.

Hock, R., Huss, M. (2021). Glaciers and climate change, *Climate change. Observed Impacts on Planet Earth*, Third Edition. In Trevor M., Letcher, Elsevier, (eds.), pp. 157-176.

Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussaillant, I., Brun, F., Kääb, A. (2021) Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century, *Nature*, vol. 592, no. 7856, pp. 726-731.

IPCC (2019) *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 755 p.

IPCC (2022) *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.), Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 p.

Jakob, L., Gourmelen, N. (2023) Glacier mass loss between 2010 and 2020 dominated by atmospheric forcing, *Geophysical Research Letters*, vol. 50, no. 8, e2023GL102954.

Kochtitzky, W., Copland, L., Van Wychen, W., Hugonnet, R., Hock, R., Dowdeswell, J.A., Benham, T., Strozzi, T., Glazovsky, A., Lavrentiev, I., Rounce, D.R., Millan, R., Cook, A., Dalton, A., Jiskoot, H., Cooley, J., Jania, J., Navarro, F. (2022) The unquantified mass loss of Northern Hemisphere marine-terminating glaciers from 2000-2020, *Nature Communications*, vol. 13, no. 1, p. 5835.

Li, Y.J., Ding, Y.J., Shangguan, D.H., Wang, R.J. (2019) Regional differences in global glacier retreat from 1980 to 2015, *Advances in Climate Change Research*,

vol. 10, no. 4, pp. 203-213.

Melkonian, A.K., Willis, M.J., Pritchard, M.E., Stewart, A.J. (2016) Recent changes in glacier velocities and thinning at Novaya Zemlya, *Remote Sensing of Environment*, vol. 174, pp. 244-257.

Onarheim, I.H., Årthun, M. (2017) Toward an ice-free Barents Sea, *Geophysical Research Letters*, vol. 44, no. 16, pp. 8387-8395.

Paul, F., Barrand, N.E., Baumann, S., Berthier, E., Bolch, T., Casey, K., Frey, H., Joshi, S.P., Konovalov, V., Le Bris, R., Mölg, N., Nosenko, G., Nuth, C., Pope, A., Racoviteanu, A., Rastner, P., Raup, B., Scharrer, K., Steffen, S., Winsvold, S. (2013) On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data, *Annals of Glaciology*, vol. 54, no. 63, pp. 171-182.

Reinthal, J., Paul, F. (2024) Assessment of methods for reconstructing Little Ice Age glacier surfaces on the examples of Novaya Zemlya and the Swiss Alps, *Geomorphology*, vol. 461, p. 109321.

Roe, G.H., Baker, M.B., Herla, F. (2017). Centennial glacier retreat as categorical evidence of regional climate change, *Nature Geoscience*, vol. 10, no. 2, pp. 95-99.

Rounce, D.R., Hock, R., Maussion, F., Hugonnet, R., Kochtitzky, W., Huss, M., Berthier E., Brinkerhoff, D., Compagno L., Mc Nabb, R.W. (2023). Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters, *Science*, vol. 379, no. 6627, pp. 78-83.

Tepes, P., Nienow, P., Gourmelen, N. (2021) Accelerating ice mass loss across Arctic Russia in response to atmospheric warming, sea ice decline, and Atlantification of the Eurasian Arctic Shelf Seas, *Journal of Geophysical Research. Earth Surface*, vol. 126, no. 7, p. e2021JF006068.

Zeeberg, J., Forman, S. (2001) Changes in glacier extent on North Novaya Zemlya in the twentieth century, *Holocene*, vol. 11, no. 2, 1161-1175.

Zhao, M., Ramage, J., Semmens, K., Obleitner, F. (2014) Recent ice cap snowmelt in Russian High Arctic and anti-correlation with late summer sea ice extent, *Environmental Research Letters*, vol. 9, no. 4, p. 045009.

References

Aleynikov, A.A., Lipka, O.N. (2018) Degradatsiya pokrovnogo oledeneniya ostrova Ushakova po materialam kosmicheskikh s"emok [Degradation of glaciation on Ushakov Island based on satellite imagery], *Zemlya iz kosmosa*, no. 9 (25), pp. 32-39.

Bychkova, I.A., Smirnov, V.G., Mikhaltseva S.V., Platonova, E.V. (2024) Aysbergovaya opasnost' v moryakh Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii v usloviyakh sovremennykh klimaticheskikh izmeneniy [Iceberg danger in the seas

of the Arctic zone of the Russian Federation in the conditions of modern climate changes], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, vol. 70, no. 1, pp. 71-86.

Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii [The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation] (2014) In V.M. Kattsov, S.M. Semenov (eds.), Roshydromet, Moscow, Russia, 1009 p.

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2023 god [Report on climate features on the territory of the Russian Federation for 2023] (2024) Roshydromet, Moscow, Russia, 104 p.

Efimov, V.V., Komarovskaya, O.I. (2018) Sezonnaya izmenchivost' i gidrodinamicheskiye rezhimy novozemel'skoy bory [Seasonal variability and hydrodynamic regimes of the Novaya Zemlya bora], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 54, no. 6, pp. 684-698.

Katalog lednikov SSSR, T. 3, Severnyy kray, Chast' 2, Novaya Zemlya [Catalog of glaciers of the USSR, vol. 3, Northern Territory, Part 2, Novaya Zemlya] (1978) Gidrometeoizdat, Leningrad, USSR, 112 p.

Katalog lednikov SSSR [Catalog of glaciers of the USSR] (1966-1982), in 20 volumes, Gidrometeoizdat, Leningrad, USSR.

Koryakin, V.S. (1997) Ledniki Novoy Zemli [Glaciers of Novaya Zemlya], *Zemlya i Vselennaya*, no. 1, pp. 17-24.

Kotlyakov, V.M., Khromova, I.E., Nosenko, G.A., Popova, V.V., Chernova, L.P., Muravyov, A.Ya., Rototaeva, O.V., Nikitin, S.A., Zverkova, N.M. (2015), *Sovremennyye izmeneniya lednikov gornyykh rayonov Rossii* [Modern changes in glaciers in mountainous regions of Russia], KMK Scientific Publishing Company, Moscow, Russia, 288 p.

Ledniki Rossii [Glaciers of Russia] (2020) GIS online for visualization and analysis of data on the state of Russian glaciers, obtained on the basis of space information as of the second decade of the 21st century, Institut geografii RAN, Moscow, Russia, available at: URL: <https://sites.google.com/view/glaciersrussia/> (accessed October 2, 2024).

Oledeneniye Severnoy i Tsentral'noy Yevrazii v sovremennuyu epokhu [Glaciation of Northern and Central Eurasia in the modern era] (2006) Rep. ed. V.M. Kotlyakov, Institut geografii RAN, Moscow, Russia, 482 p.

Surkova, G.V., Romanenko, V.A. (2021) *Izmeneniye klimata i teploobmen mezhdru atmosferoy i okeanom v Arktike na primere Barentseva i Karskogo morey* [Climate change and heat exchange between the atmosphere and the ocean in the Arctic using the example of the Barents and Kara Seas], *Problemy Arktiki i Antarktiki*, vol. 67, no. 3, pp. 280-292.

Tretij ocenochnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii [Third assessment report on climate change and its

consequences on the territory of the Russian Federation] (2022) In V.M. Kattsov (ed.), *Naukoemkie tekhnologii*, St. Petersburg, Russia, 676 p.

Khromova, T.E., Nosenko, G.A., Glazovsky, A.F., Muravyov, A.Ya., Nikitin, S.A., Lavrentiev, I.I. (2021) *Novyy Katalog lednikov Rossii po sputnikovym dannym (2016-2019 gg.)* [New Catalog of Russian glaciers based on satellite data (2016–2019)], *Led i sneg*, vol. 61, no. 3, pp. 341–358.

Ali, A., Dunlop, P., Coleman, S., Kerr, D., McNabb, R.W., Noormets, R. (2023) Glacier area changes in Novaya Zemlya from 1986–89 to 2019–21 using object-based image analysis in Google Earth Engine, *Journal of Glaciology*, vol. 69, no. 277, pp. 1305–1316.

AMAP (2011) *Snow, Water and Permafrost in the Arctic (SWIPA). Climate Change and the Cryosphere*, Oslo, Arctic Monitoring and Assessment (AMAP), Xii +, 538 p.

Carey, M., Molden, O.C., Rasmussen, M.B., Jackson, M., Nolin, A.W., Mark, B.G. (2017) Impacts of glacier recession and declining meltwater on mountain societies, *Annals of the American Association of Geographers*, vol. 107, no. 2, pp. 350–359.

Carr, J.R., Bell, H., Killick, R., Holt, T. (2017) Exceptional retreat of Novaya Zemlya's marine-terminating outlet glaciers between 2000 and 2013, *The Cryosphere*, vol. 11, no. 5, pp. 2149–2174.

Carr, J.R., Stokes, C., Vieli, A. (2014) Recent retreat of major outlet glaciers on Novaya Zemlya, Russian Arctic, influenced by fjord geometry and sea-ice conditions, *Journal of Glaciology*, vol. 60, no. 219, pp. 155–170.

Ciraci, E., Velicogna, I., Sutterley, T.C. (2018) Mass balance of Novaya Zemlya archipelago, Russian High Arctic, using time-variable gravity from grace and altimetry, data from ICESat and Cryosat-2, *Remote Sensing*, vol. 10, no. 11, p. 1817.

Dashora, A., Lohani, B., Malik, J.N. (2007) A repository of earth resource information – the Corona satellite programme, *Current Science*, vol. 92, no. 7, pp. 926–932.

Davison, B.J., Cowton, T.R., Cottier, F.R., Sole, A.J. (2020). Iceberg melting substantially modifies oceanic heat flux towards a major Greenlandic tidewater glacier, *Nature communications*, vol. 11, no. 1, p. 5983.

Dussaillant, I., Hugonnet, R., Huss, M., Berthier, E., Bannwart, J., Paul, F., Zemp, M. (2024) Annual mass changes for each glacier in the world from 1976 to 2023, *Earth System Science Data Discussions*, vol. 2024, pp. 1–41.

Grant, K.L., Stokes, C.R., Evans, I.S. (2009) Identification and characteristics of surge-type glaciers on Novaya Zemlya, Russian Arctic, *Journal of Glaciology*, vol. 55, no. 194, pp. 960–972.

Haacker, J., Wouters, B., Fettweis, X., Glissenaar, I.A., Box, J.E. (2024) Atmospheric-river-induced foehn events drain glaciers on Novaya Zemlya, *Nature Communications*, vol. 15, no. 1, p. 7021.

Hock, R., Huss, M. (2021). Glaciers and climate change, *Climate change. Observed Impacts on Planet Earth*, Third Edition. In Trevor M., Letcher, Elsevier, (eds.), pp. 157-176.

Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussailant, I., Brun, F., Kääb, A. (2021) Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century, *Nature*, vol. 592, no. 7856, pp. 726-731.

IPCC (2019) *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 755 p.

IPCC (2022) *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.), Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 p.

Jakob, L., Gourmelen, N. (2023) Glacier mass loss between 2010 and 2020 dominated by atmospheric forcing, *Geophysical Research Letters*, vol. 50, no. 8, p. e2023GL102954.

Kochtitzky, W., Copland, L., Van Wychen, W., Hugonnet, R., Hock, R., Dowdeswell, J.A., Benham, T., Strozzi, T., Glazovsky, A., Lavrentiev, I., Rounce, D.R., Millan, R., Cook, A., Dalton, A., Jiskoot, H., Cooley, J., Jania, J., Navarro, F. (2022) The unquantified mass loss of Northern Hemisphere marine-terminating glaciers from 2000-2020, *Nature Communications*, vol. 13, no. 1, p. 5835.

Li, Y.J., Ding, Y.J., Shangguan, D.H., Wang, R.J. (2019) Regional differences in global glacier retreat from 1980 to 2015, *Advances in Climate Change Research*, vol. 10, no. 4, pp. 203-213.

Melkonian, A.K., Willis, M.J., Pritchard, M.E., Stewart, A.J. (2016) Recent changes in glacier velocities and thinning at Novaya Zemlya, *Remote Sensing of Environment*, vol. 174, pp. 244-257.

Onarheim, I.H., Årthun, M. (2017) Toward an ice-free Barents Sea, *Geophysical Research Letters*, vol. 44, no. 16, pp. 8387-8395.

Paul, F., Barrand, N.E., Baumann, S., Berthier, E., Bolch, T., Casey, K., Frey, H., Joshi, S.P., Konovalov, V., Le Bris, R., Mölg, N., Nosenko, G., Nuth, C., Pope, A., Racoviteanu, A., Rastner, P., Raup, B., Scharrer, K., Steffen, S., Winsvold, S. (2013) On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data, *Annals of Glaciology*, vol. 54, no. 63, pp. 171-182.

Reinthal, J., Paul, F. (2024) Assessment of methods for reconstructing Little Ice Age glacier surfaces on the examples of Novaya Zemlya and the Swiss Alps, *Geomorphology*, vol. 461, p. 109321.

Roe, G.H., Baker, M.B., Herla, F. (2017). Centennial glacier retreat as categorical evidence of regional climate change, *Nature Geoscience*, vol. 10, no. 2, pp. 95-99.

Rounce, D.R., Hock, R., Maussion, F., Hugonnet, R., Kochtitzky, W., Huss, M., Berthier E., Brinkerhoff, D., Compagno L., Mc Nabb, R.W. (2023). Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters, *Science*, vol. 379, no. 6627, pp. 78-83.

Tepes, P., Nienow, P., Gourmelen, N. (2021) Accelerating ice mass loss across Arctic Russia in response to atmospheric warming, sea ice decline, and Atlantification of the Eurasian Arctic Shelf Seas, *Journal of Geophysical Research. Earth Surface*, vol. 126, no. 7, p. e2021JF006068.

Zeeberg, J., Forman, S. (2001) Changes in glacier extent on North Novaya Zemlya in the twentieth century, *Holocene*, vol. 11, no. 2, 1161-1175.

Zhao, M., Ramage, J., Semmens, K., Obleitner, F. (2014) Recent ice cap snowmelt in Russian High Arctic and anti-correlation with late summer sea ice extent, *Environmental Research Letters*, vol. 9, no. 4, p. 045009.

Статья поступила в редакцию (Received): 04.08.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 06.10.2024.

Принята к публикации (Accepted): 13.10.2024.

Для цитирования / For citation

Алейников, А.А., Липка, О.Н. (2024) Изменение оледенения Новой Земли по данным дистанционного зондирования, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 4, с. 464-491, doi:10.21513/2410-8758-2024-4-464-491.

Aleynikov, A.A., Lipka, O.N. (2024) Changes in glaciation of Novaya Zemlya according to remote sensing data, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 4, pp. 464-491, doi:10.21513/2410-8758-2024-4-464-491.

Усовершенствование модели селевых кадастров с использованием расчетной оценки склонового стока

К.Н. Анахаев^{1,2)}, В.В. Беликов²⁾, А.А. Анахаев³⁾*

¹⁾ Институт прикладной математики и автоматизации Кабардино-Балкарского
научного центра РАН,
Россия, 360000, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89а

²⁾ Институт водных проблем РАН,
Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, 3

³⁾ Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова,
Россия, 360030, Нальчик, пр. Ленина, 1в

*Адрес для переписки: *anaha13@mail.ru*

Реферат. Современные изменения климата – один из факторов увеличения частоты экстремальных явлений, в том числе в горных ландшафтах. Последние десятилетия характеризуются интенсивным освоением природных ландшафтов горных территорий Северного и Западного Кавказа путем строительства промышленных, сельскохозяйственных, дорожных, рекреационных и спортивных объектов. Это усиливает риск неблагоприятных и опасных последствий экстремальных погодных явлений. Эффективность проектируемых защитных мероприятий от негативного воздействия селевых и водно-селевых потоков во многом зависит от достоверности используемых исходных гидрогеофизических характеристик водосборов в моделях селевых кадастров. Однако, устаревшая структура последних не позволяет в достаточной мере выявлять такие важнейшие особенности водосборов, как однозначную идентификацию селевых и водно-селевых потоков, дифференцированную селеопасность территорий, гидрогеофизические характеристики водосборов, максимальные (руслоформирующие) расходы дождевых и селевых потоков и др. Предложенные усовершенствования исходных параметров в моделях селевых кадастров позволяют во многом преодолеть указанные недостатки и улучшить методологическую базу для последующего формирования математических моделей селевых процессов. При этом используется предложенная авторами новая методика расчета.

Ключевые слова. Модель селевого кадастра, водосбор, дождевой сток, селевой бассейн, поток, селеопасность территорий, уклон русла, водно-селевой кадастр, нагорная канава.

Improvement of the mudflow inventory model using the estimates of slope runoff

K.N. Anakhaev^{1,2)}, V.V. Belikov²⁾, A.A. Anakhaev³⁾*

¹⁾ Institute of Applied Mathematics and Automation of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the RAS,
89a, Shortanov St., 360000, Nalchik, Russian Federation

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

³⁾ Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov,
1v, Lenin Ave., 360030, Nalchik, Russian Federation

*Correspondence address: *anaha13@mail.ru*

Abstract. Modern climate change is one of the factors increasing the frequency of extreme events, including in mountain landscapes. The last decades have been characterized by intensive development of natural landscapes of the mountainous territories of the Northern and Western Caucasus through the construction of industrial, agricultural, road, recreational and sports facilities. This increases the risk of adverse and dangerous consequences of extreme weather events. The effectiveness of the designed protective measures against the negative impact of mudflows and water-mudflows largely depends on the reliability of the initial hydrogeophysical characteristics of catchments used in mudflow cadastres models. However, the outdated structure of the latter does not allow to identify in a sufficiently complete and reasonable manner such key features of catchments as unambiguous identification of mudflow and mudflow-water courses, specific mudflow hazard of territories, hydrogeophysical characteristics of catchments, maximum (channel-forming) discharges of rain and mudflow flows, etc. The proposed improvements to the initial parameters in mudflow cadastres models allow to overcome these shortcomings in many respects and improve the methodological base for the subsequent formation of mathematical models of mudflow processes. In this case, the new calculation method proposed by the authors is used.

Keywords. Mudflow cadastre model, catchment, rainfall runoff, mudflow basin, flow, mudflow hazard of territories, channel slope, mudflow-water cadastre, interfluve.

Введение

Одной из наиболее актуальных и злободневных проблем при освоении (промышленном, сельскохозяйственном, дорожном, рекреационном, спортивном и др.) горных и предгорных территорий является обеспечение безопасности населенных пунктов и объектов экономики от негативного воздействия водных и селевых потоков. В последние десятилетия на Северном и Западном Кавказе наблюдается существенное развитие и активизация указанных склоновых явлений, которые, нередко, возникают там, где они ранее не наблюдались – что в полной мере наглядно проявилось при строительстве Олимпийских объектов на горном кластере «Красная Поляна» (Анахаев и др., 2016; Анахаев и др., 2023). Изложенное обуславливает необходимость разработки математических моделей селевых процессов на основе достоверных исходных данных гидрогеофизических характеристик водосборов.

Как известно, основными условиями схода селевых потоков являются:

- наличие на водосборном бассейне речной сети малых водотоков (небольших речек, речушек, балок-суходолов) с уклонами русел, превышающими 0.1 (Флейшман, 1978; Перов, 1990; Анахаев и др., 2016; Анахаев и др., 2023);
- наличие в русле и береговых склонах водотоков значительных объемов оползневых и осыпных грунтовых масс, камней, древесных остатков, коряг и др.;
- возможности возникновения в руслах водного потока (от дождевых осадков, прорывов озер, водоемов), достаточного для концентрированного размыва сосредоточенных в них потенциально-селевых масс, что является определяющим условием возникновения селей.

Методы и материалы

Следует отметить (Анахаев, Антоненко, 2014; Методические рекомендации, 2016; Анахаев и др., 2021; Анахаев и др., 2023), что селевой бассейн (рис. 1а) является более «обширным» понятием, чем водосборный бассейн (4), поскольку включает в себя дополнительные территории, не являющиеся водосборными для селевого русла (2), но подпадающие под прямое воздействие селевого потока, такие как: поверхность конуса выноса (7), селевая запруда (8), затапливаемая пойма (9), основной реки долины (в случаях возможности перекрытия ее), а также участок «сепарации» (10) крупных глыбовых селевых отложений в русле основной реки. Селевой бассейн в общем случае включает в себя один или несколько селевых очагов (6), как правило, срабатывающих одновременно.

Формирование дождевых стоков на горных территориях (в отличие от равнинных) определяется их гидрогеофизическими особенностями, такими, как (Анахаев, Беликов, 2023):

- относительно малые площади водосборов и большие уклоны русел (и склонов) водотоков-притоков с возможностями возникновения в них паводковых и селевых потоков;
 - более быстрое поступление расходов воды в замыкающие створы;
 - возможность выпадения дождевых осадков одновременно на всей территории водосбора;
 - большая насыщенность наносоводных и селевых потоков твердой составляющей и заторно-волновой характер их движения;
 - наличие твердой составляющей и заторно-волновой характер их движения;
 - наличие водопадов (уступов) и резко изменяющихся уклонов русла водотока;
 - разветвляющиеся (на 2-3) и сложносоставные водосборы, включающие внутренние локализованные селевые водосборы (рис. 1б), для которых использование методики «единого» водотока не вполне обосновано;
 - возможность значительных «разовых» размывов дна и береговых склонов с оползаниями и обрушениями последних и др.
-

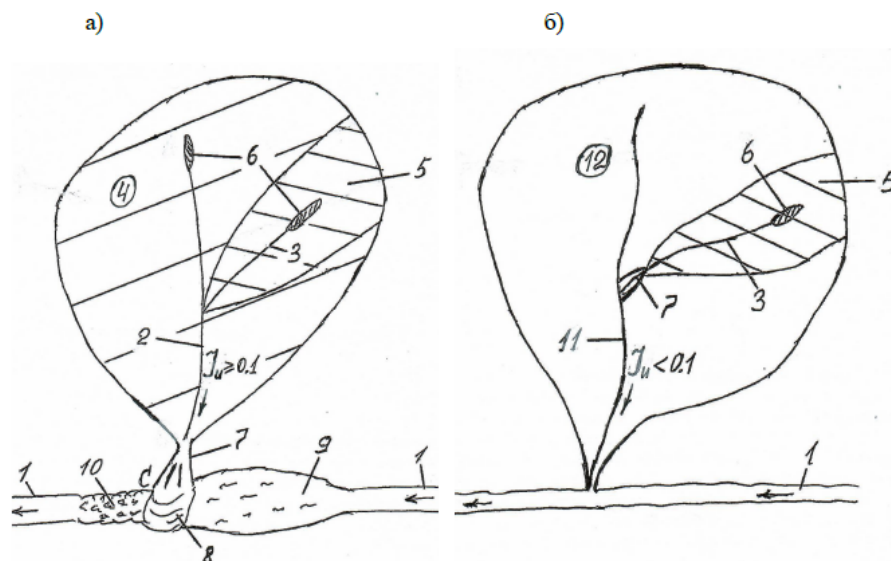


Рисунок 1. Схема селевого (а) и водно-селевого (б) бассейнов

1 – основная река долины; 2 и 3 – селевые русла (уклоны $\sim > 0.1$) водотоков 1-го и 2-го порядка с селевыми водосборами 4 и 5; 6 – селевые очаги; 7 – конус выноса; 8 и 9 – селевая запруда и затопляемая пойма основной реки; 10 – зона «сепарации» крупных глыбовых отложений селя; 11 – неселевое русло (уклон $\sim < 0.1$) водотока 1-го порядка с водно-селевым водосбором 12, имеющим внутреннее локализованное селевое русло 3 (Анахаев и др., 2023; Анахаев, Беликов, 2023)

Figure 1. Diagram of mudflow (a) and water-mudflow (b) basins

1 – the main river of the valley; 2 and 3 – mudflow channels (slopes $\sim > 0.1$) of watercourses of the 1st and 2nd order with mudflow catchments 4 and 5; 6 – mudflow foci; 7 – the cone of removal; 8 and 9 – mudflow dam and flooded floodplain of the main river; 10 – zone of "separation" of large block deposits of mudflow; 11 – non-mudflow channel (slope $\sim < 0.1$) of the 1st order watercourse with a water-mudflow catchment 12, having an internal localized mudflow channel 3 (Anakhaev et al., 2023; Anakhaev, Belikov, 2023)

В таких условиях для создания математических моделей селевых процессов и проектирования надежных и рациональных защитных сооружений от вредного воздействия водных и селевых потоков весьма важное значение имеет правильный выбор исходных гидрогеофизических характеристик водосборов и селевых бассейнов с достоверными значениями их параметров (Анахаев и др., 2021), систематизируемых, как правило, в наиболее «легитимных» изданиях – селевых кадастрах (Кадастр, 2001 и др.). В последних, как правило, необходимо в достаточно полной и обоснованной мере отразить важнейшие особенности водосборов, в частности:

– однозначно идентифицировать типы и местоположения водотоков селевых и водно-селевых водосборов (с внутренними селевыми бассейнами: локализованными, частными самостоятельными, «островными», «слепыми») (Смирнов, 1957; Черноморец, 1991; Перов, 2012; Анахаев и др., 2021; Анахаев и др., 2023) (рис. 1). Следует особо подчеркнуть, что разграничение водотоков водно-селевых и селевых водосборов имеет чрезвычайно важное

значение, поскольку определяет на какие расходы рассчитывать защитные инженерные сооружения – на максимальные водные расходы или в два и более раз превышающие их селевые расходы (Соколовский, 1947; Байнатов, 1992; Анахаев, Беликов, 2023);

- дифференцированно оценить селеопасность территорий в соответствии с реальными характеристикам селевых бассейнов;

- оценить реальные длины рек, так как во многих случаях они недопустимо завышены и ошибочно приняты равными суммарной длине основной реки и всех ее притоков;

- получить прогнозные данные по максимальному (руслоформирующему) расходу дождевых стоков и условно-равномерному и максимально-волновому расходам селевых потоков и др.

Более того, «новые» результаты по объемам селевых выносов оказались во многом недостоверными (Анахаев, 2018; Анахаев, 2019; Анахаев, Беликов, 2020а; Анахаев, Беликов, 2020б) и др.

Как следует из изложенного, очевидным образом назрела необходимость разработки усовершенствованной модели структуры селевого кадастра, в котором будут учтены и проработаны такие важные характеристики водосборов, как:

- адресная нумерация и уточненное местоположение водосбора;
- площади водосборного бассейна (F) и селеопасных территорий (F_s) в ней;
- дифференциация местоположений селеопасных территорий;
- длины русла (L) и конуса выноса (l_k) водотока;
- отметки местоположений истока (V_l), средней части (V_m), вершины конуса выноса (V_k) и устья (V_u) водотока;
- уклоны русла водотока (среднерусловые, нижней приустьевой половины русла);
- расчетные максимальные дождевые (руслоформирующие) расходы водотоков;
- прогнозируемые условно-равномерные и максимально-волновые селевые расходы и «пиковые» высоты селевого вала;
- известные даты схода предыдущих селей, ущерб и последствия последних;
- угрозы населенным пунктам, объектам экономики, возможности перекрытия (полного, частичного) селевыми выносами основной реки бассейна;
- имеющиеся защитные сооружения, их достаточность.

Результаты

Нумерация водосборов. Принятая в настоящее время сплошная нумерация селевых притоков начинается от устья водотока и поднимается по левому берегу русла до истока, обогнув который спускается обратно вниз по течению по правому берегу до устья. Такая нумерация содержит следующие недостатки:

- в среднюю часть нумерации входят водосборы верховьев основной долинной реки с большим числом недостаточно изученных (из-за труднодо-

ступности, высокогорья – более 3000 м и др.) селевых русел и суходолов (Непорожний, 1947), что приводит к неопределенности и «сбою» всей нумерации водосбора при обнаружении здесь (и необходимости учета) новых селевых бассейнов;

- по номерам (кроме первых номеров) водосборов трудно однозначно идентифицировать даже на каком берегу они расположены, в частности, предлагалось левый и правый берега обозначать, соответственно, нечетными и четными цифрами (Непорожний, 1947);

- невозможность различения водно-селевых водосборов от селевых. Водно-селевыми будем называть водосборы с неселевыми (в нижнем течении) главными руслами – притоками 1-го порядка, имеющими внутрибассейновые частные локализованные селевые русла 2-го порядка. Причисление водно-селевых водосборов к селевым искусственно завышает площади селеопасных территорий;

- рассматриваемая нумерация еще более «запутывается» для случаев раздваивающихся ущелий одной базовой реки (Непорожний, 1947), так, при разделении р. Черек на две долинных основных рек Черек-Безенгийский и Черек-Балкарский линия нумерации водосборов волнообразно дважды огибает верховья указанных рек, что создает еще большие неопределенности и трудности при идентификации водосборов.

Для преодоления указанных недостатков предлагается дифференцированная (раздельная) по обоим берегам основной реки нарастающая нумерация водосборов притоков 1-го порядка селевых бассейнов с обозначениями по левому « $1L$ », « $2L$ »... и правому « $1R$ », « $2R$ »¹⁾... берегам русла водотока (рис. 2). В случаях же водно-селевых водосборов с внутренними локализованными селями вводятся обозначения со скобками в виде « $n(R)$ » – « n -й правый водно-селевой водосбор», либо более детально « $n(R)+1l+2l+1r$ » – « n -й правый водно-селевой водосбор с внутренними селевыми притоками 2-го порядка: первым и вторым слева, первым справа²⁾».

В привязке к бассейнам (долинам) основных рек региона притоки селевых и водно-селевых водосборов обозначаются с учетом номеров рек по кадастру (Кадастр, 2001), например:

Основная река Малка № 1, для которой:

- река Кичмалка имеет № 1-01 – предлагаемое обозначение № 1-1(L): 1 (от устья р. Малка) левый *водно-селевой* приток р. Малка с внутренними селями;

- река Куркужин имеет № 1-33 – предлагаемое обозначение № 1-1(R): 1 правый *водно-селевой* приток р. Малка с внутренними селями.

¹⁾Приводимые символы « L », « l » и « R », « r », соответственно, означают «левые» и «правые» берега притоков 1-го и 2-го порядков.

²⁾Рекомендуемая нумерация не охватывает водные притоки основных рек, в водосборах которых отсутствуют селевые притоки.

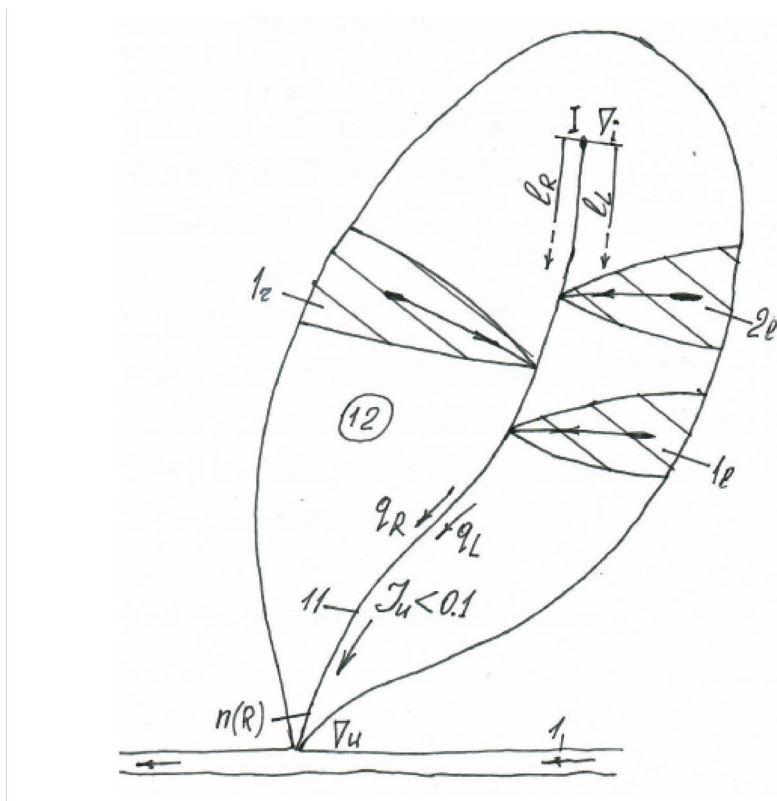


Рисунок 2. Схема водно-селевого водосбора $n(R)$ с внутренними локализованными селевыми бассейнами «1l», «2l» и «1r»
Значения обозначений 1, 1l, 12 приведены на рис. 1

Figure 2. Diagram of a mudflow catchment area with internal localized mudflow basins "1l", "2l" and "1r"
The values of designations "1", "1l", "12" are shown in Fig. 1

Основная река Баксан № 2, для которой:

- река Тызыл (Кенделен) имеет № 2-03 – предлагаемое обозначение № 2-3(L): 3 правый водно-селевой приток р. Баксан с внутренними селями;
- река Гижгит имеет № 2-09 – предлагаемое обозначение № 2-9(L): 9 левый водно-селевой приток р. Баксан с внутренними селями;
- река Герхожансу имеет №№ 2-45 – 2-15R предлагаемое обозначение №: 15 правый селевой приток р. Баксан.

Основная река Черек № 4.

Река Черек образуется на слиянии двух ущелий с основными реками – Черек-Безенгийский (№ 4Bez) и Черек-Балкарский (№ 4Bal), для которых:

- река Кара-суу (Безенгийский) имеет № 4-07 – предлагаемое обозначение № 4Bez-7(L): 7 левый водно-селевой приток р. Черек-Безенгийский с внутренними селями;
- река Тушхаркол (Ташлыккол) имеет № 4-31 – предлагаемое обозначение № 4Bez-2(R): 2 правый водно-селевой приток р. Черек-Безенгийский с внутренними селями;

– река Кара-суу (Балкарский) имеет № 4-33 – предлагаемое обозначение № 4Bal-1(L): 1 левый *водно-селевой* приток р. Черек-Балкарский с внутренними селями;

– река Чайнашки имеет № 4-37 – предлагаемое обозначение № 4Bal-4L: 4 левый *селевой* приток р. Черек-Балкарский;

– река Курунгу-суу имеет № 4-57 – предлагаемое обозначение № 4Bal-1R: 1 правый *селевой* приток р. Черек-Балкарский.

Как видно из изложенного, предлагаемая методика по нумерации притоков выгодно отличается простой идентификацией селевых и водно-селевых бассейнов, большей детализацией и информативностью с указанием местоположения рассматриваемого притока и его селеносности.

Селеопасность территорий водосборов. Площадь селеопасных территорий F_s водосбора неправомерно приравнивают всей площади водосбора $F_s = F$ (на самом деле селеопасные площади охватывают только небольшую часть водосбора, около $\sim 10\text{--}15\%$ (Анахаев и др., 2021; Анахаев и др., 2023; Анахаев, Антоненко, 2014; Анахаев, 2018; Анахаев, 2019; Анахаев, Беликов, 2020а; Анахаев, Беликов, 2020b)). Указанное не позволяет дифференцировано выделить отдельные селевые очаги и зоны опасного воздействия селей, ограничивая возможности разработки для них локальных противоселевых мероприятий.

Еще одной причиной существенного завышения селеопасных территорий является включение в категорию селевых бассейнов водно-селевых водосборов с неселевыми притоками, имеющих отдельные внутренние локализованные селевые русла 2-го порядка (Анахаев и др., 2021; Анахаев и др., 2023). Например, таковыми являются водно-селевые водосборы неселевых рек: – в бассейне *р. Малка*: Куркужин ($F=114.7 \text{ км}^2$); – в бассейне *р. Баксан*: Кенделен ($F=589.0$), Гижгит ($F=155.0$) и Гестанты ($F=140.0$) – на основе натурных обследований; – в бассейне *р. Черек-Безенгийский*: Ташлыкол ($F=30.8$), Кара-суу ($F=80.6$); – в бассейне *р. Черек-Балкарский*: Кара-суу ($F=51.4$), Ишкыргы (Рчи-Уашки-башы) ($F=52.5$); – в бассейне *р. Мзымта*: Галион-1 ($F=7.2$), Галион-2 ($F=12.3$), Галион-3 ($F=6.2$), Ачипсе-Лаура ($F=134.0$) и др.

В результате такого искусственного завышения количества и территорий селеопасных водосборов огромные площади совершенно безопасных (в отношении селей) земель необоснованно отнесены к селеопасным, что составило в общем по: Дагестану и Северной Осетии – 25%, Кабардино-Балкарии – 39%, Карачаево-Черкессии – 17% (Анахаев и др., 2021; Анахаев и др., 2023; Кадастр, 2015).

Вышеизложенное обосновывает необходимость внесения в усовершенствованную модель кадастр объективных данных по селеопасным территориям водосборов F_s с дифференциацией уровня селеопасности на основе детального анализа гидрогеоморфологических характеристик селевых бассейнов по (Анахаев и др., 2023; Анахаев, Антоненко, 2014). Для предварительной же оценки по (Анахаев, Антоненко, 2012; Анахаев, Антоненко, 2014; Анахаев и др., 2021) площади селеопасных территорий можно принять рав-

ными: $F_s \approx (0.10-0.08)f$ – для бассейнов селевых притоков 1-го порядка и $f_s \approx (0.05-0.08)f$ – для внутренних локализованных простых, частных (Непорожний, 1947; Перов, 2014) селевых бассейнов 2-го порядка с площадями f (значения F и f определяются по топографическим картам, геоинформационным системам и др.).

Длина селевого водотока (реки). Определение длины русла селевого водотока (реки) в виде «суммарной длины всех селеносных притоков данного бассейна» (Кадастр, 2015, с. 63), либо как «суммарную длину основного русла реки и всех его боковых притоков» (Кадастр, 2001; Залиханов и др., 2016 и др.; Кондратьева и др., 2017) неприемлемо ни для теоретических, ни для практических исследований (в особенности, для расчетов уклонов русла реки), более того, они могут оказать существенно вредное влияние на развитие селеведения. Поэтому в усовершенствованную модель кадастра считаем необходимым ввести нормативное определение длины русла водотока (реки) (Чеботарев, 2001) как расстояния (горизонтального) от истока реки до ее устья, при этом длина конуса выноса l_k будет равна расстоянию от вершины конуса выноса до устья реки.

Уклон русла водотока. Горные и предгорные селевые и водно-селевые бассейны с относительно малыми водосборами и большими перепадами высот (до нескольких сот метров) характеризуются, как правило, нелинейными продольными профилями водотоков с крутым падением в верхней части и более пологим профилем в нижней приустьевой половине русла. При этом очевидно, что уклон низовой половины русла I_u позволяет более правильно (в сравнении со средним уклоном всего русла) определять реальный характер движения и параметры водных и селевых потоков в основном русле, в том числе, в замыкающем створе – устье водотока.

Поэтому в усовершенствованную модель кадастра предлагается ввести наряду с величиной среднего уклона всего русла, также значения среднего уклона низовой половины русла I_u (Анахаев, Беликов, 2023), определяемого по формуле (в промилле, ‰):

$$I_u = \frac{\nabla_m - \nabla_k}{0.5L - l_k}, \quad (1)$$

где L и l_k – длины русла водотока и конуса выноса (км); ∇_m и ∇_k – высотные отметки местоположения средней части русла водотока и вершины конуса выноса (m), определяемые по географическим картам, геоинформационным системам и др. (при отсутствии конуса выноса значения l_k и ∇_k принимаются равными: $l_k = 0$, $\nabla_k = \nabla_u$).

Водный (дождевой) расход водотока. Водные (дождевые) расходы водотоков горных и предгорных водосборов являются важнейшим фактором формирования (и прогнозирования) паводков и возникновения селевых потоков, в связи с чем необходимо ввести эти данные в структуру усовершенствованного селевого кадастра. При этом, максимальные руслоформирующие

значения водных расходов Q_{max} ($\text{м}^3/\text{с}$) для рассматриваемых условий принимаются равными дождевым расходам 1% обеспеченности $Q_{max}=Q_{1\%}$, значения же последних для горных водотоков с небольшими водосборами ($\leq 200 \text{ км}^2$) и разнообразными гидрогеоморфологическими особенностями находятся по формуле предельной интенсивности стока (тип III) (СНиП 2.01.14-83, 1985, п. 4.18; СП 33-101-2003, 2004, п. 7.44; Анахаев, Беликов, 2023)

$$Q_{1\%} = q'_{1\%} \varphi H_{1\%} \delta F, \quad (2)$$

в которой для Северо-Кавказского региона принимаются упрощенные значения величин (Анахаев, Беликов, 2023):

$$\left. \begin{aligned} q'_{1\%} &= (0.5\gamma^3 - 3.7\gamma^2 - 1.43\gamma + 38.4) \cdot 10^{-2}, \quad \gamma = \ln|\Phi_p|; \\ \Phi_p &= \frac{1000L}{m_p I_u^m \sqrt[4]{F\varphi H_{1\%}}}; \quad \varphi = 0.15 \left(1 + \frac{L^2}{2F}\right), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\delta=1$ – коэффициент влияния озерности водосбора; $q'_{1\%}$ и $H_{1\%}=120 \text{ мм}$ – соответственно, модуль стока и максимальный суточный слой осадков 1%-обеспеченности; $|\Phi_p|$ – модуль гидрогеоморфологической характеристики русла; φ – сборный коэффициент стока; параметры $m_p=10$ (м/мин) и $m=0.143$ – параметры гидравлического состояния и шероховатости русла; I_u – средний уклон низовой половины русла, определяемый по (1).

Сравнение максимальных значений ливневых расходов $Q_{max}=Q_{1\%}$, подсчитанных по указанным формулам, с известными базовыми значениями для 16 различных притоков основных рек Баксана, Чегема, Череха (Схема, 1987; Сейнова, Золотарев, 2001) при значении $H_{1\%}=120 \text{ мм}$ дало приемлемое соответствие (со средней погрешностью $+4.6 \%$) (Анахаев, Беликов, 2023).

Значения расходов для других $p(\%)$ обеспеченностей ($Q_{p\%}$) находятся по известной величине $Q_{1\%}$ с использованием переходного коэффициента λ (Анахаев, Беликов, 2023), в виде:

$$Q_{p\%} = Q_{1\%} \cdot \lambda, \quad \lambda = 1 - 0.173 \cdot \ln(p\%). \quad (4)$$

На практике в ряде случаев возникает необходимость определения интенсивности распределенного поступления удельных расходов дождевого стока вдоль (левого q_L и правого q_R) берегов русла водотока, например, при проектировании нагорных и ловчих каналов, профиля автодороги и др. Для нахождения значений q_L и q_R в водосборах с одиночным руслом (без притоков 2 порядка) рекомендуются следующие зависимости:

$$q_L = \frac{Q_{1\%}}{(L-l_k)} \frac{F_L}{F}, \quad q_R = \frac{Q_{1\%}}{(L-l_k)} \frac{F_R}{F}, \quad (5)$$

в которых F – площадь рассматриваемого водосбора, а F_L и F_R – значения площадей водосбора, соответственно, с левой и правой стороны от русла водотока.

При этом величины текущих расходов по левому q_L и q_R правому берегам в нарастающем порядке от истока V_I до заданного створа на расстоянии l от истока водотока V_I будут равны

$$q_L = q_L \cdot l; \quad q_R = q_R \cdot l. \quad (6)$$

Из формул (6) при значениях $l = L - l_k$ получаются величины полных расходов по левому Q_L и правому Q_R берегам в виде:

$$Q_L = Q_{1\%} \frac{F_L}{F}; \quad Q_R = Q_{1\%} \frac{F_R}{F}. \quad (7)$$

В случаях же разветвляющихся и сложносоставных водосборов с несколькими притоками (водосборами) 2-го порядка значения текущих расходов q_L и q_R (от истока до заданных точек основного русла водотока) находятся по нижеследующему примеру водно-селового водосбора неселового n -го правого притока 1-го порядка с тремя внутренними локализованными селовыми бассейнами 2-го порядка $n(R)+1l+2l+1r$ (рис. 2):

– определяется «остаточный» расход водосбора $Q_{1\%}$ за вычетом расходов водосборов 2-го порядка q_{1L}, q_{2L}, q_{1R} , подсчитываемых по методике формул (1)-(3), от основного расхода $Q_{1\%}$ в виде:

$$Q_{1\%} = Q_{1\%} - q_{1L} - q_{2L} - q_{1R}; \quad (8)$$

– подсчитывается «остаточная» площадь водосбора F за вычетом площадей водосборов 2-го порядка от площади рассматриваемого водосбора F

$$F = F - f_{1L} - f_{2L} - f_{1R}; \quad (9)$$

– величины удельных расходов дождевого стока вдоль левого q_L и правого q_R берегов определяются по формулам (5), подставляя в них вместо $Q_{1\%}$ значение $Q_{1\%}$ и $l_k=0$;

– величина нарастающего текущего расхода по левому берегу q_L от истока водотока (точки I) до заданного створа на расстоянии l_L от истока находится для интервалов: $0 \leq l_L^I < l_{I-1R}$; $l_{I-2L} \leq l_L^{II} < l_{I-1L}$ и I , соответственно, по формулам:

$$q_L^I = q_L \cdot l_L^I; \quad q_L^{II} = q_L \cdot l_L^{II} + q_{2L}; \quad q_L^{III} = q_L \cdot l_L^{III} + q_{2L} + q_{1L}; \quad (10)$$

– величина нарастающего текущего расхода по правому берегу q_R от истока I до заданного створа на расстоянии l_R от истока водотока находится для интервалов $0 \leq l_{LR}^I < l_{I-1R}$ и $l_{I-1R} \leq l_R^{II} \leq L$, соответственно,

$$q_R^I = q_R \cdot l_R^I; \quad q_R^{II} = q_R \cdot l_R^{II} + q_{1R}. \quad (11)$$

Значения же нарастающего текущего расхода по всему руслу водотока от истока I до заданного створа на расстоянии l рассчитывается аналогичным

образом суммированием текущих расходов по левому и правому берегам.

Величины полных расходов по левому Q_L и правому Q_R берегам будут равны:

$$Q_L = Q_{1\%} \frac{F_L}{F} + q_{2L} + q_{1L}; \quad Q_R = Q_{1\%} \frac{F_R}{F} + q_{1R}. \quad (12)$$

Селевые расходы водотоков. В зависимости от характера движения селевого потока его расход определяется для двух режимов: условно-равномерного и максимально-волнового.

Для условно-равномерного движения селя предварительное значение селевого расхода Q_c может быть определено по известной зависимости (Байнатов, 1992; Перов, 2012; Анахаев, Беликов, 2023):

$$Q_S = (1 + \beta) Q_{pav}, \quad (13)$$

в которой Q_{pav} – паводковый расход, принимаемый равным $Q_{pav} = Q_{1\%}$; β – весовое наносоводное отношение, значение которого (для объемного веса наносов 1.8 т/м^3) можно выразить на основе (Соколовский, 1947; Херхеулидзе, 1947; Анахаев, Беликов, 2023) через уклон низовой половины русла I_u (‰), определяемый по (1), в виде:

$$\beta = \frac{I_u^{0.4}}{11 - 0.55 I_u^{0.4}}. \quad (14)$$

Максимально-волновое (мгновенное) пиковое значение расхода селя Q_c^w (в виде селевого вала) определяется на основе детального изучения гидрогеоморфологических особенностей водосбора и селевого русла по 16 признакам (Анахаев, Беликов, 2023), в том числе, с учетом наличия прорывоопасных озер, заторных водоемов, поворотов, обвальных и оползневых береговых склонов, извилистости русла и др.

Считаем необходимым включение в усовершенствованный селевой кадастр значений максимальных водных (дождевых) расходов $Q_{1\%}$ и условно-равномерных расходов селя Q_c .

Определение же значений максимально-волнового (пикового) расхода селя Q_c^w требует специальных расчетов на основе детальных данных натурного обследования селевого бассейна, что может быть выполнено при непосредственном проектировании противоселевых сооружений на данном водотоке.

Объем единовременного селевого выноса. Объемы единовременных селевых выносов (используемые для оценки селеопасности водосбора) чрезвычайно сложно определять как теоретически, так и прикладными методами (в том числе, аэро-фото сканированием и др.), поскольку при сходе селя значительные объемы наносов «сепарируются» и уносятся основной рекой бассейна, часть наносов «фрагментировано» остается на транзитном участке селевого русла (Смирнов, 1957; Перов и др., 2012), часть «свежих» наносов откладывается на поверхности конуса выноса, наращивая очередным слоем

существующий «многослойный пирог» предыдущих выносов, поверхность которых также оседает со временем (из-за осадок, консолидации, размывов и др.). Поэтому точное определение объемов единовременных селевых выносов является сложной и многотрудной задачей, требующей детальных натурных обследований как всего селевого бассейна, так и отдельных «фрагментальных» селевых отложений, с использованием специальных устройств и оборудования, геодезических приборов и др. (Смирнов и др., 1957), а потому (при многочисленности селевых русел) неприемлемо для всеобщего использования. Таким образом, на практике объемы единовременных селевых выносов не могут быть оперативно оценены даже грубо приближенно («на глазок»), а потому не могут рассматриваться в качестве основы расчетного обоснования для научно-прикладных исследований, в частности, для инженерных расчетов при проектировании селепропускных и защитных сооружений в отличие от расходов и скоростей селя и др. (Анахаев, Беликов, 2020b). Изложенное дает основание для перевода данных максимальных единовременных селевых выносов в приложение усовершенствованного кадастра, имея в виду малочисленность достоверно полученных данных по ним, их «устаревания» в течение нескольких лет, а также крайней затрудненности проведения на регулярной основе инструментальных обследований объемов «свежих» селевых выносов при их многочисленности и труднодоступности.

Одновременно рекомендуется включение в усовершенствованную модель селевого кадастра данных о прогнозируемых максимальных (руслоформирующих) водных расходах водотоков, провоцирующих селевые потоки, формах и максимальных размерах каменных валунов, выносимых селевым потоком (что может быть использовано для определения скоростей селя, высоты селевого вала и др.). В кадастре указываются также известные даты сходов предыдущих селей с причиненным ущербом, существующие противо-селевые и защитные сооружения, а также объекты экономики и транспорта, линейные инженерные сооружения (и др.), расположенные в селеопасной зоне и подверженные риску разрушительного воздействия селевых и водно-селевых потоков.

Заключение

Последние десятилетия характеризуются интенсивным освоением природных ландшафтов горных территорий Северного и Западного Кавказа путем строительства промышленных, сельскохозяйственных, дорожных, рекреационных и спортивных объектов. Эффективность проектируемых при этом защитных мероприятий от негативного воздействия селевых и водно-селевых потоков во многом зависит от достоверности используемых исходных гидрогеофизических характеристик водосборов в моделях селевых кадастров. Однако, устаревшая структура последних не позволяет в достаточно полной и обоснованной мере выявлять такие важнейшие особенности водосборов, как однозначную идентификацию селевых и водно-селевых водосборов, дифференцированную селеопасность территорий, гидрогеофизические

характеристики водосборов, максимальные (руслоформирующие) расходы дождевых стоков и селевых потоков и др. Предложенная усовершенствованная структура модели селевых кадастров позволяет во многом преодолеть указанные недостатки и улучшить методологическую базу для последующего формирования математических моделей селевых процессов. Приведена также новая методика расчета текущего нарастающего распределенно-сосредоточенного склонового стока нагорных каналов водотоков, а также частный пример использования указанной методики для отдельного водно-селевого водосбора.

Благодарности

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

Список литературы

Анахаев, К.К., Беликов, В.В., Анахаев, К.Н., Анаев, М.Т., Борисова, Н.М. (2023) О селеопасности территорий селевых бассейнов, *Процессы в гео-средах*, № 2, с. 2071-2081.

Анахаев, К.Н. (2018) О кадастрах селевых бассейнов, *Грозненский естественнонаучный бюллетень*, Грозный, т. 3, № 4 (12), с. 11-19, doi:10.25744/genb.2018.12.4.002.

Анахаев, К.Н. (2019) О достоверности геофизических параметров в селевом кадастре юга России, *Вестник МГСУ*, т. 14, вып. 5, с. 610-620, doi: 10.22227/1997-0935.2019.5.610-620.

Анахаев, К.Н., Антоненко, О.Л. (2012) Дифференциация селеопасности территорий селевых бассейнов горных водотоков, *Селевые потоки, катастрофы, риск, прогноз, защита*. Труды II конференции, посвященной 100-летию со дня рождения С.М. Флейшмана, МГУ, М., с. 11-12.

Анахаев, К.Н., Антоненко, О.Л. (2014) Дифференциация селеопасности бассейнов горных и предгорных водотоков, *Природообустройство*, № 3, с. 73-78.

Анахаев, К.Н., Беликов, В.В. (2020a) О гидрогеофизических “несуразностях” в изучении горных рек Северного Кавказа, *Мелиорация и водное хозяйство*, № 5, с. 19-24.

Анахаев, К.Н., Беликов, В.В. (2020b) О гидрологических и геофизических особенностях некоторых работ по селеведению, *Гидротехническое строительство*, № 6, с. 32-38.

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.

Анахаев, К.Н., Беликов, В.В., Амшоков, Б.Х., Анахаев, К.К. (2021) Обновлённые характеристики селевых бассейнов, *Гидротехническое строительство*, № 3, с. 50-54.

Анахаев, К.Н., Макитов, У.И., Анахаев, Х.А., Дышеков, А.Х. (2016) Об условиях возникновения селевой опасности дождевого генезиса в горных районах, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 59-68.

Байнатов, Ж.Б. (1992) *Защита от селевых потоков*, Научно-технические достижения и передовой опыт в области автомобильных дорог, вып. 3, Росавтодор, М., 79 с.

Залиханов, М.Ч., Кондратьева, Н.В., Аджиев, А.Х., Разумов, В.В. (2016). Учёт генезиса селеобразования при предварительной оценке максимального объёма твёрдых отложений селя на территории Северного Кавказа, *ДАН*, т. 470, № 2, с. 212-214.

Кадастр лавинно-селевой опасности Северного Кавказа (2001) С-Пб., ГМИ., 112 с.

Кадастр селевой опасности юга Европейской части России (2015) Москва, Нальчик, 148 с.

Кондратьева, Н.В., Залиханов, М.Ч., Аджиев, А.Х., Разумов, В.В. и др. (2017) *Способ оценки единовременного максимально возможного объёма твёрдых селевых выносов в селевое русло реки при сходе селя*, Патент № 2618494, Бюл. № 13.

Методические рекомендации по обеспечению противоселевой безопасности объектов экономики (2016) Под редакцией Анахаева, К.Н., Нальчик, ВГИ Росгидромета, 59 с.

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

Перов, В.Ф. (1990). *Селевые явления. Терминологический словарь*, МГУ, М., 46 с.

Перов, В.Ф. (2014). *Селевые явления. Терминологический словарь*. 2-е изд., МГУ, М., 70 с.

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

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

Смирнов И.П. (1957) Изучение основных элементов селей по оставленным ими следам, *Труды КазНИГМИ*, вып. 9, с. 32-42.

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*, Госстрой России, М.

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.

Чеботарев, А.И. (2001). *Гидрологический словарь*, Л., Гидрометеиздат, 112 с.

Черноморец, С.С. (1991) Расчет объема селевой массы, *Транспортное строительство*, № 11, с. 4-6.

References

Anakhaev, K.K., Belikov, V.V., Anakhaev, K.N., Anaev, M.T., Borisova, N.M. (2023) O sele opasnosti territorii selevich basseinov [On the mudflow hazard of mudflow basin areas], *Prozessi v geosredach*, no. 2, pp. 2071-2081.

Anakhaev, K.N. (2018) O kadastrach selevich basseinov [About the cadastre of mudflows], *Groznijskii estestvenno – nauchnii bjulleten*, Groznii, vol. 3, no. 4 (12), pp. 11-19, doi:10.25744/genb.2018.12.4.002.

Anakhaev, K.N. (2019) O dostovernosti geofizicheskikh parametrov v selevom kadastrе juga Possii [On the reliability of geophysical parameters in the rural cadastre of the south of Russia], *Vesnyk MGSU*, vol. 14, no. 5, pp. 610-620, doi: 10.22227/1997-0935.2019.5.610-620.

Anakhaev, K.N., Antonenko, O.L. (2012) Differentsiatsiya seleopasnosti basseinov gornich vodotokov [Differentiation of mudflow hazard in the areas of mudflow basins of mountain watercourses], *Selevie potoki, katastrofi, risk, prognoz, saschita*, Trudi II konferentsii, posvijschennoj 100-letij so dnij roshdenij S.M. Fleischmana, MGU, Moscow, Russia, pp. 11-12.

Anakhaev, K.N., Antonenko, O.L. (2014) Differentsiatsiya seleopasnosti territorii selevich basseinov gornich i predgornich vodotokov [Differentiation of mudflow hazard of basins of mountain and foothill watercourses], *Prirodoobustroistvo*, no. 3, pp. 73-78.

Anakhaev, K.N., Belikov, V.V. (2020a) O geofizicheskikh “nesuraznostjch” v izuchenii gornich rek Sewernogo Kawkaza [On hydrogeophysical “absurdities” in the study of mountain rivers of the North Caucasus], *Meliratsia i wodnoe choziastvo*, no. 5, pp. 19-24.

Anakhaev, K.N., Belikov, V.V. (2020b) O gidrologicheskikh i geofizicheskikh osobennostiach nekotorych rabot po selevedeniu [On hydrological and geophysical features of some mudflow studies], *Gidrotechnicheskoe stroitelstvo*, no. 6, pp. 32-38.

Anakhaev, K.N., Belikov, V.V. (2023) O modelirowanii sklonovogo stoka na gornich i predgornich vodosborach [On the modeling of slope runoff on mountain and foothill catchments], *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 9, no. 4, pp. 386-402, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-386-402.

Anakhaev, K.N., Belikov, V.V., Amshokov, B.Kh., Anakhaev, K.K. (2021) Obnovlennye charakteristiki selevich basseinov [Updated characteristics of mudflows], *Gidrotechnicheskoe stroitelstvo*, no. 3, pp. 50-57.

Anakhaev, K.N., Makitov, U.I., Anakhaev, Kh.A., Dishekov, A.Kh. (2016) Ob usloviyakh vozniknoveniya selevoj opasnosti dojdevoogo genezisa v gornich rajonakh [On conditions of occurrence of mudflow hazard of rain genesis in mountainous regions], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 6, pp. 59-68.

Bainatow, J.B. (1992) Zachita ot selevych potokow [Scientific and technical achievements and best practices in the field of roads], *Nauchno – technicheskie dostigneniya i peredovoi opit v oblasti avtomobilnich dorog*, vol. 3, Posawtodor, Russia, 79 p.

Zalichanov, M.Ch., Kondratieva, N.V., Adshiev, A.Ch., Razumov, V.V. (2016) Uchet genezisa seleobrazovaniya pri predvaritelnoi ozenke maksimalnogo obiyema tverдых otlocheniy selia na territorii Sewernogo Kawkaza [Taking into account the genesis of mudflow formation in the preliminary assessment of the maximum volume of solid mudflow deposits in the North Caucasus], *DAN*, vol. 470, no. 2, pp. 212-214.

Kadastr lawinno-selevoi opasnosti Sewernogo Kawkaza (2001) [North Caucasus avalanche-mudflow hazard cadastre], WGI, S-Pb, Russia, 112 p.

Kadastr selevoj opasnostijuga evropeiskoi chasti Possii (2015) [Cadastre of mudflow hazard of the south of the European part of Russia], M.-Nalchik, Russia, 148 p.

Kondratieva, N.V., Zalichanov, M.Ch., Adshiev, A.Ch., Razumov, V.V. et al. (2017) *Sposob ozenki edinowremennogo maksimalno vozmochnogo obiyema selevich vinosov v selevoe ruslo rek i pri schode selia* [Method for Estimating the Maximum Possible Volume of Solid Mudflows into a Mudflow Bed of a River in the Event of Mudflows], Patent no. 2618494, Bul. no. 13.

Metodicheskie rekomendazi po obespecheny protiwo selevoi bezopasnosti obiyektov ekonomiki (2016) [Methodological recommendations for ensuring anti-mudflow safety of economic facilities], WGI, Nalchik, Russia, 59 p.

Neporoshnii, P.S. (1947) Saschita hydroelektrostantsii ot selevichp otokov. [Protection of hydroelectric power plants from mudflows], GEI, M.L., Russia, 164 p.

Perov, W.D. (1990) *Selewie jawlenia*. Terminologicheskii slowar [Mudslides. Terminology Dictionary], MGU, Moscow, Russia 46 p.

Perov, W.D. (2014) *Selewiejawlenia*. Terminologicheskii slowar. [Mudslides. Terminology Dictionary], 2-e izd. MGU, Moscow, Russia, 70 p.

Perov, W.D. (2012) *Selewedenie*. [Selenium], MGU, Moscow, Russia, 271 p.

Seinova, I.B., Solotarev, E.A. (2001) *Ledniki i seli Prielbrusia*. [Glaciers and mudflows of the Elbrus region], MGU, Moscow, Russia, 203 p.

Smirnov, I.P. (1957) Izuchenie osnovnich elementov selei po ostavlenim imi sledam [Study of the main elements of mudflows according to the traces left by them], *Trudi Kaz. NIGMI*, iss. 9, pp. 32-42.

SNiP 2.01.14-83 (1985) *Opreделение raschetnich gidrologicheskikh harakteristik*. [Determination of design hydrological characteristics], Moscow, Russia, 36 p.

Sokolowskii, D.L. (1947) Selevyt pavodki, ich gidrologicheskie osobennosti i metodika rascheta [Mudflows, their hydrological features and calculation methodology], *Meteorologiya i gidrologiya*, pp. 65-75.

SP 33-101-2003 (2004) *Opreделение raschetnich gidrologicheskikh harakteristik* [Determination of basic design hydrological characteristics], Gosstroi Rossii, Moscow, Russia.

Schema ingenernoi zashity gorodov i naslennykh punktov KBASSR ot opasnykh geologicheskikh prozessov [Diagram of engineering protection of cities and settlements of KBASSR from hazardous geological processes] (1987) v. III, SKGWH, Piytigorsk, Russia, 86 p.

Fleischmann, S.M. (1978) *Seli* [Mudflows], GMI, Moscow, Russia, 312 p.

Herheulidze, I.I. (1947) *Owragnye I selevye winosy* [Ravine and mudflows], Dorizdat, Moscow, Russia, 97 p.

Chebotaev, A.I. (2001). *Gidrologicheskii slovar* [Hydrological Dictionary], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 112 p.

Chernomorez, S.S. (1991) Raschet objema selevoi massi [Mud volume calculation], *Transportnoe stroitelstvo*, no. 11, pp. 4-6.

Статья поступила в редакцию (Received): 28.08.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 15.09.2024.

Принята к публикации (Accepted): 13.10.2024.

Для цитирования / For citation:

Анахаев, К.Н., Беликов, В.В., Анахаев, А.А. (2024) Усовершенствование модели селевых кадастров с использованием расчетной оценки склонового стока, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 4, с. 492-509, doi:10.21513/2410-8758-2024-4-492-509.

Anakhaev, K.N., Belikov, V.V., Anakhaev, A.A. (2024) Improvement of the mudflow inventory model using the estimates of slope runoff, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 4, pp. 492-509, doi:10.21513/2410-8758-2024-4-492-509.

Глобальные рынки аммиака: перспективы развития и декарбонизации

И.А. Башмаков

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

Адрес для переписки: *bashmako@co.ru*

Реферат. В статье рассмотрены сложившиеся тенденции и прогнозные оценки развития мировой аммиачной промышленности, а также основные направления ее декарбонизации. На производство аммиака приходится примерно треть выбросов CO_2 от мировой химической промышленности. Выбросы динамично растут и к 2022 году достигли по охватам 1 и 2 почти 450 млн т CO_2 . Это результат наращивания производства аммиака при отсутствии на протяжении последних 40 лет прогресса в декарбонизации. Условием декарбонизации мировой экономики в целом является кратное наращивание производства аммиака к 2050 году за счет формирования новых рынков – использования аммиака в качестве топлива и носителя водорода. Важным условием такого развития является создание и масштабирование необходимой инфраструктуры: сотни ГВт мощности электролизеров; сотни млрд кВт·ч генерации безуглеродной электроэнергии и системы CCS мощностью в десятки Мт CO_2 . Производство низкоуглеродного аммиака обходится заметно дороже, но к концу 2040-х годов ценовая премия сводится к нулю. В сценариях с действующими мерами политики выбросы ПГ от производства аммиака могут немного вырасти до 2030 г., а затем немного сократятся к 2050 г. В сценариях с дополнительными мерами политики выбросы могут сократиться в 3-4 раза к 2050 г., а в сценариях декарбонизации – по меньшей мере на порядок. Достижение углеродной нейтральности в аммиачной промышленности к 2050 г. означает постепенное снижение бенчмарка по выбросам CO_2 практически до нуля за счет мер по повышению энергоэффективности; замены одних ископаемых топлив другими; наращивания масштабов применения технологии CCUS; электрификации технологических процессов; декарбонизации используемой электрической энергии; использования биомассы и снижения выбросов ПГ при добыче и транспортировке топлива, сырья и готовой продукции.

Ключевые слова. Мировая аммиачная промышленность, декарбонизация, прогнозы, парниковые газы, технологии.

Global ammonia markets: development and decarbonization prospects

I.A. Bashmakov

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

Correspondence address: *bashmako@co.ru*

Abstract. The paper explores the current trends and development projections in the global ammonia industry and the key decarbonization pathways. Ammonia production is responsible for about one third of CO₂ emissions from the global chemical industry. The emissions are growing dynamically and by 2022 they approached 450 Mt CO₂ in Scopes 1 and 2. This was a result of scaling up ammonia production with no progress in its decarbonization over the past 40 years. Many-fold increase in ammonia production on the 2050 horizon to provide feedstock to the emerging markets of ammonia fuel use and hydrogen carrier is the pre-requisite for the global economy decarbonization. An important condition for this is scaling up the necessary infrastructure: hundreds of GW of electrolyzer capacity; hundreds of billions of kWh of no-carbon electricity generation, and dozens of Mt CO₂ of CCS systems. Transition to low-carbon ammonia production comes at a price, but the price premium shrinks to zero in the late 2040s. In current policies scenarios, GHG emissions from ammonia production may slightly increase in 2030 to go down a bit by 2050. In scenarios with additional policies, the emissions may go down 3- or 4-fold in 2050, or by an order of magnitude in decarbonization scenarios. Achieving carbon neutrality in the ammonia industry in 2050 means a gradual reduction in the CO₂ emission benchmark to near zero through energy efficiency improvements; fuel shifts; scaling up CCUS deployment; electrification of technological processes; decarbonized electricity use; use of biomass and reduction of GHG emissions across the whole supply chain, including extraction and transportation of fuel, raw materials and products.

Keywords. Global ammonia industry, decarbonization, projections, greenhouse gases, technologies.

Ретроспектива динамики глобальных выбросов ПГ при производстве аммиака

На производство аммиака приходятся самые большие (примерно треть, MPP, 2022) выбросы CO₂ в мировой химической промышленности. Оценки масштабов выбросов заметно разнятся. Оценки на 2010 год находятся в диапазоне 340 (The Royal Society, 2020) – 451 МтCO₂,¹⁾ или 2.16-2.87 тCO₂/т аммиака. Оценка на 2018 год равна 500 МтCO₂,²⁾ или 2.84 тCO₂/т. Оценка Mission Possible Partnership составляет 2.6 тCO₂/т (охват 1 и 2). На охват 1 пришлось 480 МтCO₂, на охват 2 – 100 МтCO₂ (MPP, 2022). Выбросы по охвату 3 (поставки топлива и сырья) оценены в 110 МтCO₂экв (в основном выбросы и утечки в процессах добычи и транспортировки газа и угля). МЭА дает более скромную оценку по охвату 3 – 70 МтCO₂экв (IEA, 2021). Прямые выбросы по охвату 1 оценены в 430 МтCO₂экв, а по охвату 2 – в 40 МтCO₂экв, т.е. в сумме по охватам 1 и 2 – 470 МтCO₂экв. Мировой экономический форум дает сред-

¹⁾ Industrial ammonia production emits more CO₂ than any other chemical-making reaction. Chemists want to change that (acs.org) со ссылкой на Institute for Industrial Productivity.

²⁾ Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store. 2020. POLICY BRIEFING. The Royal Society. February 2020; Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store (royalsociety.org).

ную оценку удельных выбросов (сумма охватов 1 и 2) за последние 5 лет также на уровне 2.6 тСО₂/т, а суммарных выбросов – 420 МтСО₂ по охвату 1³⁾ и 460 по охватам 1 и 2.⁴⁾

Есть и более низкие оценки удельных выбросов по охватам 1 и 2 – 1.9 тСО₂/т (Ausfelder et al., 2022). МЭА оценивает выбросы на 2020 год в 450 МтСО₂, из которых прямые выбросы от промышленных процессов равны 250 МтСО₂, в т.ч. 130 МтСО₂ используется на производство мочевины (IEA, 2021). Тогда на выбросы от сжигания топлива приходится 200 МтСО₂. IRENA and AEA (2022) оценивают выбросы в 500 МтСО₂. База данных EDGAR6.0 дает оценку выбросов от промышленных процессов на 2019 год, равную 347 МтСО₂, из которых 59 МтСО₂ используется на производство карбамида (мочевины). (Crippa et al., 2021). Необходимо разобраться в этих оценках. Часть оценок разнится из-за использования различных метрик.

Согласно методике МГЭИК,⁵⁾ при расчете выбросов от производства аммиака не делается разделения на выбросы от сжигания и от процессов; все выбросы относятся на промышленные процессы (разделы инвентаризации 2B1gfossil, Ammonia production, gross CO₂ и 2B1sfossil, CO₂-ammonia stored in urea). В расчетах используется удельный расход топлива на 1 т аммиака и коэффициенты выбросов для этих видов топлива. По умолчанию для природного газа в зависимости от технологии на современных заводах используются коэффициенты удельных выбросов 1.666-1.694 тСО₂/т (29.7-30.2) ГДж/т*0.056 тСО₂/ГДж), для мазута – 2.772 тСО₂/т, а для угля вмененные коэффициенты в методике не приводятся.

Для природного газа среднее по миру значение удельных выбросов получается равным 1.9 тСО₂/т (34 ГДж/т*0.056 тСО₂/ГДж). Для угля среднее значение получается равным 4.8-5.14 тСО₂/т (50.6 ГДж/т*(0.946÷0.101) тСО₂/ГДж) в зависимости от видов использованных углей. В отношении мочевины указано, что расход составляет 0.733 тСО₂/т мочевины. Ее производство в мире в 2020 году составило 181 млн т, в 2021 году – 180 млн т, в 2022 году – 184 млн т. Если допустить, что вся мочевина производится с использованием только СО₂, захваченного в процессе производства аммиака, то получается близкая к МЭА оценка – 132-135 МтСО₂.

На основе данных по производству аммиака, мочевины, потреблению топлива с разбиением на сырье и сжигаемое топливо, оценок потребления электроэнергии и удельных выбросов СО₂ на производство электроэнергии автором получена динамика и структура выбросов СО₂ от производства аммиака в 1920-2022 гг. (рис. 1).

³⁾ Ammonia industry net-zero tracker – Net-Zero Industry Tracker 2023, World Economic Forum (weforum.org).

⁴⁾ Там же.

⁵⁾ В 2019 году в раздел по аммиаку изменения не вносились, поэтому сохранилась методика расчетов 2006 года: 2006 IPCC Guidelines Vol.3 IPPU Chapter 3 Sections 3.1-3.8 (iges.or.jp).

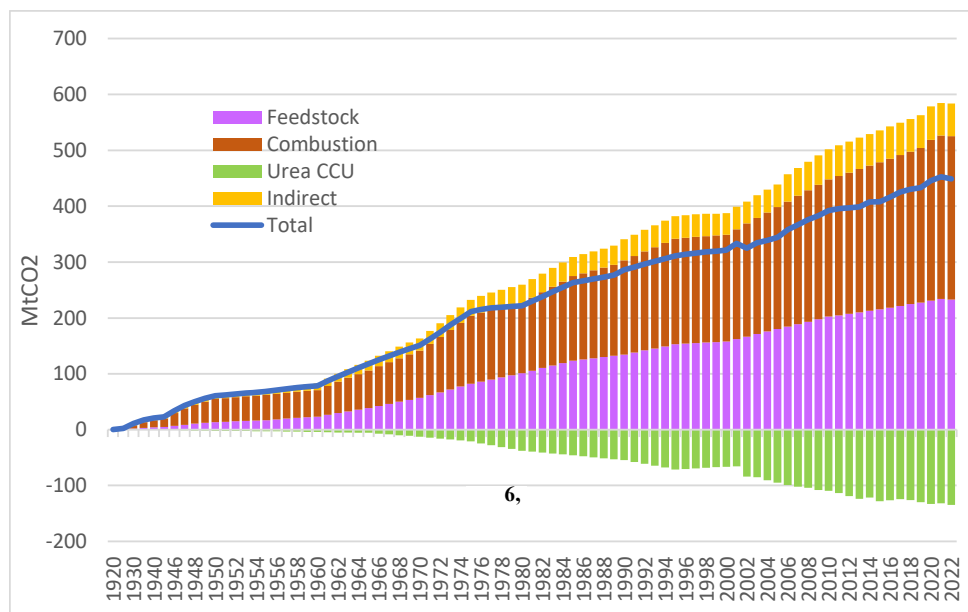


Рисунок 1. Ретроспективная динамика глобальных выбросов CO₂ при производстве аммиака

Источники: построено автором по данным Glibert et al., 2006; Pinto et al., 2022; базы данных МЭА; Rouwenhorst et al., 2022

Figure 1. Historical dynamics of global CO₂ emissions from ammonia production

Source: reconstructed by the author based on Glibert et al., 2006; Pinto et al., 2022; IEA database; Rouwenhorst et al., 2022

Анализ данных рис. 1 позволяет сформулировать следующие выводы:

1. В 2022 г. суммарные нетто-выбросы CO₂ по охватам 1 и 2 составили 449 млн т, что практически совпадает с оценкой МЭА.

2. Выбросы по охвату 3, сопряженные в основном с утечками метана в процессах добычи и транспортировки угля и природного газа, оценены равными 70-110 МтCO₂экв. Таким образом, нетто-выбросы по охватам 1, 2 и 3 равны 520-560 МтCO₂экв, или 2.8-3 тCO₂экв/т аммиака.

3. Прямые выбросы от использования топлива равны 525 млн тCO₂. Они почти в равной пропорции делятся на выбросы от сжигания топлива (261 млн тCO₂) и выбросы от технологических процессов (265 млн тCO₂). При использовании коэффициента МЭА (расход на сырьевые цели 18.6 ГДж/т аммиака) пропорция меняется на 292:233 млн тCO₂.

4. Утилизация CO₂ для производства мочевины составляет 134.5 млн тCO₂, что близко к оценке МЭА.

5. Косвенные выбросы при производстве электроэнергии, используемой при производстве аммиака (охват 2), составили 58 млн тCO₂.

6. Кумулятивно с 1920 года нетто-выбросы от производства аммиака по охватам 1 и 2 составили 18.5 Гт CO₂.

Полученные оценки позволяют также оценить удельные выбросы (рис. 2). Можно сформулировать следующие выводы:

1. В последние 40 лет не наблюдается прогресса в декарбонизации производства аммиака: удельные нетто-выбросы CO₂ стагнировали на уровне 2.4-2.5 тCO₂/т аммиака.

2. Нетто-выбросы CO₂ слепо следовали за наращиванием потребления энергии, которое, в свою очередь, четко следовало за изменениями объемов производства аммиака, растущими довольно динамично.

3. Эта ситуация резко контрастирует с периодом 1930-1980 гг., когда удельные выбросы снизились по меньшей мере в 4 раза.

4. Таким образом, отрасль однажды уже решила задачу кратного снижения удельных выбросов CO₂ в течение полувека. Этот опыт требуется повторить, возможно, на более сжатом временном интервале.

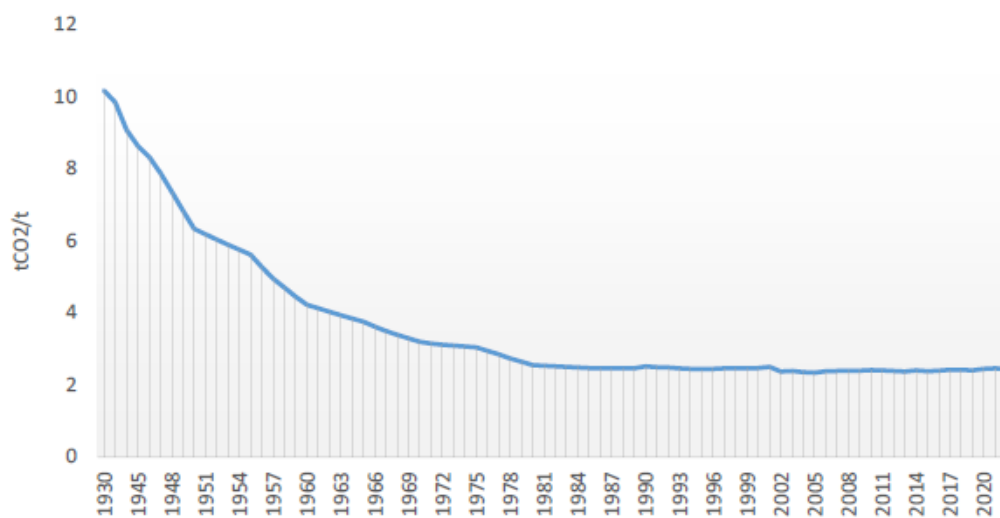


Рисунок 2. Ретроспективная динамика среднемировых удельных выбросов CO₂ при производстве аммиака

Источники: построено автором по данным рис. 1

Figure 2. Historical dynamics of global average CO₂ emissions per ton of ammonia production

Source: reconstructed by the author based on the data in Figure 1

Перспективы развития производства аммиака в мире до 2050 года

Одним из условий декарбонизации мировой экономики является кратное (в 3-6 раз) наращивание производства аммиака к 2050 году, основная часть которого должна производиться на безуглеродной основе. Сформировались два видения будущего мирового рынка аммиака (рис. 3 и 4):

- традиционное развитие с ростом до 80% к 2050 г. (IRENA и АЕА в сценарии 1.5°C) или до 2.1% в год, определяемым в большей степени спросом на азотные удобрения и другие традиционные направления использования аммиака;

- 3-6-кратный рост до 2050 г. (на 4-6.7% в год, или примерно так же быстро, как в 1950-е и 1970-е годы) за счет динамичного формирования новых рынков использования аммиака в качестве топлива и носителя водорода.

Роль новых применений аммиака растет постоянно: если в 2010-2020 годы спрос на азотные удобрения в мире рос на 1.7% в год, то спрос на использование аммиака для других целей рос в среднем на 4% в год (IEA, 2021). Назовем эти рынки традиционными. На традиционных рынках потребление аммиака на душу населения в разных сценариях либо немного растет, либо очень медленно снижается. В сценарии МЭА *Заявленные меры политики* предполагается рост производства аммиака к 2050 году на 37% – немногим выше 250 млн т – за счет роста экономики, сельхозпроизводства и населения (на 25%). В сценарии *Устойчивое развитие* реализация пакета мер по повышению эффективности конечного использования азотных удобрений, рециклирование пластиков и резин позволяет ограничить рост производства уровнем 23%, или примерно до 230 млн т. К 2030 г. диапазон прогнозов использования аммиака на цели производства удобрений равен 137-193 Мт, а в 2050 г. – 116-267 млн т (рис. 3). Для прочих традиционных рынков аммиака в прогнозах заложен рост до 30-68 млн т к 2030 г. и до 45-78 Мт к 2050 г. Для них самые высокие оценки дают IEA (2021) и Menga et al. (2023). В итоге за счет традиционных рынков спрос на аммиак может к 2030 г. составить 205-223 Мт, а к 2050 г. – 184-334 Мт. Наиболее высокие оценки дают IRENA и AEA (2022).

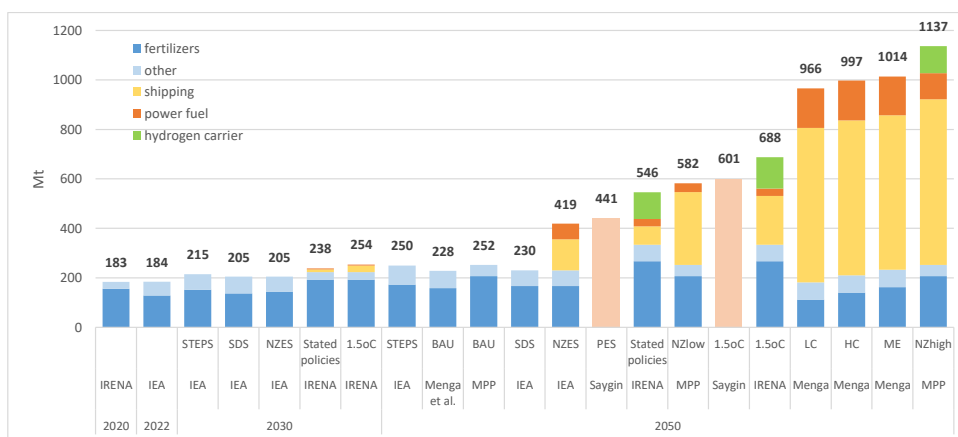


Рисунок 3. Прогнозы глобального потребления аммиака до 2050 года
Источники: IEA. 2021; IRENA и AEA (2022); MPP, 2022; Saygin, Gielen, 2021; Menga et al., 2023

Figure 3. Global ammonia use projections to 2050
Source: IEA. 2021; IRENA and AEA (2022); MPP, 2022; Saygin, Gielen, 2021; Menga et al., 2023

С учетом новых рынков аммиака объем его производства может в середине XXI века приблизиться к 1 млрд т (Argus Media, 2020). В части основных

нетрадиционных рынков использования аммиака рассматриваются использование в качестве топлива для судов и электростанций и в качестве носителя водорода. К 2030 г. эти рынки только начинают формироваться, достигая в сценариях IRENA и AEA 11-27 млн т для судового топлива и 4 млн т для электростанций. К 2050 г. новые рынки могут стать доминирующими. Рынок аммиака как топлива для электростанций может вырасти до 30-160 млн т (верхняя граница дана в Menga et al., 2023). МЭА оценивает масштабы использования на электростанциях (совместное сжигание с углем) в 2050 г. на уровне 60 млн т в сценарии *Устойчивое развитие* и 85 млн т в сценарии *Нетто-нулевые выбросы*. Самым значительным – 74-670 Мт – может стать рынок судового топлива. Сейчас на эти нужды используется заметно меньше 1% аммиака (IRENA и AEA, 2022). Но в отношении масштабов именно этого рынка неопределенность крайне высока. МЭА оценивает рынок судового топлива в 125 млн т в сценарии *Устойчивое развитие* и в 240 млн т в сценарии *Нетто-нулевые выбросы*. В сценарии 1.5°C IRENA и AEA дана оценка 197 млн т. Самые высокие оценки даны в сценариях Menga et al. (2023).

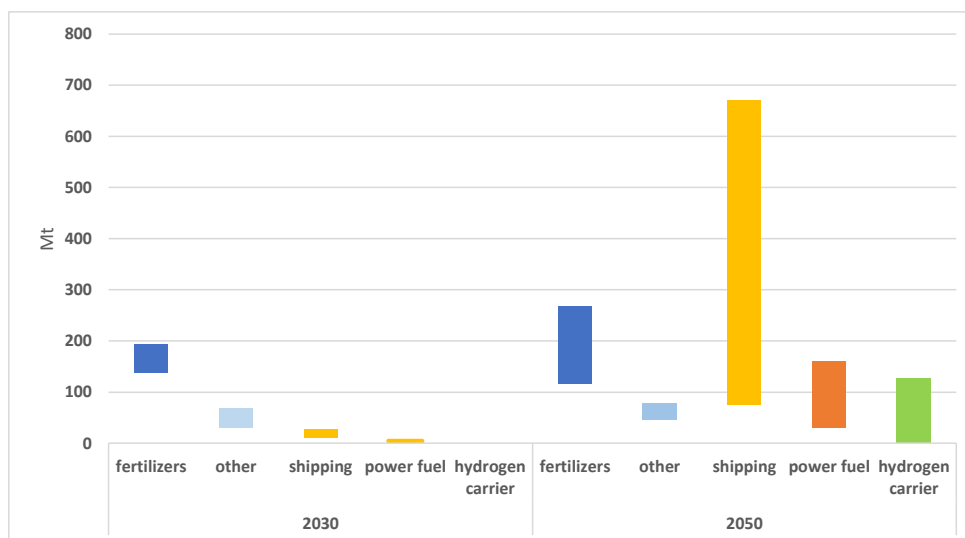


Рисунок 4. Диапазоны прогнозов масштабов отдельных рынков аммиака

Источники: построено по данным рис. 3

Figure 4. Scales of some ammonia markets: projection range

Source: based on data from Figure 3

Рынок аммиака как носителя водорода может к середине века достичь 108-127 млн т. Такие оценки приведены в сценариях IRENA и AEA (2022) – 108-127 млн т и MPP (2022) – 110 млн т. В итоге технологические цепочки и картина рынка аммиака в середине века могут заметно отличаться от нынешней. Привлекательность использования аммиака в качестве носителя водорода объясняется высокой эффективностью синтеза аммиака и его последующего разделения на водород и азот. В расчете на 1 кВт-ч можно получить 0.0197 кг водорода и с учетом потерь во всех звеньях преобразова-

ний (из водорода в аммиак и затем из аммиака в водород) получить на выходе 0.0146 кг водорода (эффективность цикла 74%) (Saygin et al., 2023).

Возможным и неожиданным направлением развития аммиачной промышленности мира является ее децентрализация и организация производства азотных удобрений по месту их использования с применением небольших модульных технологий в масштабах фермы на базе солнечной агроэлектрической системы при наличии дешевой энергии от ВИЭ. Это снижает уязвимость от волатильности цен на ископаемое топливо, упрощает цепочки поставок и исключает расходы на транспорт. Принимая во внимание эти факторы, уже к 2030 году децентрализованное производство аммиака может достичь паритета по затратам с централизованным для объемов его производства, равных 96% от нынешнего мирового спроса. Это может стать революцией в отрасли производства удобрений и решить проблемы в регионах, сталкивающихся с нехваткой продовольствия (Tonelli et al., 2024).

Объемы производства низкоуглеродного аммиака и необходимые условия их наращивания

Пять цветов палитры аммиака включают: *серый, голубой, зеленый, желтый и бирюзовый*. Цветовая терминология в части окраски аммиака в зависимости от технологии его производства еще не полностью устоялась. Под *серым* понимают производство аммиака по традиционной технологии с высоким углеродным следом. Иногда традиционные технологии производства аммиака называют коричневыми (Argus Media, 2020). *Голубой* аммиак – производство на основе паровой конверсии метана с CCS. *Зеленый* – производство электролитического аммиака на базе безуглеродной электроэнергии. Иногда он разделяется на *зеленый-on-site* (с удельными выбросами CO₂/кВт-ч) для установки по производству водорода на месте производства аммиака) и *зеленый-grid* (Ausfelder et al., 2022) или *желтый* – производство электролитического аммиака на базе сетевой электроэнергии (со средним по энергосистеме удельным выбросом CO₂).⁶⁾ *Бирюзовый* – производство на основе пиролиза метана с CCS (American Bureau of Shipping, 2020).

Необходимые условия для обеспечения кратного роста рынка аммиака включают: прогресс в развитии и коммерциализации технологий производства аммиака на основе электролиза и с применением CCUS; рост цен на углерод при снижении затрат на производство аммиака на базе безуглеродных технологий; масштабное развитие генерации «зеленой» электроэнергии, мощностей электролизеров, транспортной инфраструктуры и систем хранения CO₂, а в конечном счете – способность привлекать инвестиции на формирование всех этих необходимых условий. Анализ перспектив развития технологической структуры производства аммиака до 2050 года показывает (рис. 5), что объемы производства на базе нынешних технологий в сценариях

⁶⁾ Паритет по выбросам CO₂ с зеленым аммиаком достигается при удельных выбросах от сетевой электроэнергии около 150 гCO₂/кВт-ч.

BAU и уже принятых мер политики не превысят 271 млн т в 2040 г. (в сценарии IRENA 1.5°C) и 192 млн т к 2050 г. (в сценарии BAU MPP). Базой для декарбонизации судоходства, электро- и водородной энергетики является обеспечение конкурентоспособности низкоуглеродных технологий производства аммиака (American Bureau of Shipping, 2020). Объемы производства аммиака на базе технологии паровой конверсии метана с CCS достигают 5-36 млн т в 2030 г., 13-136 млн т в 2040 г. и 13-154 млн т в 2050 г. (рис. 6). Предполагается использовать технологию CCS в процессах газификации угля в масштабах 2-21 млн т в 2030 г., 1-21 млн т в 2040 г. и до 1 млн т в 2050 г. В работе Saygin and Gielen (2021) заложена возможность наращивания производства аммиака на основе биомассы в объеме 162 млн т в 2050 г. Технология пиролиза играет ограниченную роль: 2-7 млн т в 2040 г. и 5-15 млн т в 2050 г.

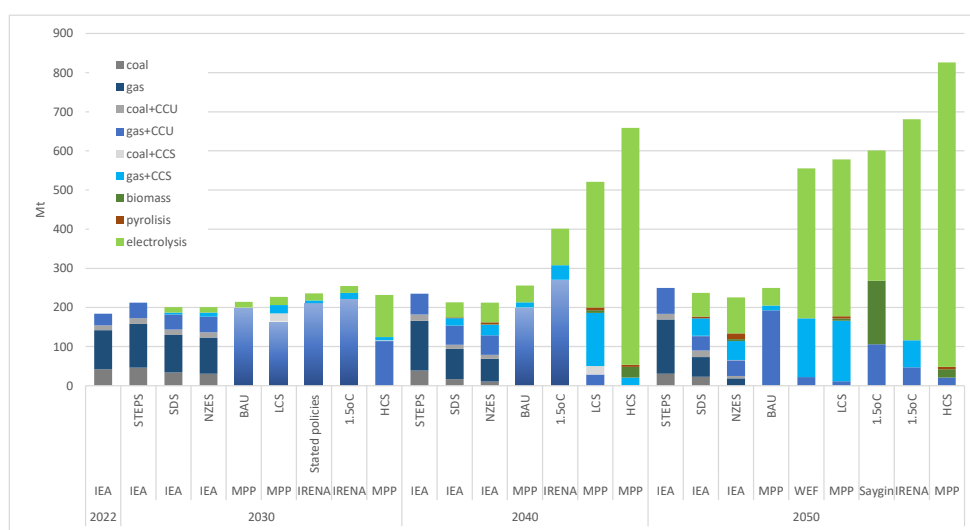


Рисунок 5. Сценарные прогнозы технологической структуры глобального производства аммиака до 2050 года
Источники: IEA, 2021; IRENA и AEA (2022); MPP, 2022; Saygin, Gielen, 2021; Menga et al., 2023

Figure 5. Scenario projections of global ammonia production technologies to 2050
Source: IEA, 2021; IRENA and AEA (2022); MPP, 2022; Saygin, Gielen, 2021; Menga et al., 2023

Перед отраслью стоят две задачи: первая – декарбонизация производства аммиака, потребляемого на традиционных рынках, вторая – заметное масштабирование производства низкоуглеродного аммиака для обеспечения потребностей новых рынков. На поиск путей решения первой задачи нацелены сценарии МЭА, а второй – IRENA и AEA, MPP, WEF, Saygin and Gielen. Технология гидролиза играет важную роль в декарбонизации традиционных рынков аммиака и ключевую – в декарбонизации экономики. В первом случае масштабы ее использования растут до 14-21 млн т аммиака в 2030 г., 38-50 млн т в 2040 г. и 45-92 млн т в 2050 г. Во втором случае – до 18-107 млн т в 2030 г.,

93-605 млн т в 2040 г. и 333-778 млн т в 2050 г. Для решения первой задачи уже к 2030 г. должны работать 40-140 заводов по технологии производства «зеленого» аммиака и 15-25 заводов по производству «голубого» аммиака (МРР, 2022). Необходимо, чтобы уже к 2025 г. до 15 заводов были оснащены системами CCS для захвата до 12 млн т/год CO₂ технологических выбросов с высоким уровнем концентрации⁷⁾ и чтобы несколько заводов были оснащены установками электролиза. К 2030 г. уже 15-25 заводов должны быть оснащены системами CCS, а производство «зеленого» аммиака как минимум на 30 заводах должно превысить 14 млн т.⁸⁾ Уровень готовности этих технологий довольно высок – 8-9 (коммерческая демонстрация, полномасштабное внедрение в окончательном виде и коммерческая эксплуатация, требующая эволюционных улучшений для повышения конкурентоспособности). Коммерческое использование технологии гидролиза имело место еще в 1960-х годах. Ожидается, что на имеющихся и объявленных проектах к 2030 г. будет производиться около 4 млн т (IEA, 2021). Технология пиролиза метана находится в стадии демонстрации, а технологии на базе газификации биомассы – на стадии крупных прототипов (IEA, 2021).

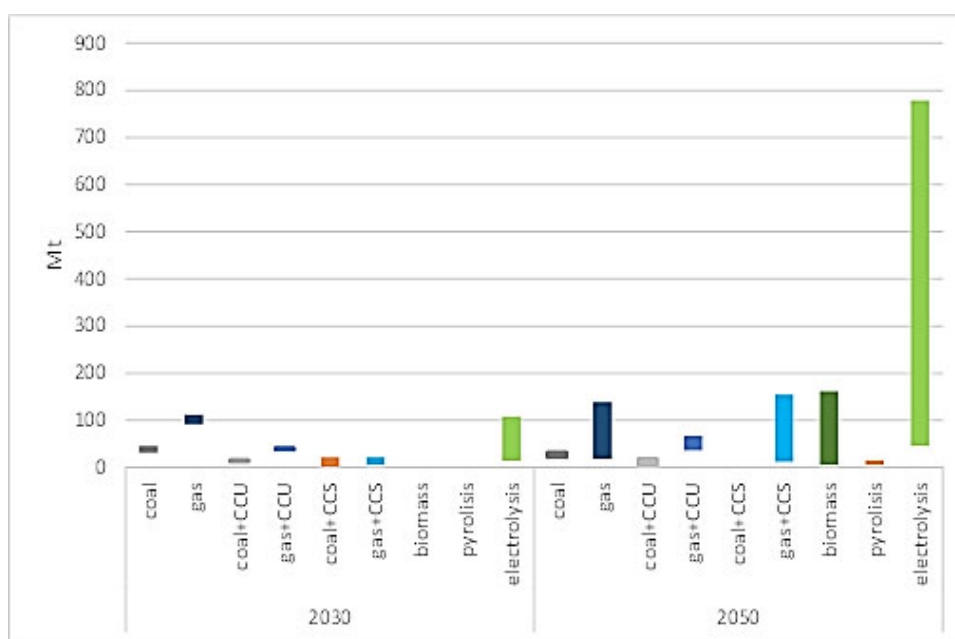


Рисунок 6. Диапазоны прогнозов масштабов производства аммиака по разным технологиям и уровень их готовности

Источники: построено по источникам к рис. 5

Figure 6. Ammonia production technologies: scales and maturity projection range

Source: based on sources to Figure 5

⁷⁾ На уже имеющихся и объявленных проектах ожидается захват в объеме 4 млн тCO₂ (IEA, 2021).

⁸⁾ Перечень реализуемых и планируемых проектов приведен в IRENA и AEA (2022).

Суммарные капитальные вложения до 2050 г., необходимые для решения первой задачи, составляют 400-500 млрд долл. (рис. 7). Их основная часть направляется на наращивание производства «голубого» и «зеленого» аммиака. По мере движения к 2050 г. доля последних растет. Эти капитальные вложения достигают пика в 2030-х годах на уровне 23-25 млрд долл. Это обеспечивает своевременное решение задачи декарбонизации отрасли. В 2040-х годах они составляют только половину от уровней 2030-х годов (IEA, 2021). Срок службы оборудования азотного завода составляет около 50 лет. Средний срок службы заводов в мире равен 25 годам (без Китая – 29 годам), а в ЕС – 40 годам (IEA, 2021). К 2050 г. основная часть мощностей подлежит замене. Эта замена может и должна производиться на низкоуглеродной основе. Отмена бесплатной выдачи квот на выбросы в ЕСТ и введение механизма СВМ делают такую модернизацию императивом. Поэтому вероятность мобилизации капитала на решение первой задачи можно оценить как высокую.

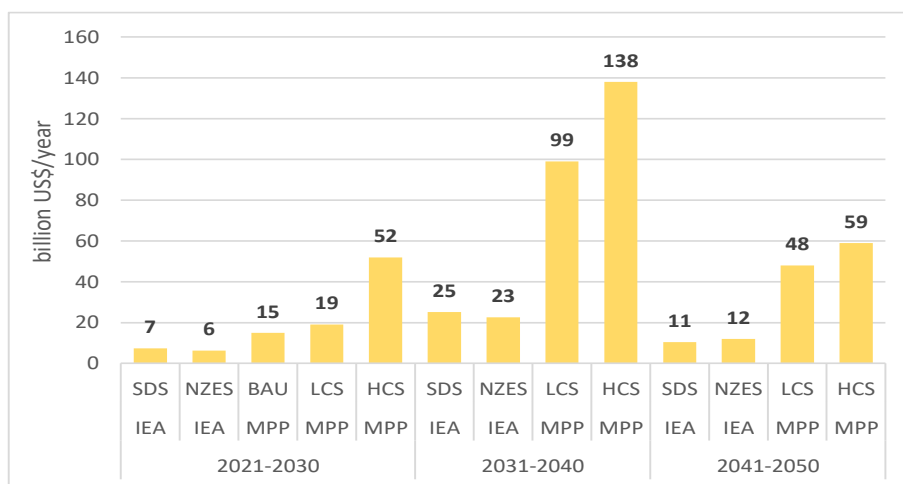


Рисунок 7. Средние годовые инвестиции в производство аммиака по десятилетиям до 2050 года

Источники: построено по источникам к рис. 5

Figure 7. Average annual investment in ammonia production to 2050 by decades

Source: based on sources to Figure 5

Дополнительные суммарные капитальные вложения до 2050 г., необходимые для решения второй задачи, составляют 360-2500 млрд долл. Их основная часть направляется на кратное масштабирование производства электролитического аммиака для декарбонизации судоходства, электроэнергетики и развития водородной энергетики. При различии в масштабах временной профиль динамики инвестиций сходный – пик достигается в 2030-х годах. Сравнительно низкая норма прибыли в отрасли и высокие цены привлечения капитала делают мобилизацию инвестиций в масштабах, необходимых для решения второй задачи, проблематичной.⁹⁾

⁹⁾ Ammonia industry net-zero tracker – Net-Zero Industry Tracker 2023 | World Economic Forum.

Важным условием решения обеих задач является создание и масштабирование необходимой инфраструктуры: сотни ГВт мощности электролизеров; сотни млрд кВт-ч генерации безуглеродной электроэнергии и системы CCS мощностью в десятки МтCO₂ (рис. 8). Для производства требуемого объема низкоуглеродного аммиака необходимы следующие мощности электролизеров:

- для решения первой задачи – 110 ГВт к 2050 г.;
- для решения второй задачи – 70-210 ГВт к 2030 г. и 447-1500 ГВт к 2050 г.

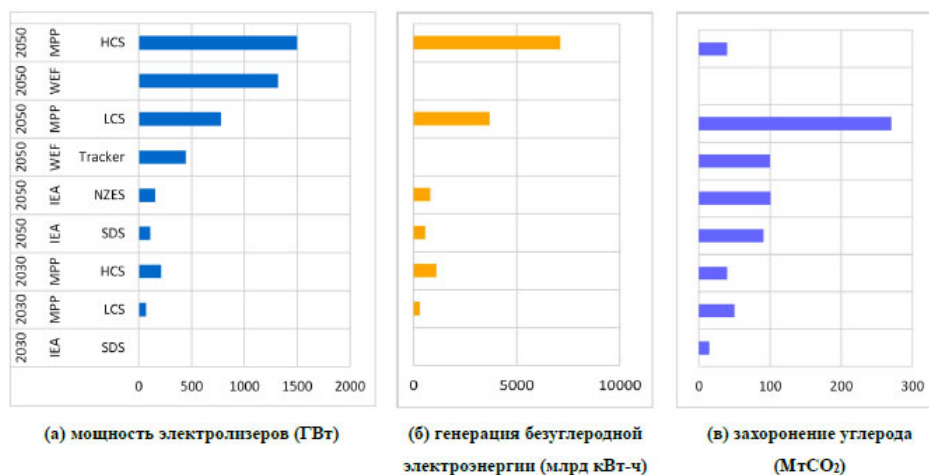


Рисунок 8. Прогнозные оценки необходимых масштабов развития инфраструктуры для производства низкоуглеродного аммиака
Источники: построено по источникам к рис. 5

Figure 8. Projected infrastructure development needs for low carbon ammonia production
Source: based on sources to Figure 5

Для обеспечения работы электролизеров необходимо достичь следующих показателей выработки безуглеродной электроэнергии:

- для решения первой задачи – 570 млрд кВт-ч к 2050 г.;
- для решения второй задачи – 300-1100 млрд кВт-ч к 2030 г. и 3700-7100 млрд кВт-ч к 2050 г.¹⁰⁾ (15-30% от объема глобальной выработки электроэнергии в 2023 г. (IEA, 2024).

Для производства необходимого объема «голубого» аммиака необходимы следующие мощности систем CCS:

- для решения первой задачи – 15 МтCO₂ к 2030 г. и 90 МтCO₂ к 2050 г.;
- для решения второй задачи – 40-50т МтCO₂ к 2030 г. и 40-270 МтCO₂ к 2050 г. Чем выше доля производства «зеленого» аммиака, тем ниже потребность в мощностях систем CCS.

¹⁰⁾ Производство «зеленого» аммиака требует в 25 раз больше электроэнергии, чем «голубого». Согласно оценкам, около 90% возобновляемой электроэнергии, используемой в химической промышленности в 2050 г., будет использоваться для производства зеленого водорода, большая часть которого (>98%) будет использоваться в качестве сырья для производства аммиака и метанола (Menga et al., 2023).

Хотя рост затрат на производство низкоуглеродного аммиака остается вызовом для декарбонизации отрасли, ожидаемый в 2030 г. и 2050 г. диапазон приведенных затрат на производство аммиака по любой технологии остается в пределах диапазона «естественной» эволюции цен, верхняя граница которого резко выросла в 2022 г. из-за взлета цен на газ. В период 2000-2015 гг. (в 2008 г.) цена зашкаливала за 700 долл./т (Beckman and Riche, 2015), на протяжении нескольких месяцев в 2012 г. – за 500 долл./т, на протяжении долгого времени в 2011-2014 гг. цена превышала 400 долл./т (Fasihi et al., 2021). В 2017-2020 гг. верхняя граница диапазона цен аммиака на региональных рынках не превышала 380 долл./т.¹¹⁾ В 2021-2023 гг. цены на аммиак в порту Тампа (Флорида, США) на протяжении 19 месяцев превышали 600 долл./т.¹²⁾ В 2022 г. пиковое значение цен на отдельных региональных рынках достигало 1720 долл./т. Приведенные затраты на производство аммиака (LCOA) по любой из представленных на рис. 9 технологий с большим запасом укладываются в этот предел.

Переход на производство аммиака с низким уровнем выбросов увеличивает средневзвешенную приведенную стоимость производства аммиака на 13-41% в 2030 г. относительно BAU, но к концу 2040-х годов ценовая премия на аммиак сводится к нулю (MPP, 2022). Для оптимизации затрат на декарбонизацию отрасли она может начаться с переходных технологий с низкими LCOA – технология модернизации традиционных предприятий с установкой электролизеров ограниченной мощности, производящих примерно 10% зеленого водорода, подаваемого в смеси на установки синтеза аммиака, и технология с применением CCS только для высококонцентрированных технологических выбросов. До 2030 г. эти технологии имеют наиболее низкие LCOA (рис. 9). Накопление опыта их использования позволит более уверенно реализовывать масштабные проекты в последующие десятилетия. Ближе к 2050 г. полномасштабные проекты по производству «голубого» и «зеленого» аммиака становятся конкурентоспособными с «серыми» и переходными технологиями (Ausfelder et al., 2022; Egerer et al., 2023; Fasihi et al., 2021; IEA, 2021; MPP, 2022).

В 2023 г. в ценах аммиака практически всех мировых производителей отсутствовала цена углерода. Каждые 10 долл./тCO₂ цены на углерод приводят к удорожанию аммиака на базе паровой конверсии метана на 19 долл./т, а на базе газификации угля – примерно на 50 долл./т. Поэтому при высоких ценах на углерод «серые» технологии теряют конкурентоспособность. Повышение цен на газ в ЕС в 2022 г. до 1156 долл./1000 м³ на время уже сделало «зеленый» аммиак привлекательной опцией на этом рынке. Более высокие цены на газ в декабре 2023 г. по сравнению с диапазоном 2017-2020 гг. создали эффект, аналогичный введению цены на углерод в размере 110 долл./тCO₂, и привели к

¹¹⁾ Yara International, S&P Rating report 7 December 2022.

¹²⁾ [imgurl:https://www.dtnpf.com/mydtn-public-core-portlet/servlet/GetStoredImage?symbolicName=2023v17-fertecon-fertilizer.png&category=CMS - Search \(bing.com\)](https://www.dtnpf.com/mydtn-public-core-portlet/servlet/GetStoredImage?symbolicName=2023v17-fertecon-fertilizer.png&category=CMS - Search (bing.com)).

дрейфу диапазона LCOA для «серого» аммиака вплотную к зоне для «голубого» и «зеленого» (рис. 9).

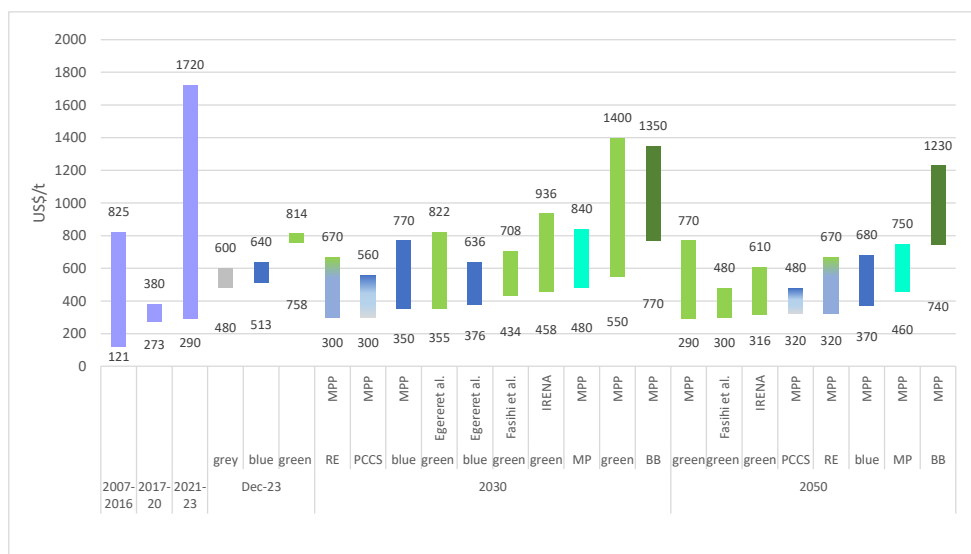


Рисунок 9. Приведенные затраты на производство аммиака по разным технологиям и сценариям

* диапазоны в основном определяются разными условиями производства аммиака в разных регионах мира

** RE – модернизация предприятия с установкой электролизера, производящего примерно 10% «зеленого» водорода для установки синтеза; PCCS – применение CCS только для технологических выбросов; MP – пиролиз метана; BB – производство аммиака на базе газификации биомассы

Источники: Ретроспективные данные – Yara International, S&P Rating report 7 December 2022; Interactive: Ammonia price chart (plattslive.com): [imgurl:https://www.dtnpf.com/mydtn-public-core-portlet/servlet/GetStoredImage?symbolicName=2023v17-fertecon-fertilizer.png&category=CMS-Search\(bing.com\)](https://www.dtnpf.com/mydtn-public-core-portlet/servlet/GetStoredImage?symbolicName=2023v17-fertecon-fertilizer.png&category=CMS-Search(bing.com)); перспективные данные – IRENA и AEA (2022); MPP, 2022; Fasihi et al., 2021; Egerer et al., 2023

Figure 9. Levelized costs of ammonia production by technologies and scenarios

* the ranges are basically determined by different ammonia production conditions in different world regions

** RE – plant upgrade to install an electrolyzer to produce some 10% of green hydrogen for the synthesis unit; PCCS – CCS use for process emissions only; MP – methane pyrolysis; BB – ammonia production based on biomass gasification

Source: Historical data – Yara International, S&P Rating report 7 December 2022; Interactive: Ammonia price chart (plattslive.com): [imgurl:https://www.dtnpf.com/mydtn-public-core-portlet/servlet/GetStoredImage?symbolicName=2023v17-fertecon-fertilizer.png&category=CMS-Search\(bing.com\)](https://www.dtnpf.com/mydtn-public-core-portlet/servlet/GetStoredImage?symbolicName=2023v17-fertecon-fertilizer.png&category=CMS-Search(bing.com)); Perspective data – IRENA и AEA (2022); MPP, 2022; Fasihi et al., 2021; Egerer et al., 2023

Производство «голубого» аммиака может постепенно смещаться в Россию и США, а «зеленого» – в сторону регионов с большим потенциалом дешевых ВИЭ. Россия на рынке «зеленого» аммиака не имеет рыночных преимуществ. В разных регионах мира существует и сохранится на перспективу значительный разброс LCOA для каждой из технологий. Это определяется наличием дешевых ресурсов природного газа или ВИЭ. Снижение затрат на производство «зеленого» аммиака прогнозируется во всех регионах мира, но

заметная разница в LCOA сохраняется (Fasihi et al., 2021). Эта разница и стоимость транспортировки аммиака будут определять региональные сдвиги в его производстве.

По мере обучения и совершенствования низкоуглеродных технологий, а также повышения цен на углерод, низкоуглеродный аммиак сначала выходит на ценовой паритет с «серым», а затем становится более экономически привлекательным вариантом. Если потенциал рынка аммиака в 2050 г. ограничен 250-270 млн т, то замыкающие затраты на производство «зеленого» аммиака на основе оптимизированных по стоимости гибридных фотоэлектрических и ветровых электростанций снижаются с 550 долл./т в 2020 г. до 300 долл./т к 2050 г. и слабо зависят от масштабов рынка, даже если он достигнет 1 млрд т. Одна лишь низкая стоимость электроэнергии еще не решает проблемы. Важным условием является существенное снижение затрат на электролизеры (IEA, 2021).

При отсутствии цен на углерод «зеленый» аммиак выходит на ценовой паритет с «серым» к 2050 г. при цене газа 6-8 долл./МБТЕ, или 210-280 долл./1000 м³. В 2020 г. для этого нужна была цена газа не ниже 540 долл./1000 м³. На время на многих рынках этот уровень был превышен: в 2022 г. в ЕС средняя цена составила 1156 долл./1000 м³, а в Японии – 569 долл./1000 м³. В 2030 г. для выхода на паритет при отсутствии цены на углерод нужна цена газа 400-500 долл./1000 м³, а при цене углерода 75 долл./тCO₂ – 180-290 долл./1000 м³. В сценарии STEPS МЭА дает цены на газ на разных региональных рынках (без США) на 2030 г. в диапазоне 247-337 долл./1000 м³, а на 2050 г. – 254-280 долл./1000 м³. В этой ценовой зоне «зеленый» аммиак в 2050 г. конкурентоспособен даже при отсутствии цены на углерод. На нишевых рынках «зеленый» аммиак может стать конкурентоспособным уже к 2030 г. (Fasihi et al., 2021). Для окупаемости затрат в системы CCS нужна цена на углерод 30 долл./тCO₂ (IEA, 2021).

Перспективная динамика выбросов ПГ от производства аммиака

Согласно имеющимся прогнозам, в сценариях с действующими мерами политики выбросы ПГ от производства аммиака могут немного вырасти до 2030 г., а затем немного сократятся к 2050 г. В сценариях с дополнительными мерами политики выбросы могут сократиться в 3-4 раза к 2050 г., а в сценариях декарбонизации – по меньшей мере на порядок. Исследований по декарбонизации мирового производства аммиака довольно много, но лишь в немногих даны оценки перспективной динамики выбросов ПГ от производства аммиака до 2050 г. В других исследованиях в основном приводятся оценки удельных выбросов.

МЭА (IEA, 2021) рассматривает три сценария:

- *STEPS* (реализация только действующих мер политики);
- *SDS* (устойчивое развитие с реализацией значимого пакета дополнительных мер политики);

- *NZE* (сценарий выхода на углеродную нейтральность к 2050 г.).

В сценарии *STEPS* возможен небольшой рост выбросов CO_2 до 2030 г., когда они выходят на пик с последующим снижением. Даже в этом сценарии выбросы в 2050 г. ниже уровня ковидного 2020 г. В двух прочих сценариях выбросы снижаются: почти вчетверо в сценарии *SDS* и более чем в 20 раз в сценарии *NZE*. В сценарии *SDS* углеродоемкость производства аммиака снижается на 78% к 2050 г. за счет использования технологий электролиза и *CCS*. Они используются в еще больших масштабах в сценарии *NZE*, где углеродоемкость падает на 96%.

По прогнозу *Mission Possible Partnership*, к 2050 г. выбросы, связанные с производством аммиака, могут быть сокращены на 92-99% относительно уровня 2020 г. В этой работе (MPP, 2022) рассмотрены три сценария декарбонизации отрасли с говорящими названиями:

- *Business-as-usual scenario* (отсутствие какого-либо давления на производителей в сторону декарбонизации);
- *Lowest Cost scenario* (выход на объем углеродного бюджета, соответствующего сценарию ограничения потепления уровнем 1.5°C с наименьшими затратами); и
- *Fastest Abatement scenario* (выход на объем углеродного бюджета с максимально возможной скоростью).

В сценарии *BAU* выбросы остаются примерно на одном уровне до 2050 г. с небольшим трендом к снижению. В сценарии *Lowest Cost* выбросы несколько растут до 2030 г., затем падают ниже 100 млн tCO_2 к 2040 г., до примерно 50 млн tCO_2 к 2045 г. и остаются на этом уровне до 2050 г. В сценарии *Fastest Abatement* выбросы падают почти до нуля уже к 2037 г. Снижение выбросов на 50% от уровня 2020 г. наступает соответственно в 2037 г. и в 2033 г. Главным драйвером снижения выбросов является наращивание производства «зеленого» аммиака.

Потенциал снижения удельных расходов энергии на производство аммиака

Во всех работах по бенчмаркингу только на одном предприятии мира удельный расход энергии при производстве аммиака самый низкий – 23.5-23.8 ГДж/т. В практических целях *BAT*¹³⁾ можно принимать на уровне 26.7 ГДж/т. Международный опыт бенчмаркинга по удельным расходам энергии при производстве аммиака ограничен. Имеется только несколько работ, основная часть которых выполнена до 2014 г. На середину 1990-х годов на основе бенчмаркинга предприятий разных стран *BAT* составил немногим менее 30 ГДж/т,

¹³⁾ Best available technology – наилучшая из имеющихся на рынке технологий. Показатель *BAT* определяется либо равным показателю самой эффективной из имеющихся на рынке технологий, либо значению для технологии, которая замыкает 10% суммарного выпуска продукции на кривой бенчмаркинга. Эта кривая ранжирует объемы производства по удельному показателю (например, энергоёмкость или удельные выбросы ПГ).

а разрыв между BAT и худшим показателем был почти двукратный (Phylipsen et al., 2022).

International Fertilizer Industry Association (IFA) в 2008 г. провела бенчмаркинг по уровню энергоемкости по выборке из 93 предприятий из 33 стран (Tavares et al., 2013). Производственные мощности проанализированных заводов по производству аммиака варьировали от 91 до 750 тыс. т/год. Именно в этой работе был определен самый низкий уровень BAT – 23.8 ГДж/т, но только для одного предприятия. Следующее за ним предприятие уже имело удельный расход энергии 28 ГДж/т, а самое высокое значение в выборке составило 51.9 ГДж/т, что в 2.2 раза выше BAT. Эта работа также показала, что:

- BAT для малых, средних и крупных предприятий довольно близки, но кривые распределения заметно отличаются: для средних предприятий кривая проходит выше, чем для крупных, а для малых – заметно выше, чем для средних;

- лучшие уровни для новых заводов мало отличаются от лучших уровней для средних и возрастных. Кривая для новых заводов почти совпадает с кривой для старых, что лишний раз свидетельствует о стагнации процесса повышения энергоэффективности. Кривая для средневозрастных заводов проходит выше. По-видимому, это результат того, что в то время строились заводы средней мощности.

В работе Ecofys (2009) построена кривая для стран ЕС по данным за 2007-2008 гг. и определено, что для лучшего предприятия удельный расход энергии равен 27.6 ГДж/т, среднее значение для 10% лучших предприятий – 28.7 ГДж/т, а среднее для всех – 35.7 ГДж/т. В работе UNIDO со ссылкой на IFA показано еще несколько кривых бенчмаркинга. На правых кривых BAT находится в диапазоне 23.5-27 ГДж/т, а самый высокий уровень равен 60 ГДж/т. В рамках этой работы была сформирована кривая бенчмаркинга для Египта для 2012 г. BAT на этой кривой равен 26.68 ГДж/т, а худший показатель – 57.33 ГДж/т. В исследовании для Канады самый низкий удельный расход энергии за 2002 г. составил 29.7 ГДж/т, а самый высокий – 42.3 ГДж/т (Canadian Industry Program for Energy Conservation, 2008). В этой работе указано, что для предприятия, замыкающего лучшие 10% в мире, значение в начале века равнялось 36.6 ГДж/т. В одной публикации утверждается, что минимальное значение удельного расхода энергии равно 15.4 ГДж/т (Karali et al., 2024).

Расходы энергии на производство аммиака разделяются на расходы топлива на технологические нужды (сырье), расходы топлива на сжигание для обеспечения высокотемпературных процессов производства водорода и синтеза аммиака и расходы электроэнергии, обеспечивающие работу компрессоров и других механизмов. Кроме того, в процессах утилизируется избыточное тепло, которое используется в других процессах, включая производство мочевины. Для обеспечения сопоставимости важно сравнивать потоки энергии в сходных границах процессов. В ряде публикаций указываются только расходы топлива; но для оценки удельного расхода энергии

важно также учитывать расходы электроэнергии. В сумме эти компоненты дают *валовый расход энергии*. Его коррекция на экспорт утилизируемого избыточного тепла за границы процесса позволяет оценить *нетто-расходы энергии*. Удельные расходы энергии существенно зависят от технологии производства, единичной мощности агрегата и возраста предприятия. Для современных предприятий они представлены в табл. 1 по составляющим.

Таблица 1. Удельные расходы энергии на производство аммиака (ГДж/т)

Table 1. Energy consumption for ammonia production (GJ/t)

Технология	Тип предприятия	Потенциал снижения	Валовый расход	Сырье	Топливо	ЭЭ* прочее	ЭЭ электролиз	Тепло	Нетто-расход
метан (SMR)	старый BAT		32.1	20.7	11.1	0.3		-4.8	27.3
	типовое предприятие		31.7	20.7	9.8				30.5
	новое предприятие	26.0	27.7	20.7	6.8				27.5
метан (ATR)***	новое предприятие	26.0	29.4	25.8	2.1	1.5			29.4
метан (SMR с CCS)	новое предприятие	29.0	32.9	20.7	11.2	1.0		-3.1	29.8
нафта	типовое предприятие	29.0	33.0						33.0
мазут	типовое предприятие	36.0	37.4	18.6	15.1	3.7		-1.3	36.1
уголь	BAT	38.6	38.6	18.6	15.1	4.9		2.6	41.2
уголь с CCS	BAT	26.0	30.6				30.6		30.6
гидролиз	BAT	26.0	30.0				30.0		30.0
пиролиз метана с CCS	BAT	46.0	54.3	42.0		12.3			54.3
биомасса	BAT	37.0	42.0						42.0

* ЭЭ-электроэнергия.

** Также дается значение -3.9.

*** Автотермический риформинг.

Источники: IRENA и AEA (2022); Sandalow et al., 2022; IEA, 2021; del Pozo, Cloete, 2022; Ausfelder et al., 2022; Saygin et al., 2023; UNIDO, 2014.

Согласно отдельным источникам, лучшие в мире значения удельных расходов энергии равны 23.5-23.8 ГДж/т аммиака (UNIDO, 2014), хотя в литературе чаще упоминаются значения 27-29 ГДж/т. Оценка 27-29 ГДж/т была дана еще в 2002 г. на основе данных на середину 1990-х годов (Phylipsen et al., 2002). С тех пор на протяжении четверти века она не менялась. МЭА в 2007 г. дало оценку 28 ГДж/т (IEA, 2007). Эта же оценка использована в работе Global Energy Assessment (IIASA, 2012). На близком уровне она остаётся и в последних публикациях (табл. 1). Оценки теоретического (термодинамического) минимума удельного расхода энергии, необходимого для производства аммиака, разнятся: IRENA и AEA (2022) оценивают его равным 22,5 ГДж/т, Worrell et al. (2008) – 19.2 ГДж/т, а IFA (2009) – примерно 19 ГДж/т.

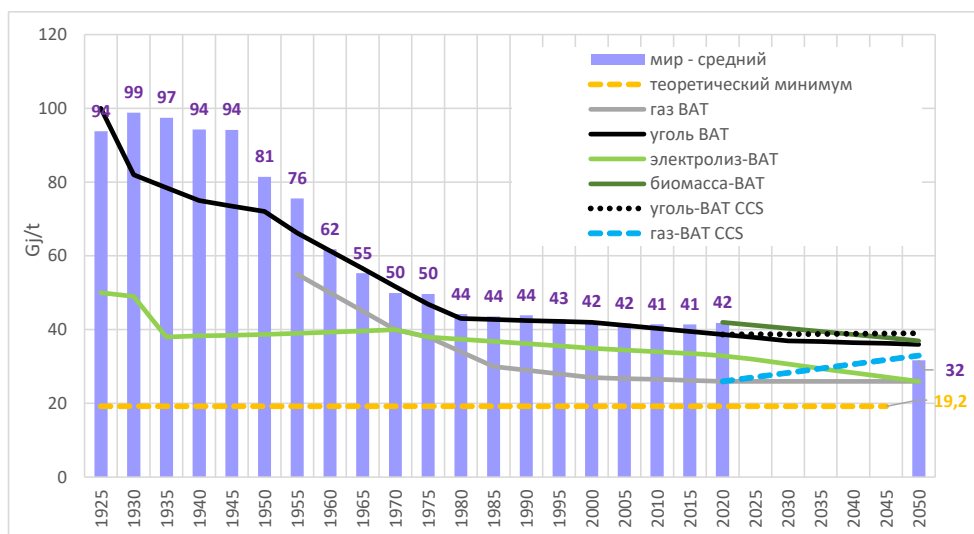


Рисунок 10. Удельные расходы энергии на производство аммиака
Источники: см. источники к табл. 1. Оценка значений на 2050 г. – IEA, 2021

Figure 10. Specific energy consumption for ammonia production
Source: see the source to Table 1. 2050 estimates – IEA, 2021

Потенциал снижения удельных расходов энергии в основном уже реализован в 1925-1980 гг. (рис. 10). После этого на протяжении четырех десятилетий удельные расходы энергии стагнировали. Оставшийся потенциал для каждой технологии сравнительно невелик – 7-12%. Он увеличивается при замене угля газом, но снижается при росте доли низкоуглеродных технологий (табл. 1). Для производства «голубого» аммиака (SMR+CCS) с улавливанием 90% CO₂ дополнительные потребности в тепле и электроэнергии составляют 2.5 ГДж/т и 0.4 ГДж/т. (Saygin et al., 2023). Для технологий гидролиза удельный расход энергии для BAT равен 30-36 ГДж/т, что выше уровня BAT для паровой конверсии метана. Для пиролиза и производства аммиака на базе газификации биомассы удельные расходы заметно выше.

Потенциал снижения удельных выбросов ПГ при производстве аммиака

Бенчмарки по удельным выбросам CO₂ при производстве аммиака в ЕС снижаются очень медленно. Они являются неотъемлемой частью двух механизмов регулирования выбросов: ЕСТ и СВМ. Для этих систем бенчмарк прямых выбросов CO₂ на 2021-2025 гг. установлен на уровне 1.57 тCO₂экв/т, что соответствует самому низкому уровню в ЕС на кривой бенчмаркинга, построенной по данным за 2016-2017 гг. Уровень бенчмарка, по данным за 2007-2008 гг., был установлен равным 1.61 тCO₂/т (Ecofys, 2009). В ETS на 2013-2020 гг. бенчмарк был установлен на более высоком уровне – 1.619 тCO₂экв/т. По данным за 2016-2017 гг., среднее значение удельных выбросов для предприятий, входя-

ших в 10% лучших, было равно 1.604 тCO₂экв/т, а для самого лучшего – 1.57 тCO₂экв/т. В среднем, по сравнению с уровнем, установленным для 2011 г., бенчмарк снижался только на 0.11% в год. То есть снижение углеродоемкости производства аммиака в ЕС в течение 10 лет практически стагнировало. Для достижения уровня 1.57 тCO₂экв/т необходима реализация проектов по повышению энергоэффективности, включая регенерацию водорода из продувочного газа, минимизацию потерь пара, повышение эффективности генератора, котла и печи (Elshishini, 2024). Достижение уровня BAT по технологическим выбросам (1.24 т CO₂/т) за счет максимального увеличения производства аммиака при замене катализаторов для повышения эффективности конверсии, рекуперации аммиака из продувочного газа, оптимизации условий эксплуатации реакторов позволяет снизить выбросы до 1.42 т CO₂/т (Elshishini, 2024). Согласно регулированию по СВМ, до конца 2024 г. у компаний-импортеров есть возможность выбора отчетности из трех вариантов:

- полная отчетность по новой методологии (метод ЕС);
- отчетность на основе эквивалентного метода (три варианта); или
- отчетность на основе вмененных значений по умолчанию (только до июля 2024 г., т.е. за четвертый квартал 2023 г. и первый и второй кварталы 2024 г.).

Установлены следующие вмененные значения для аммиака: прямые выбросы – 2.68 тCO₂/т аммиака; косвенные выбросы – 0.14 тCO₂/т; суммарные выбросы – 2.82 тCO₂/т. Они установлены на 3% ниже уровня предприятия с самыми высокими удельными выбросами в ЕС в 2016/17 гг. (рис. 11). В документе утверждается, что эти значения представляют собой средние «мировые» значения, взвешенные по объемам производства. Учитывая высокую долю Китая и Индии, в которых производство аммиака базируется на угле, это может быть и так. Начиная с 2026 г. будет применяться уже другой набор значений по умолчанию. При углеродоемкости электроэнергии 260 гCO₂/кВт-ч (среднее значение для ЕС) допустимый максимальный расход электроэнергии получается равным 538 кВт-ч.

Введение СВМ для аммиака сначала практически не дает преимуществ компаниям ЕС, поскольку разница в удельных выбросах с другими странами, использующими в качестве сырья в основном природный газ, невелика (рис. 11). В 2021 г. в ЕС бесплатно было выдано 78% квот на выбросы CO₂ от производства аммиака (EUROPEAN COMMISSION, 2023). Эта доля будет постепенно падать и сойдет на нет к 2032 г. Затем все производящие аммиак компании ЕС будут платить цену за 1 т на углерод в системе торговли квотами, умноженную на удельные выбросы соответствующего года. Все импортеры аммиака из других стран будут платить разницу в цене на углерод в ЕТС и на их внутреннем рынке, умноженную на углеродоемкость в стране происхождения аммиака (ЦЭНЭФ-XXI, 2021). В итоге аммиак на рынке ЕС подорожает на средневзвешенную углеродоемкость, умноженную на цену углерода. При цене углерода 100 евро/тCO₂ и при сохранении нынешней разности в средних уровнях углеродоемкости разница цен на аммиак, поставленный из США, Ближнего Востока или России, по сравнению с ценой аммиака,

произведенного в ЕС, не превысит 1-4 евро/т CO₂. Значимый негативный эффект получит только Китай (рис. 11).

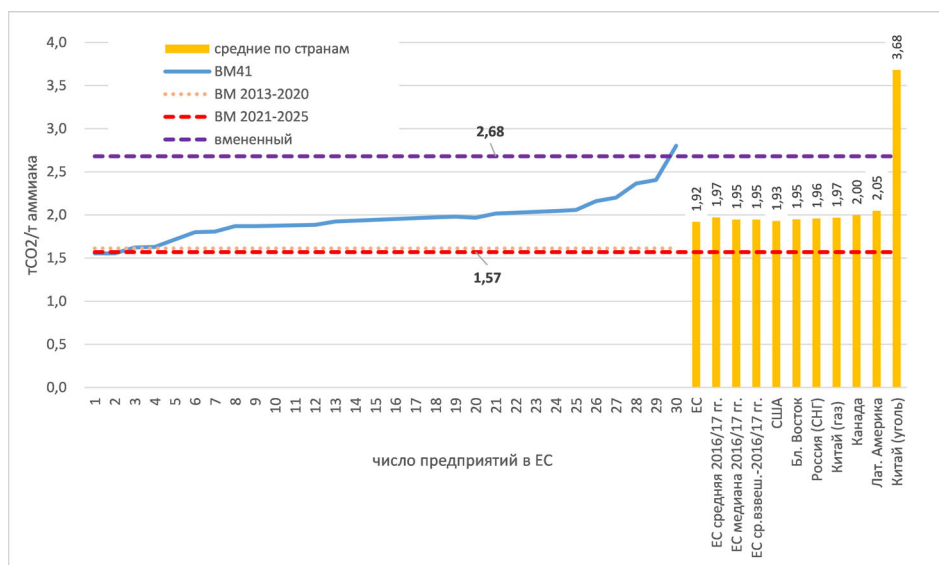


Рисунок 11. Уровни бенчмарков валовых выбросов CO₂ при производстве аммиака в ЕС и других странах

Источники: кривая бенчмаркинга и вмененные значения – EUROPEAN COMMISSION, 2023.

Значения для разных стран – FERTILIZERS EUROPE OVERVIEW, 2021/2022;

Fertilizer Canada, 2023

Figure 11. Gross CO₂ emission benchmarks for ammonia production in the EC and other countries

Source: benchmarking curve and embodied values – EUROPEAN COMMISSION, 2023. Values by countries – FERTILIZERS EUROPE OVERVIEW, 2021/2022;

Fertilizer Canada, 2023

В системе бенчмаркинга ЕС используется показатель валовых прямых выбросов CO₂ (*generated emissions*) от производства аммиака. Канада использует показатель нетто-выбросов с учетом стоков при производстве мочевины, закачки CO₂ в нефтяные пласты или использования в парниках (Fertilizer Canada, 2023). В среднем для Канады валовые выбросы в 2018-2020 гг. равны 2 тCO₂/т аммиака, использование на производство мочевины и другие цели составляет 0.76 тCO₂/т, а значит, средние нетто-выбросы равны 1.2 тCO₂/т. Минимальное значение для одного из предприятий Канады – 0.8 тCO₂/т. Средний уровень утилизации CO₂ в Канаде равен 61%, а для предприятий с самыми низкими нетто-выбросами – 89%. Сравнение результатов бенчмаркинга в Канаде в 2018-2020 гг. с результатами за 2000-2002 гг. показало отсутствие прогресса в снижении удельных выбросов. Специалисты Канады утверждают, что их страна имеет самые низкие нетто-выбросы. Однако сравнение данных по странам с данными на рис. 11 показывает, что для других стран используется показатель валовых выбросов, поэтому такой вывод неправомерен.

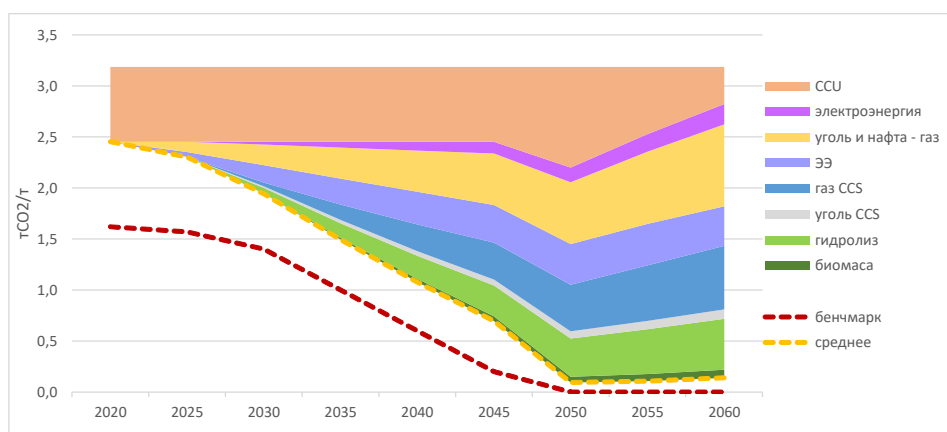
Оставшийся углеродный бюджет для мировой промышленности по производству аммиака оценен равным 11 ГтCO₂ (5-16 ГтCO₂) (MPP, 2022). По оценкам МЭА, если существующие заводы проработают до 2040 г., то кумулятивные выбросы составят 4.4 ГтCO₂, при продлении их службы на каждые 10 лет добавляется 3.6-3.7 ГтCO₂ (IEA, 2021). Таким образом, к 2060 г. углеродный бюджет будет полностью истощен только действующими предприятиями, а все новые предприятия должны вводиться по технологиям с околонулевыми выбросами ПГ.

Достижение углеродной нейтральности в аммиачной промышленности к 2050 г. означает постепенное снижение бенчмарка по выбросам CO₂ практически до нуля. Пропорции вкладов отдельных групп мер в снижение бенчмарка зависят от готовности технологий и их стоимости. Основными направлениями декарбонизации в аммиачной промышленности, как и в химической промышленности в целом (рис. 12), являются:

- управление спросом и повышение материальной эффективности – повышение эффективности использования продукции, которая изготавливается с применением аммиака (в первую очередь, азотных удобрений). Этот фактор позволяет снижать выбросы за счет снижения объемов производства, но не влияет на удельные выбросы. По оценкам МЭА, за счет этого фактора выбросы CO₂ могут быть снижены на значимые 21% (IEA, 2021). Другие источники дают более скромные оценки – до 4% (MPP, 2022);
- повышение энергоэффективности – приближение средних удельных расходов энергии к уровням Ват. Однако многие низкоуглеродные технологии имеют более высокие удельные расходы энергии (см. табл. 1), поэтому по мере роста их доли вклад этого фактора сначала стабилизируется, а затем сокращается (IEA, 2021);
- замена одних ископаемых топлив другими (угля, нефти и мазута – природным газом) дает не только снижение выбросов, но и значимое повышение энергоэффективности;
- рост масштабов применения технологии CCS. Захваченный высококонцентрированный углерод во многих случаях может использоваться в качестве сырья для производства мочевины, закачки в нефтяные пласты и др. Сложнее обстоит дело с захватом CO₂ от установок сжигания топлива;
- электрификация технологических процессов – гидролиз на базе сетевой или локально производимой безуглеродной электроэнергии, или электрокаталитическое восстановление (электрохимический Хабера-Боша может производить аммиак с меньшими затратами энергии и выбросами CO₂, Kyriakou et al., 2020). Процесс замены природного газа может происходить постепенно. Так, замена 15% природного газа «зеленым» водородом приводит к сокращению выбросов до 1.37 тCO₂/т (Elshishini, 2024). Эта опция имеет особенность: при полном переходе на безуглеродный электролиз пропадает сток CO₂ для произ-

водства мочевины (рис. 12). Для компенсации потерь нужен захват CO_2 в других процессах или секторах. Если же использование топлива сохраняется и захваченный углерод используется как сырье для мочевины на месте, то проблемы географического дисбаланса между CCS и CCU можно избежать;

- декарбонизация используемой электрической энергии для основных и вспомогательных процессов за счет ее поставок от безуглеродных источников, включая ВИЭ, ГЭС АЭС, а также от ТЭС, оснащенных системами CCUS;
- использование биомассы. Эти возможности ограничены объемами доступной биомассы ввиду конкуренции за посевные или лесные площади с другими сферами ее применения при высокой энергоемкости процессов;
- снижение выбросов ПГ при добыче, транспортировке топлива, другого сырья и готовой продукции.



* ЭЭ – энергоэффективность

Рисунок 12. Вклад отдельных факторов в снижение среднемировых выбросов CO_2 при производстве аммиака и возможная динамика уровня бенчмарка в ЕС

Источник: расчеты автора

Figure 12. Contributions from various factors to the reduction of average global CO_2 emissions from ammonia production and potential benchmark evolution in the EC

Source: estimated by the author

К 2050 г. бенчмарк по удельным выбросам CO_2 при производстве аммиака в ЕС может снизиться до нуля. За ним с запаздыванием примерно в 10 лет могут следовать и среднемировые удельные выбросы. Задача сводится к тому, чтобы снять удельные выбросы с мели стагнации, на которой они застряли в последние 40 лет, и повторить рывок в их снижении, отмеченный в 60-70-х годах XX века. Огромное множество комбинаций перечисленных выше факторов позволяет заметно снизить среднемировой удельный уровень выбросов CO_2 . На рис. 12 показана только одна из возможных комбинаций декарбониза-

ции аммиачной промышленности. Удельные выбросы снижаются до 0.1 тCO₂/т к 2050 г. и остаются на этом уровне. По оценкам МЭА, в сценариях STEPS, SDS и NZE средние по миру удельные выбросы CO₂ снижаются до 1.6; 0.5 и 0.1 тCO₂/т. В сценарии SDS это происходит на 12% за счет замены угля и жидких топлив газом и еще на 30% за счет совершенствования технологий, включая повышение энергоэффективности. В прогнозе ММР (2022) рассмотрены три сценария снижения удельных выбросов CO₂:

- базовый, в котором выбросы снижаются с исходного уровня 2.6 (охваты 1 и 2) до 1.8 тCO₂/т (на 17% за счет роста производства зеленого аммиака, на 12% за счет повышения энергоэффективности и замены угля и жидкого топлива на газ и на 2% за счет роста доли переходных технологий);
- сценарий с низкими издержками (LCS), в котором выбросы снижаются до 0.1 тCO₂/т, в т.ч. на 67% за счет роста производства «зеленого» аммиака; на 26% за счет роста производства «голубого»; на 3% за счет повышения энергоэффективности и замены угля и жидкого топлива на газ и на 1% за счет роста доли переходных технологий;
- сценарий с быстрым снижением выбросов (FAS), в котором выбросы снижаются до нуля, в т.ч. на 91% – за счет роста производства «зеленого» аммиака; на 1% – за счет роста производства «голубого»; на 3% – за счет повышения энергоэффективности и замены угля и жидкого топлива на газ; на 1% – за счет роста доли переходных технологий) и еще на 4% – за счет повышения материальной эффективности.

После перехода на полное приобретение квот на выбросы на аукционной основе в ЕСТ значимость бенчмарка для системы торговли квотами утрачивается, но она сохраняется для схемы CBAM и для схемы контрактов на разницу (CCfD). По данным IRENA, диапазоны удельных выбросов для природного газа равны 1.75-2.62 тCO₂/т (бенчмарк ЕС 1.57 тCO₂/т); для нефти и мазута – 2.54-3.33 тCO₂/т; для угля – 3.61-4.36 тCO₂/т; для топлива с CCS – 0.2-1.2 тCO₂/т; для пиролиза метана – 0.2-0.55 тCO₂/т; для электролиза – 0.16-0.83 тCO₂/т; для биомассы – 0.32-1.11 тCO₂/т (IRENA и AEA, 2022). В работе Ausfelder et al. (2022) ожидается снижение удельных выбросов в 2020-2050 гг. с 2 до 1.8 тCO₂/т для традиционной технологии паровой конверсии метана (при сохранении уровня 1.58 тCO₂/т для лучшей); с 0.8 до 0.6 тCO₂/т – для «голубого» аммиака; с 4.2 тCO₂/т до нуля – для «желтого»; с 1.3 тCO₂/т до нуля – для пиролиза метана и с 0.8 тCO₂/т до нуля – для «зеленого». В Sandalow et al. (2022) даны следующие значения BAT для удельных выбросов: 1.8 тCO₂/т – для паровой конверсии метана, 3.2 тCO₂/т – для газификации угля, 0.2 тCO₂/т – для газификации угля с CCS и 0.1 тCO₂/т – для паровой конверсии метана с CCS. Для технологии криогенной дистилляции удельные выбросы оценены в 1.73 тCO₂/т, адсорбции при переменном давлении – 0.3 тCO₂/т; для низкотемпературного электролиза – 0.22 тCO₂/т; высокотемпературного электролиза – 0.25 тCO₂/т; получения аммиака в качестве побочного продукта хлор-щелочных процессов – 0.37 тCO₂/т, или в качестве

побочного продукта на установках парового крекинга – 1.82 тCO₂/т (Liu et al., 2020).

Схема контрактов на разницу (CCfD) вводится в Германии для поддержки производства низкоуглеродных базовых материалов, включая производство аммиака (Lösch et al., 2022). В ее рамках для оценки снижения удельных выбросов за счет применения низкоуглеродных технологий используются базовые уровни удельных выбросов, которые приравниваются к бенчмаркам, установленным для схемы ЕСТ на момент заключения контракта. Контракты на разницу заключаются сроком на 15 лет, поэтому эта схема сохранится за пределами 2032 г. Наряду с СВММ она будет опираться на сохранение практики формирования бенчмарков.

Список литературы

ЦЭНЭФ-XXI (2021) *СВММ: последствия для российской экономики*, Москва, август 2021 г., URL: Cz_ENEF_XXI_CVAM_4c0a2fb4a3.pdf (cenef-xxi.ru).

Argus Media (2020) *Green shift to create 1 billion tonne 'green ammonia' market?* June 2020, URL: Argus White Paper – Green Ammonia.pdf (argusmedia.com).

American Bureau of Shipping (2020) *Sustainability whitepaper. Ammonia as marine fuel*, October 2020.

Ausfelder, F., Herrmann, E.O., López González, L.F. (2022) Perspective Europe 2030. Technology options for CO₂-emission reduction of hydrogen feedstock in ammonia production, *Dechema Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.*, January 2022, URL: Studie+ Ammoniak.pdf (dechema.de).

Beckman, J., Riche, S. (2015) Changes to the natural gas, corn, and fertilizers price relationships from the biofuels era, *Journal of Agricultural and Applied Economics*, vol. 47, pp. 494-509, doi:10.1017/aae.2015.22, URL: changes_to_the_natural_gas_corn_and_fertilizer_pri.pdf.

Canadian Industry Program for Energy Conservation (2008) *Canadian ammonia producers: benchmarking energy efficiency and carbon dioxide emissions*, Prepared for the Canadian Fertilizer Institute and Natural Resources Canada.

Crippa, M. et al. (2021) EDGAR v 6.0, Greenhouse Gas Emissions, *Eur. Comm. Jt. Res. Cent. [Dataset]*, doi: http://data.europa.eu/89h/97a67d67-c62e-4826-b873-9d972c4f670b.

Del Pozo, C.A., Cloete, S. (2022) Techno-economic assessment of blue and green ammonia as energy carriers in a low-carbon future, *Energy Conversion and Management*, vol. 255, 115312.

Ecofys (2009) *Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012*, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research and Öko-Institut Sector, report for the chemical industry, November 2009.

Egerer, J., Grimm, V., Niazmand, K., Runge, P. (2023) The economics of global green ammonia trade – Shipping Australian wind and sunshine to Germany, *Applied Energy*, vol. 334, 120662.

Elshishini, S. (2024) Product carbon footprint methodology for ammonia production by conventional steam reforming – A case study, *European Journal of Sustainable Development Research*, vol. 8 (1), em0241, URL: <https://doi.org/10.29333/ejosdr/13889>.

EUROPEAN COMMISSION, DIRECTORATE-GENERAL (2023) *Climate action. Directorate B European and international carbon markets. Update of benchmark values for the years 2021-2025 of phase 4 of the EU ETS Benchmark curves and key parameters*, Updated final version issued on 12 October 2021, URL: [policy_ets_allowances_bm_curve_factsheets_en.pdf](https://ec.europa.eu/economy_finance/policy_ets_allowances_bm_curve_factsheets_en.pdf) (europa.eu).

Fasihi, M., Weiss, R., Savolainen, J., Breyer, C. (2021) Global potential of green ammonia based on hybrid PV-wind power plants, *Applied Energy*, vol. 294, 116170.

Fertilizer Canada (2023) *Ammonia Production Greenhouse Gas Emissions Benchmarking*. October 2023, URL: [Nitrogen-Benchmarking-Report-Final.pdf](https://www.fertilizercanada.ca/Nitrogen-Benchmarking-Report-Final.pdf) (fertilizercanada.ca).

FERTILIZERS EUROPE OVERVIEW (2021/2022) Climate Policy, URL: [climate.pdf](https://www.fertilizerseurope.com/climate.pdf) (fertilizerseurope.com).

Glibert, P.M., Harrison, J.A., Heil, C.A., Seitzinger, S. (2006) Escalating Worldwide Use of Urea – A Global Change Contributing to Coastal Eutrophication, February 2006, *Biogeochemistry*, vol. 77 (3), pp. 441-463, doi: 10.1007/s10533-005-3070-5.

IEA (2007) *Tracking industrial energy efficiency and CO₂ emissions*, *Energy Indicators*.

IFA (2009) *Energy Efficiency and CO₂*, Paris, France, International Fertilizer Industry Association.

IEA (2021) *Ammonia Technology Roadmap. Towards more sustainable nitrogen fertiliser production*, October 2021.

IEA (2024) *Electricity 2024, Analysis and forecast to 2026*.

IIASA (2012) *Global Energy Assessment. Towards a Sustainable Future*, Cambridge University Press.

IRENA and AEA (2022) *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, Ammonia Energy Association, Brooklyn.

Karali, N., Khanna, N., Shah, N. (2024) *Climate Impact of Primary Plastic Production*, Lawrence Berkeley National Laboratory, April 2024, URL: <https://escholarship.org/uc/item/12s624vf>.

Kyriakou, V., Garagounis, I., Vourros, A., Vasileiou, E., Stoukides, M. (2020) *An Electrochemical Haber-Bosch Process*, Joule 4, pp. 142-158, January 15, Elsevier Inc., URL: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.10.006>.

Lösch, O., Eckstein, J., Friedrichsen, N., Richstein, J.C. (2022) *Carbon Contracts for Difference as essential instrument to decarbonize basic materials industries*, ECEEE summer study proceedings, September 2022, content (fraunhofer.de).

Liu, X., Elgowainy, A., Wang, M. (2020) Life cycle energy use and greenhouse gas emissions of ammonia production from 2 renewable resources and industrial by-products, *Green Chemistry*, Issue 17.

Menga, F., Wagner, A., Kremer, A.B., Kanazawa, D., Leung, J.J., Gault, P., Guan, M., Herrmann, S., Speelman, E., Sauter, P., Lingeswaran, S., Stuchtey, M.M., Hansen, K., Masanet, E., Serrenho, A.C., Ishii, N., Kikuchi, Y., Cullen, J.M. (2023) Planet-compatible pathways for transitioning the chemical industry, *PNAS*, vol. 120, no. 8, e2218294120, URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.2218294120>.

MPP (2022) *Making Net-Zero Ammonia Possible: An Industry-Backed, 1.5°C-Aligned Transition Strategy*, Mission Possible Partnership.

Pinto, R., Henriques, S., Brockway, P., Heun, M., Sousa, T. (2022) *The rise and stall of world electricity efficiency: 1900-2017, results and implications for the renewables transitions*, 15 March 2022, MPRA Paper, no. 112530, posted 23 Mar 2022 17:03 UTC, URL: <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/112530/>, а после 1971 – база данных МЭА.

Phylipsen, D., Blok, K., Worrell, E., de Beer, J. (2002) Benchmarking the energy efficiency of Dutch industry: an assessment of the expected effect on energy consumption and CO₂ emissions, *Energy Policy*, vol. 30, pp. 663-679.

Rouwenhorst, K.H.R., Travis, A.S., Lefferts, L. (2022) 1921-2021: A Century of Renewable Ammonia Synthesis, *Sustain. Chem.*, vol. 3, pp. 149-171, URL: <https://doi.org/10.3390/suschem3020011>.

The Royal Society (2020) *Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store*, POLICY BRIEFING, February 2020, URL: royalsociety.org.

Sandalow, D., Aines, R., Fan, Z., Friedmann, J., McCormick, C., Merz, A.-K., Scown, C. (2022) *Low-Carbon Ammonia Roadmap*, ICEF Innovation Roadmap Project, November 2022.

Saygin, D., Gielen, D. (2021) Zero-emission pathway for the global chemical and petrochemical sector, *Energies*, vol. 14 (13), 3772, doi:10.3390/en14133772.

Saygin, D., Blanco, H., Boshell, F., Cordonnier, J., Rouwenhorst, K., Lathwal, P., Gielen, D. (2023) The Role of Green Ammonia in Transitioning the Non-Energy Use of Natural Gas, *Sustainability*, vol. 15, 1623, URL: <https://doi.org/10.3390/su15021623>.

Tavares Flavio, Luciane, V., Monteiro, P.C., Mainier, Fernando B. (2013) Indicators of energy efficiency in ammonia productions plants, *American Journal of Engineering Research (AJER)*, vol. 02, Issue 07, pp. 116-123, URL: www.ajer.org.

Tonelli, D., Rosa, L., Gabrielli, P., Parente, A., Contino, F. (2023) Cost-competitive decentralized ammonia fertilizer production can increase food, *Nature Food*, vol. 5 (6), pp. 469-479, URL: <https://doi.org/10.1038/s43016-024-00979-y>.

UNIDO (2014) *Energy Efficiency*, Benchmarking Report for Fertilizer Sector.

Worrell, E., Price, L., Neelis, M., Galitsky, C., Nan, Z. (2008) *World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors*, Berkeley, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, URL: [World_Best_Practice_Energy_Intensity_Values_for_Se.pdf](#).

References

CENEF-XXI (2021) *SVAM: posledstviya dlya rossiyskoy ekonomiki* [SVAM: Consequences for the Russian Economy], August 2021, Moscow, Russia, URL: [Cz_ENEF_XXI_CBAM_4c0a2fb4a3.pdf](#) (cenef-xxi.ru).

Argus Media (2020) *Green shift to create 1 billion tonne 'green ammonia' market?* June 2020, URL: [Argus White Paper - Green Ammonia.pdf](#) (argusmedia.com).

American Bureau of Shipping (2020) *Sustainability whitepaper. Ammonia as marine fuel*, October 2020.

Ausfelder, F., Herrmann, E.O., López González, L.F. (2022) Perspective Europe 2030. Technology options for CO₂-emission reduction of hydrogen feedstock in ammonia production, *Dechema Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.*, January 2022, URL: [Studie+ Ammoniak.pdf](#) (dechema.de).

Beckman, J., Riche, S. (2015) Changes to the natural gas, corn, and fertilizers price relationships from the biofuels era, *Journal of Agricultural and Applied Economics*, vol. 47, pp. 494-509, doi:10.1017/aae.2015.22, URL: [changes_to_the_natural_gas_corn_and_fertilizer_pri.pdf](#).

Canadian Industry Program for Energy Conservation (2008) *Canadian ammonia producers: benchmarking energy efficiency and carbon dioxide emissions*, Prepared for the Canadian Fertilizer Institute and Natural Resources Canada.

Crippa, M. et al. (2021) EDGAR v 6.0, Greenhouse Gas Emissions, *Eur. Comm. Jt. Res. Cent.* [Dataset], doi: <http://data.europa.eu/89h/97a67d67-c62e-4826-b873-9d972c4f670b>.

Del Pozo, C.A., Cloete, S. (2022) Techno-economic assessment of blue and green ammonia as energy carriers in a low-carbon future, *Energy Conversion and Management*, vol. 255, 115312.

Ecofys (2009) *Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012*, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research and Öko-Institut Sector, report for the chemical industry, November 2009.

Egerer, J., Grimm, V., Niazmand, K., Runge, P. (2023) The economics of global green ammonia trade – Shipping Australian wind and sunshine to Germany, *Applied Energy*, vol. 334, 120662.

Elshishini, S. (2024) Product carbon footprint methodology for ammonia production by conventional steam reforming – A case study, *European Journal of Sustainable Development Research*, vol. 8 (1), em0241, URL: <https://doi.org/10.29333/ejosdr/13889>.

EUROPEAN COMMISSION, DIRECTORATE-GENERAL (2023) *Climate action. Directorate B European and international carbon markets. Update of benchmark values for the years 2021-2025 of phase 4 of the EU ETS Benchmark curves and key parameters*, Updated final version issued on 12 October 2021, URL: [policy_ets_allowances_bm_curve_factsheets_en.pdf](https://ec.europa.eu/euro-observatory/policy_ets_allowances_bm_curve_factsheets_en.pdf) (europa.eu).

Fasihi, M., Weiss, R., Savolainen, J., Breyer, C. (2021) Global potential of green ammonia based on hybrid PV-wind power plants, *Applied Energy*, vol. 294, 116170.

Fertilizer Canada (2023) *Ammonia Production Greenhouse Gas Emissions Benchmarking*. October 2023, URL: [Nitrogen-Benchmarking-Report-Final.pdf](https://www.fertilizercanada.ca/Nitrogen-Benchmarking-Report-Final.pdf) (fertilizercanada.ca).

FERTILIZERS EUROPE OVERVIEW (2021/2022) *Climate Policy*, URL: [climate.pdf](https://www.fertilizerseurope.com/climate.pdf) (fertilizerseurope.com).

Glibert, P.M., Harrison, J.A., Heil, C.A., Seitzinger, S. (2006) Escalating Worldwide Use of Urea – A Global Change Contributing to Coastal Eutrophication, February 2006, *Biogeochemistry*, vol. 77 (3), pp. 441-463, doi: 10.1007/s10533-005-3070-5.

IEA (2007) *Tracking industrial energy efficiency and CO₂ emissions*, *Energy Indicators*.

IFA (2009) *Energy Efficiency and CO₂*, Paris, France, International Fertilizer Industry Association.

IEA (2021) *Ammonia Technology Roadmap. Towards more sustainable nitrogen fertiliser production*, October 2021.

IEA (2024) *Electricity 2024, Analysis and forecast to 2026*.

IIASA (2012) *Global Energy Assessment. Towards a Sustainable Future*, Cambridge University Press.

IRENA and AEA (2022) *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, Ammonia Energy Association, Brooklyn.

Karali, N., Khanna, N., Shah, N. (2024) *Climate Impact of Primary Plastic Production*, Lawrence Berkeley National Laboratory, April 2024, URL: <https://escholarship.org/uc/item/12s624vf>.

Kyriakou, V., Garagounis, I., Vourros, A., Vasileiou, E., Stoukides, M. (2020) *An Electrochemical Haber-Bosch Process*, *Joule* 4, pp. 142-158, January 15, Elsevier Inc., URL: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.10.006>.

Lösch, O., Eckstein, J., Friedrichsen, N., Richstein, J.C. (2022) *Carbon Contracts for Difference as essential instrument to decarbonize basic materials industries*, ECEEE summer study proceedings, September 2022, content (fraunhofer.de).

Liu, X., Elgowainy, A., Wang, M. (2020) Life cycle energy use and greenhouse gas emissions of ammonia production from 2 renewable resources and industrial by-products, *Green Chemistry*, Issue 17.

Menga, F., Wagner, A., Kremer, A.B., Kanazawa, D., Leung, J.J., Goult, P., Guan, M., Herrmann, S., Speelman, E., Sauter, P., Lingeswaran, S., Stuchtey, M.M., Hansen, K., Masanet, E., Serrenho, A.C., Ishii, N., Kikuchi, Y., Cullen, J.M. (2023) Planet-compatible pathways for transitioning the chemical industry, *PNAS*, vol. 120, no. 8, e2218294120, URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.2218294120>.

MPP (2022) *Making Net-Zero Ammonia Possible: An Industry-Backed, 1.5°C-Aligned Transition Strategy, Mission Possible Partnership*.

Pinto, R., Henriques, S., Brockway, P., Heun, M., Sousa, T. (2022) *The rise and stall of world electricity efficiency: 1900-2017, results and implications for the renewables transitions*, 15 March 2022, MPRA Paper, no. 112530, posted 23 Mar 2022 17:03 UTC, URL: <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/112530/>, а после 1971 – база данных МЭА.

Phylipsen, D., Blok, K., Worrell, E., de Beer, J. (2002) Benchmarking the energy efficiency of Dutch industry: an assessment of the expected effect on energy consumption and CO₂ emissions, *Energy Policy*, vol. 30, pp. 663-679.

Rouwenhorst, K.H.R., Travis, A.S., Lefferts, L. (2022) 1921-2021: A Century of Renewable Ammonia Synthesis, *Sustain. Chem.*, vol. 3, pp. 149-171, URL: <https://doi.org/10.3390/suschem3020011>.

The Royal Society (2020) *Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store*, POLICY BRIEFING, February 2020, URL: royalsociety.org.

Sandalow, D., Aines, R., Fan, Z., Friedmann, J., McCormick, C., Merz, A.-K., Scown, C. (2022) *Low-Carbon Ammonia Roadmap*, ICEF Innovation Roadmap Project, November 2022.

Saygin, D., Gielen, D. (2021) Zero-emission pathway for the global chemical and petrochemical sector, *Energies*, vol. 14 (13), 3772, doi:10.3390/en14133772.

Saygin, D., Blanco, H., Boshell, F., Cordonnier, J., Rouwenhorst, K., Lathwal, P., Gielen, D. (2023) *The Role of Green Ammonia in Transitioning the*

Non-Energy Use of Natural Gas, *Sustainability*, vol. 15, 1623, URL: <https://doi.org/10.3390/su15021623>.

Tavares Flavio, Luciane, V., Monteiro, P.C., Mainier, Fernando B. (2013) Indicators of energy efficiency in ammonia productions plants, *American Journal of Engineering Research (AJER)*, vol. 02, Issue 07, pp. 116-123, URL: www.ajer.org.

Tonelli, D., Rosa, L., Gabrielli, P., Parente, A., Contino, F. (2023) Cost-competitive decentralized ammonia fertilizer production can increase food, *Nature Food*, vol. 5 (6), pp. 469-479, URL: <https://doi.org/10.1038/s43016-024-00979-y>.

UNIDO (2014) *Energy Efficiency*, Benchmarking Report for Fertilizer Sector.

Worrell, E., Price, L., Neelis, M., Galitsky, C., Nan, Z. (2008) *World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors*, Berkeley, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, URL: [World_Best_Practice_Energy_Intensity_Values_for_Se.pdf](#).

Статья поступила в редакцию (Received): 22.08.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 22.09.2024.

Принята к публикации (Accepted): 13.10.2024.

Для цитирования / For citation:

Башмаков, И.А. (2024) Глобальные рынки аммиака: перспективы развития и декарбонизации, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 4, с. 510-540, doi: 10.21513/0207-2564-2024-4-510-540.

Bashmakov, I.A. (2024) Global ammonia markets: development and decarbonization prospects, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 4, pp. 510-540, doi: 10.21513/0207-2564-2024-4-510-540.

Актуализация оценок эмиссии метана в угледобывающей промышленности России

В.Х. Бердин^{1)}, Н.В. Уледова¹⁾, И.А. Кевбрина¹⁾, А.А. Миронов¹⁾, Н.В. Попов²⁾,
О.С. Третьяк²⁾, П.М. Бобылев³⁾, Н.С. Кабанов³⁾, М.Л. Гитарский⁴⁾*

¹⁾ Автономная некоммерческая организация «Международный центр устойчивого энергетического развития» под эгидой ЮНЕСКО,
Россия, 117292, г. Москва, ул. Кедрова, д. 8, к. 2.

²⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б.

³⁾ Министерство энергетики Российской Федерации,
Россия, 107996, г. Москва, ул. Щепкина, д. 42, с.1-2.

⁴⁾ ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России,
Россия, 127083, г. Москва, ул. 8 Марта, д. 12.

*Адрес для переписки: info@isedc-u.com

Реферат. Данные о метаноносности и метанообильности угольных месторождений были получены от угледобывающих компаний. Это результаты инструментальных измерений. На основе этих данных актуализированы коэффициенты эмиссии метана при добыче и последующих операциях с углем. Актуализированные коэффициенты отражают усовершенствования в технологиях добычи угля и обеспечении безопасности горных работ. Они позволяют обоснованно снизить оценки эмиссии метана от угледобычи и последующего обращения с добытым углем, ежегодно публикуемые Российской Федерацией в национальном кадастре выбросов и абсорбции парниковых газов в соответствии с международными климатическими соглашениями.

Ключевые слова. Метан, эмиссия, коэффициент эмиссии метана, добыча угля, метаноносность, метанообильность, изменение климата, парниковые газы.

The update of methane emission estimates for the coal mining sector in the Russian Federation

V.Kh. Berdin^{1)}, N.V. Uledova¹⁾, I.A. Kevbrina¹⁾, A.A. Mironov¹⁾, N.V. Popov²⁾,
O.S. Tret'yak²⁾, P.M. Bobylev³⁾, N.S. Kabanov³⁾, M.L. Gitar'skiy⁴⁾*

¹⁾ Autonomous Non-Commercial Organization "International Sustainable Energy Development Centre" under the auspices of UNESCO,
3rd floor, build. 2, 8, Kedrova str., 117292, Moscow, Russian Federation.

²⁾ Yu.A. Israel, Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation.

³⁾ Ministry of Energy of the Russian Federation,
42, p.1-2, Shepkina str., 107996, Moscow, Russian Federation.

⁴⁾ Federal State Budgetary Organization “Russian energy agency” of the Ministry of Energy
of the Russian Federation,
12, 8 Marta str., 127083, Moscow, Russian Federation.

* Correspondence address: info@isedc-u.com

Abstract. The methane emission factors were updated based on the data on gas content and abundance in coal deposits that were made available from the actual measurements performed by coal companies within underground and open mining operations and subsequent treatment of coal. The updated emission factors reflect the enhancements in coal mining technology and operation safety achieved so far. The results obtained also provide for a reasonable rationale for coal methane emission reduction in the Russian Federation National Greenhouse Gas Inventory Report published annually in accordance with the international climate agreements.

Keywords. Methane, emission, emission factor, coal mining, methane content, methane abundance, climate change, greenhouse gases.

Введение

Угледобывающая отрасль российской экономики имеет важное социально-экономическое и политическое значение. На уголь приходится значительная часть энергобаланса страны. Угольная отрасль обеспечивает занятость и социальную поддержку населения в моногородах и городских агломерациях, а также формирует доходную часть бюджетов в ряде регионов Сибири и Дальнего Востока.

Однако добыча угля связана с выбросами метана, который не только создает опасные условия ведения работ, но и является парниковым газом, оказывающим серьезное воздействие на глобальный климат. Антропогенные выбросы метана являются существенным фактором современного глобального потепления (UNEP, 2021). В этом отношении метан – второй по значимости парниковый газ после диоксида углерода. Последнее обстоятельство в свете глобальной повестки низкоуглеродного развития требует корректной оценки выбросов метана при добыче и последующих операциях с углем.

Согласно подходу, предложенному МГЭИК¹⁾, расчет эмиссии метана проводится на основе коэффициентов эмиссии путем их умножения на массу добытого угля. Страны используют либо коэффициенты МГЭИК, либо разрабатывают собственные коэффициенты. Сейчас в расчетах выбросов от российской угледобывающей отрасли применяются коэффициенты, актуальные

¹⁾ МГЭИК – Межправительственная группа экспертов по изменению климата (англ. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC). Учреждена в 1988 году как совместный орган Программы ООН по охране окружающей среды (ЮНЕП) и Всемирной метеорологической организации (ВМО) с целью получения максимально достоверных и авторитетных научных данных, связанных с изменением климата.

на период 1990-2006 гг. (Тайлаков и др., 2009) и не отражающие современное состояние отрасли.

Между тем, с 2006 года в российской угледобывающей отрасли изменилось соотношение массы угля, добываемого открытым и подземным способами. Часть угольных месторождений была закрыта, и появились новые месторождения с другими горно-геологическими условиями и, соответственно, характеристиками метаноносности и метанообильности угольных пластов. На продолжающих работу месторождениях усовершенствованы технологии добычи, обновлено оборудование, усилены меры контроля безопасности горных работ. Благодаря внедрению наилучших доступных технологий и современного оборудования производится интенсивная дегазация (в том числе предварительная) угольных пластов, повысилось качество добычи угля (ИТС 37-2023, 2023), что привело к сокращению эмиссии метана в атмосферу, которое пока не отражено в оценках выбросов парниковых газов в «Национальном докладе о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов не регулируемых Монреальским протоколом» (далее – национальный кадастр).

Указанные обстоятельства дают основания полагать, что применяемые в национальном кадастре коэффициенты эмиссии потеряли свою актуальность, и их использование может приводить к неадекватным оценкам выбросов метана при добыче угля (Национальный доклад, 2023). Поэтому представляется целесообразным актуализировать значения коэффициентов эмиссии метана при добыче и последующих операциях с углем.

Цели работы, результаты которой представлены в данной статье:

- разработать методические подходы и выполнить актуализацию национальных коэффициентов эмиссии метана при добыче и последующих операциях с углем с учетом современного состояния российской угледобывающей отрасли;
- продемонстрировать эффективность разработанных подходов для повышения качества количественных оценок выбросов метана при угледобыче и отражении принятых мер низкоуглеродного развития.

Уголь в климатической повестке и ESG

Угледобывающая отрасль наиболее чувствительна к принимаемым в рамках климатической повестки решениям. На конференциях ООН по вопросам изменения климата (Конференции Сторон²⁾, далее – КС), являющихся высшим органом переговорного процесса для реализации положений Рамочной конвенции ООН об изменении климата³⁾ (РКИК ООН), а также Киотского протокола⁴⁾ и Парижского соглашения⁵⁾ к РКИК ООН, систематически поднимается вопрос об уходе от использования ископаемого топлива, в частности – угля.

²⁾Конференция Сторон (КС) (англ. Conference of the Parties, COP). Высший руководящий орган международной конвенции ООН об изменении климата.

На КС-26 ⁶⁾ в 2021 году был принят Климатический пакт Глазго, призывающий страны к «постепенному сокращению» использования угля без нивелирования вредных выбросов путем применения технологий улавливания углекислого газа (*phase down unabated coal*) (РКИК ООН, 2022). Эта же формулировка сохранилась и в заключении, принятом по результатам первого глобального подведения итогов на КС-28 в 2023 году в Дубае (РКИК ООН, 2024).

В свете современных тенденций глобального устойчивого развития для угледобывающей отрасли особенно актуальны подходы, направленные на синхронизацию усилий по пунктам ESG-повестки и в то же время подтверждающие согласованность действий в русле мирового низкоуглеродного тренда. Принципы ESG (Environmental, Social and Corporate Governance – экологическое, социальное и корпоративное управление) имеют непосредственное отношение к угледобывающей промышленности.

Во-первых, это вопросы производственной безопасности. Добыча угля, в особенности подземным способом, сопровождается выбросами и в отдельных случаях взрывами метана, которые приводят к травмам и даже гибели людей. Преобладающая ценность человеческой жизни неоспорима. Потому вопросы производственной безопасности при добыче угля имеют первостепенную важность. С точки зрения потребителя угля, высокий ESG-рейтинг предприятия должен гарантировать, чтобы при его добыче не ущемлялись права трудящихся, соблюдались требования трудового законодательства, а также обеспечивались необходимые требования и нормативы производственной безопасности, охраны окружающей среды и климата.

³⁾ Рамочная конвенция ООН об изменении климата (РКИК ООН) (англ. Framework Convention on Climate Change (UN FCCC)). РКИК ООН была принята в 1992 году и вступила в силу в 1994 году. Сторонами РКИК являются более 190 государств, включая Россию, все крупные и все развитые страны. РКИК ООН определяет общие принципы действий по проблеме изменения климата, прежде всего по ограничению и снижению выбросов парниковых газов, но не содержит численных параметров. РКИК ООН делит страны на входящие (экономически развитые страны и страны с переходной экономикой) и не входящие (развивающиеся страны) в Приложение 1, а также входящие в Приложение 2 (наиболее развитые).

⁴⁾ Киотский протокол (англ. Kyoto Protocol). Соглашение, заключенное в рамках РКИК ООН в 1997 году. Его целью было снижение выбросов парниковых газов развитыми странами, входящими в Приложение 1 РКИК, а также развитие механизмов гибкости, в частности механизма устойчивого развития.

⁵⁾ Парижское соглашение (англ. Paris Agreement). Соглашение РКИК ООН о долгосрочной международной деятельности всех стран в решении проблемы изменения климата, задающее общие рамки и принципы деятельности. В отличие от Киотского протокола, предполагает равное участие развитых и развивающихся стран в усилиях по ограничению и снижению выбросов парниковых газов, а также помощь наиболее развитых стран более слабым и уязвимым государствам (климатическое финансирование) в низкоуглеродном развитии и адаптации к изменениям климата. Соглашение было заключено на конференции сторон РКИК ООН в Париже в конце 2015 года.

⁶⁾ Конференция ООН по вопросам изменения климата, прошедшая в Глазго в 2021 году.

Весьма важно и то, что в большинстве случаев угледобывающая отрасль сконцентрирована в моногородах, где основной вид промышленности и возможности трудоустройства связаны с добычей и переработкой угля. Уголь тесно связан со всей социальной сферой, формирующейся вокруг предприятий по его добыче и переработке, с людьми, чья повседневная жизнь целиком зависит от этого вида хозяйственной деятельности. Поэтому моментальный отказ от добычи угля, очевидно, невозможен, и упомянутый выше термин «уход» может рассматриваться только как постепенный, многошаговый процесс, в ходе которого обязательно соблюдение принципов социальной ответственности.

Во-вторых, добыча угля связана с выбросами метана, который в России включен в перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды (Правительство РФ, 2023). Угледобывающие предприятия обязаны платить штрафы за превышение предельно допустимых выбросов, а внесенный в Госдуму законопроект предусматривает повышение таких штрафов в десятки раз (Проект, 2024).

В-третьих, метан является парниковым газом и оказывает серьезное воздействие на глобальный климат.

Высокая социально-экономическая значимость и кроме того, существенные экологические эффекты в регионах угледобычи, подтверждают важность совершенствования методических подходов к оценке выбросов метана в угольной отрасли в целях получения достоверных данных о ее воздействии на окружающую среду и климат.

Методы

Геологические процессы формирования угля сопровождаются образованием метана (CH_4). В некоторых пластах вместе с CH_4 может присутствовать и углекислый газ (CO_2). Вместе они известны как «сопутствующие газы». Сопутствующие газы удерживаются в угольном пласте до момента разработки (вскрытия) угольного пласта при добыче. CH_4 является основным парниковым газом, высвобождаемым при добыче и последующем обращении с добытым углем (МГЭИК, 2006).

Количество метана (в нормальных условиях – объем), содержащееся в естественных условиях в единице массы угля, добытой из определенного угольного пласта, называют природной метаносностью этого угольного пласта (Газоносность, 1980). Показатель «метаносность» определяется путем инструментальных измерений. Его значения используются для расчета коэффициента выброса CH_4 при открытой добыче угля.

Для расчета коэффициента эмиссии при добыче угля подземным способом использовали показатель «метанообильность». Абсолютная метанообильность представляет собой количество (в нормальных условиях – объем) метана, выделяющегося в подземные горные выработки в единицу времени (Газоносность, 1980). Ее величина на разных шахтах и месторождениях изме-

няется в широком диапазоне, поскольку количество удаляемого из шахт метана зависит от свойств подземных пластов и может изменяться от года к году, равно как и количество добытого из этих шахт угля. Абсолютная метанообильность является объектом инструментального контроля в целях обеспечения безопасности горных работ, и ее измерение ведется постоянно и с высокой точностью.

Значения метаноносности и метанообильности определяются характеристиками конкретного месторождения: способом и глубиной добычи, а также свойствами добываемого угля. В каждом году количество разрабатываемых подземных и открытых месторождений, интенсивность их эксплуатации (масса добычи на месторождении) и глубины, с которых ведется добыча угля, могут отличаться от аналогичных показателей предыдущих лет. В этом случае и величины метаноносности и метанообильности будут разными год от года. Кроме того, они будут различаться в зависимости от регионов страны, в которых расположены месторождения или их группы (угольные бассейны) с разными условиями добычи и свойствами угля.

Национальный кадастр парниковых газов подготавливается на основе государственных статистических данных, собираемых в пределах административно-территориальных образований (федеральных округов) Российской Федерации. Соответственно национальные коэффициенты выбросов разрабатывались так, чтобы их можно было применять с данными государственной статистики для федеральных округов, в пределах которых осуществляется угледобыча.

Первичной задачей нашего исследования был сбор необходимой совокупности данных о массе добытого угля, а также метаноносности и абсолютной метанообильности разрабатываемых угольных пластов. С этой целью были подготовлены специальные запросы, которые затем направили во все угледобывающие предприятия (компании), осуществлявшие производственную деятельность на территории Российской Федерации в период с 2006 по 2021 гг. включительно. Полученные данные были проанализированы и систематизированы по месторождениям и угольным бассейнам в пределах угледобывающих федеральных округов с детализацией отдельно по подземному и открытому способам добычи с помощью следующих переменных:

I – общее число месторождений в федеральном округе, в пределах которого осуществляется добыча угля подземным или открытым способами;

i – идентификатор (порядковый номер) месторождения, $i = 1, \dots, I$;

Y – число лет, для которых имеются данные;

y – идентификатор (порядковый номер) года из временного ряда лет, для которых имеются данные; $y = 1, \dots, Y$;

$A_{i,y}$ – метанообильность подземного месторождения i в году y , $\text{м}^3 \text{ мин}^{-1}$ (по данным, полученным от угледобывающих предприятий);

$m_{i,y}$ – масса добычи угля на месторождении i в году y , т (по данным угледобывающих предприятий);

$C_{i,y}$ – метаноносность открытого месторождения i в году y , $\text{м}^3 \text{ т}^{-1}$ (по данным угледобывающих предприятий).

Анализ поступившей информации также включал ее сопоставление с данными научной отраслевой литературы (Газоносность, 1980; Угольная база, 2003). Оценку репрезентативности полученной информации проводили на основе сравнения данных об угледобыче в ответах угледобывающих предприятий с данными государственной статистики о добыче угля российской угольной отраслью с 2006 по 2021 гг. включительно, содержащимися в национальных кадастрах, представленных в органы РКИК ООН.

В данной работе актуализированные коэффициенты эмиссии метана определялись отдельно для каждого месторождения, способа и года добычи, обобщались по федеральным округам, где находятся конкретные месторождения или угольные бассейны, а затем вычислялись средние за несколько лет значения. Рассчитывались следующие коэффициенты:

$K_{i,y}$ – коэффициент эмиссии CH_4 для месторождения i ($i = 1, \dots, I$) и года y ($y = 1, \dots, Y$); $\text{м}^3 \text{т}^{-1}$;

F_y – коэффициент эмиссии CH_4 для федерального округа в год y ($y = 1, \dots, Y$); $\text{м}^3 \text{т}^{-1}$;

EF – обобщенный коэффициент эмиссии CH_4 для федерального округа; $\text{м}^3 \text{т}^{-1}$.

Эти три коэффициента имеют одинаковую размерность $\text{м}^3 \text{т}^{-1}$, то есть представляют собой удельные выбросы метана в атмосферу. Они специфичны соответственно для:

- данного месторождения и года,
- для федерального округа и года и
- федерального округа.

Для месторождений, разрабатываемых открытым способом в заданном году, коэффициент эмиссии CH_4 принимался равным удельной метаносности месторождения: $K_{i,y} = C_{i,y}$.

Для определения коэффициента эмиссии CH_4 при подземной добыче угля, значение метанообильности каждой подземной шахты пересчитывалось на год по формуле (1):

$$K_{i,y} = \frac{A_{i,y} \times 60 \times 24 \times 365}{m_{i,y}}. \quad (1)$$

Далее, с использованием систематизированных данных была рассчитана масса угля M_y , добывавшегося каждый год на всех месторождениях федерального округа (т). Расчеты производили отдельно для подземного и открытого способов угледобычи по формуле (2):

$$M_y = \sum_{i=1}^I m_{i,y} \quad (y = 1, \dots, Y). \quad (2)$$

Значение годового коэффициента эмиссии метана для угледобывающего федерального округа F_y определяли по формуле (3) как средневзвешенное

значение коэффициентов эмиссии всех месторождений, где в отчетном году осуществлялась добыча угля открытым или подземным способами:

$$F_y = \frac{\sum_{i=1}^I (K_{i,y} \times m_{i,y})}{M_y}. \quad (3)$$

Коэффициенты F_y были рассчитаны для 2006-2021 гг. На отрезке времени 2016-2021 гг. их значения, хотя и заметно изменчивы, не обнаружили трендов. Поэтому в качестве обобщенного коэффициента эмиссии CH_4 предлагается использовать истинное, теоретическое среднее значение EF , т.е. математическое ожидание величины F для тех лет, для которых отсутствовали выраженные тренды (2016-2021 гг.).

Для оценки EF используется выборочное среднее значение (4):

$$\widehat{EF} = \frac{1}{N} \sum_{y=Y_1}^{Y_2} F_y, \quad (4)$$

где $Y_1 = 11$ и $Y_2 = 16$ – соответственно порядковые номера 2016-го и 2021-го годов, а $N = Y_2 - Y_1 + 1$ есть длина временного отрезка от года 2016 до года 2021.

Среднеквадратическое отклонение выборочного среднего $\widehat{EF}$ от истинного, теоретического значения EF , определяется из формулы (5) (ГОСТ 34100.3-2017, 2018):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{y=Y_1}^{Y_2} (F_y - \widehat{EF})^2}{N(N-1)}}. \quad (5)$$

Для нахождения доверительного интервала, в котором находится EF , воспользуемся квантилью t распределения Стьюдента (ГОСТ 34100.3-2017, 2018):

$$EF_{min} = \widehat{EF} - ts < EF < \widehat{EF} + ts = EF_{max}.$$

Для 95%-го доверительного интервала и 5 степеней свободы $t = 2.571$.

Степень неопределенности положения EF относительно $\widehat{EF}$ можно указать и в процентах по формуле (6):

$$\pm \frac{ts}{\widehat{EF}} 100\%. \quad (6)$$

Для оценки диапазона изменчивости реализаций годовых коэффициентов эмиссии F используется оценка (7) среднеквадратического отклонения:

$$s_F = \sqrt{\frac{\sum_{y=Y_1}^{Y_2} (F_y - \widehat{EF})^2}{(N-1)}}. \quad (7)$$

В качестве диапазона изменчивости F принимается следующий:

$$[(EF)] - 1.96s_F; EF_{max} + 1.96s_F).$$

Здесь 1.96 – двусторонняя 95%-я квантиль нормального распределения.

Диапазон изменчивости F относительно $\widehat{EF}$ можно указать и в процентах по формуле (8):

$$\pm \frac{(ts + 1.96s_F)}{\widehat{EF}} 100\%. \quad (8)$$

Разработанный методический подход также применялся для расчета коэффициентов эмиссии метана при последующем обращении с углем, добытым подземным способом, которое, согласно МГЭИК (МГЭИК, 2006), включает его складирование на поверхности и транспортировку. При расчетах учитывали предварительную дегазацию угольных пластов, которая осуществляется на шахтах Печорского угольного бассейна, а также на некоторых шахтах Кузнецкого угольного бассейна, и приводит к снижению выбросов метана. В связи с этим при расчете коэффициентов эмиссии для последующего обращения с углем, добытым на шахтах с предварительной дегазацией угольных пластов, применяли рекомендуемый МГЭИК понижающий коэффициент 0.1, на который умножали ранее рассчитанные коэффициенты эмиссии CH_4 для месторождений $K_{i,y}$. Для остальных шахт Российской Федерации, где предварительная дегазация не проводится, принимался понижающий коэффициент 0.3 (МГЭИК, 2006).

В следующем разделе, в том числе, полученные значения актуализированных обобщенных коэффициентов эмиссии метана и их неопределенности сравнивались с применяемыми до настоящего времени в национальном кадастре.

Результаты и обсуждение

При активном содействии Минэнерго России авторами были получены ответы от 203 угледобывающих предприятий, разрабатывающих в общей сложности 120 угольных месторождений на территории России. Сопоставление данных об открытой и подземной добыче угля в национальных кадастрах с 2006 по 2021 годы с аналогичными данными, собранными из ответов угле-

добывающих предприятий, показало, что информация из ответов охватывала от 54% производственного функционала российской угледобывающей отрасли в 2006 году до 84% в 2021 году. Оценки получены в предположении, что полный охват угольной отрасли (100%) будет достигнут при равенстве суммарных значений массы угледобычи в национальном кадастре и во всех ответах компаний за соответствующий год (рис. 1).

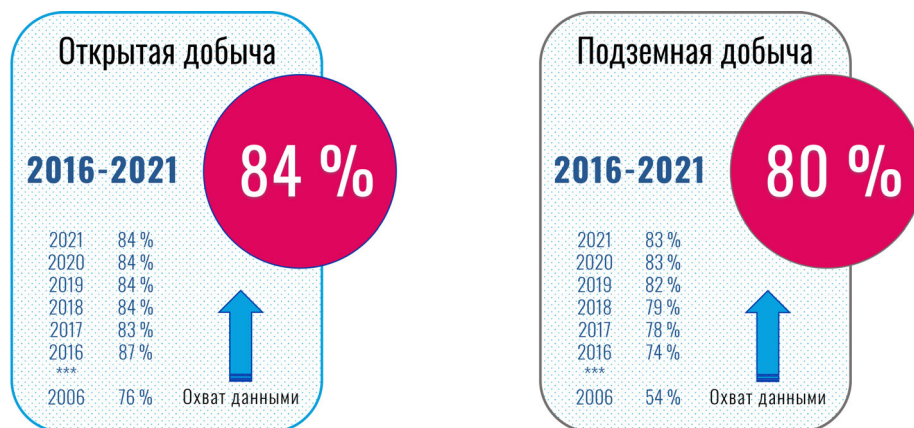


Рисунок 1. Репрезентативность данных о добыче угля по результатам ответа угледобывающих компаний, где 100% соответствует полному совпадению данных о массе добытого в стране угля в национальном кадастре и в ответах угольных предприятий за соответствующий год

Figure 1. Coal mining data representativeness based on the data from coal companies with assumption that 100 percent corresponds to complete coincidence between the coal mining data from the National Inventory Report and the coal companies as for the respective year

Репрезентативность является главным условием при определении временного отрезка при расчете обобщенных коэффициентов эмиссии метана для угледобывающих федеральных округов.

Как следует из рис. 1, если одновременно рассматривать открытый и подземный способы добычи угля, показатель соответствия 74% и более между рассмотренными массивами данных достигается на временном отрезке с 2016 по 2021 гг. (средняя величина показателя за этот период для обоих способов добычи составляет 80% и более). Низкие показатели соответствия за предшествующие 2006-2015 годы, скорее всего, связаны с нестабильной работой предприятий в силу экономических причин, в том числе из-за смены форм собственности на шахты и разрезы, при которой не всегда обеспечивается корректность в архивировании и передаче данных и часть необходимой информации оказывается утерянной (рис. 1).

Помимо сравнительного анализа данных угледобычи, для этого же временного отрезка была рассмотрена межгодовая изменчивость коэффициента F , определенного отдельно для открытого и подземного способов добычи на основе полученных данных о всех действующих в пределах угледобывающих федеральных округов месторождений. Результаты анализа показали, что с 2006 до 2015 гг. значения F_y для открытой и подземной добычи сильно варьи-

руют по годам, тогда как с 2016 амплитуда колебаний F_y около среднего значения $\overline{EF}$ за 2016-2021 гг. становится незначительной, а существенного тренда не обнаруживается.

В этой связи было решено отказаться от использования данных за 2006-2015 гг. при расчете актуализированных обобщенных коэффициентов выбросов EF , а ограничиться данными за 2016-2021 гг.

Актуализированные коэффициенты EF являются репрезентативными не только для расчета выбросов метана за пятилетний период с 2016 по 2021 гг., но и могут быть рекомендованы для расчетов в последующие годы, поскольку отражают современное состояние угольной отрасли, включая произошедшие в ней технологические изменения, о которых упоминалось выше.

На рис. 2 и 3 приведены результаты расчетов коэффициентов EF для угледобывающих федеральных округов. Расчеты выполнены в пределах временного ряда с 2016 по 2021 гг., а полученные значения актуализированных коэффициентов сравниваются со значениями, применяемыми в национальном кадастре. На графиках представлены данные о добыче угля и сопоставлены величины эмиссии метана, рассчитанные с использованием действующих и актуализированных коэффициентов эмиссии. Расчеты выполнены отдельно для открытого (рис. 2) и подземного (рис. 3) способов добычи угля. В Центральном, Уральском и Приволжском федеральных округах добыча угля в настоящее время не ведется, поэтому актуализация коэффициентов для них не проводилась.

Коэффициенты эмиссии метана на разрезах, $\text{м}^3 \text{т}^{-1}$

Федеральный округ	Кадастровое значение	Актуализированное значение
Дальневосточный	5.6	0.8
Северо-Западный	6.0	3.5
Сибирский	5.5	3.3
Центральный	2.0	-
Уральский	2.0	-
Приволжский	2.0	-

Последующее обращение

Федеральный округ	Кадастровое значение	Актуализированное значение
Дальневосточный	0.2	0.2
Северо-Западный	0.2	0.2
Сибирский	0.2	0.2
Центральный	0.1	-
Уральский	0.1	-
Приволжский	0.1	-

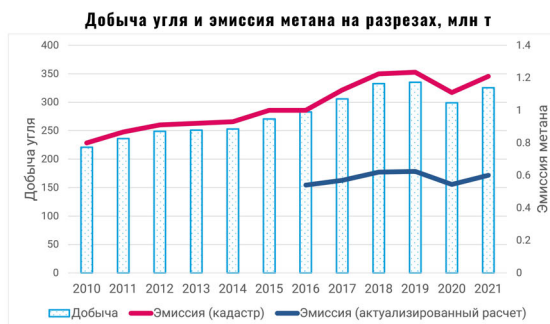


Рисунок 2. Актуализированные коэффициенты эмиссии метана при открытой добыче угля для различных угледобывающих федеральных округов (слева) и сопоставление суммарной эмиссии метана с территории страны, рассчитанной с использованием актуализированных коэффициентов, с аналогичными расчетами из национального кадастра (справа)

Figure 2. The updated methane emission factors for open-pit mining in the federal regions of the Russian Federation (left) and the comparison of total methane emissions from the territory of the country, calculated using the updated emission factors, with similar calculations from the National Inventory Report (right)

Из рис. 2 и 3 видно, что актуализированные коэффициенты эмиссии для Дальневосточного, Северо-Западного, Сибирского, а также Южного (в случае

подземной добычи) федеральных округов оказались ниже, чем те, которые используются в национальном кадастре. Расчетная эмиссия метана с 2016 по 2021 гг. также сократилась по сравнению с оценками, приведенными в национальном кадастре.

Коэффициенты эмиссии метана на шахтах, $\text{м}^3 \cdot \text{т}^{-1}$

Федеральный округ	Кадастровое значение	Актуализированное значение
Дальневосточный	18.9	6.2
Северо-Западный	32.1	14.2
Сибирский	15.7	13.0
Южный	28.4	1.0
Центральный	8.0	-
Уральский	13.8	-
Приволжский	13.8	-

Последующее обращение

Федеральный округ	Кадастровое значение	Актуализированное значение
Дальневосточный	2.6	1.9
Северо-Западный	1.1	1.4
Сибирский	3.0	3.5
Южный	7.3	0.3
Центральный	0.6	-
Уральский	0.6	-
Приволжский	0.6	-

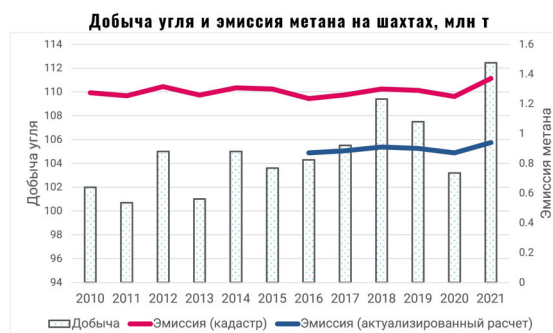


Рисунок 3. Актуализированные коэффициенты эмиссии метана при подземной добыче угля для различных угледобывающих федеральных округов (слева) и сопоставление суммарной эмиссии метана с территории страны, рассчитанной с использованием актуализированных коэффициентов, с аналогичными расчетами из национального кадастра (справа)

Figure 3. The updated methane emission factors for underground mining in the federal regions of the Russian Federation (left) and the comparison of total methane emissions from the territory of the country, calculated using the updated emission factors, with similar calculations from the National Inventory Report (right)

Расчет актуализированных коэффициентов эмиссии метана был практически полностью основан на данных угледобывающих предприятий. Это данные абсолютной метанообильности ($\text{м}^3 \cdot \text{мин}^{-1}$) действующих шахт, полученные путем инструментальных контрольных замеров на устьях воздухоподающих вентиляционных стволов общешахтных выработок и дегазационных газоотсасывающих установок. В случае открытой добычи — это результаты измерения метаносности угольных пластов. Актуализированные обобщенные коэффициенты выбросов практически во всех случаях оказались ниже тех, которые в настоящее время используются в национальном кадастре. Это обусловлено не только более стабильной работой угледобывающих предприятий, но и качественными изменениями в угольной отрасли, проявившимися в повсеместном внедрении высокоэффективных и низкоуглеродных технологий угледобычи, о которых говорилось выше.

В следующей таблице приведены характеристики неопределенности актуализированных значений обобщенных коэффициентов эмиссии EF , а также характеристики варьирования коэффициентов годовых эмиссий F . Они приведены в процентах относительно выборочной оценки $\widehat{EF}$.

Из таблицы следует, что варьирование актуализированных коэффициентов эмиссии существенно ниже того, которым характеризуются коэффициенты годовых эмиссий, используемые в национальном кадастре. Данные

измерений также позволили снизить неопределенность величин полученных коэффициентов выбросов.

Таблица. Неопределенность актуализированных значений обобщенных коэффициентов эмиссии и сравнение варьирования актуализированных и используемых в национальном кадастре коэффициентов годовых эмиссий

Table. Uncertainty of updated values of generalized emission factors and comparison of variations in annual emission factors updated and used in the National Inventory Report

Наименование вида деятельности угледобывающей отрасли	Неопределенность актуализированных значений обобщенных коэффициентов эмиссии, %	Характеристика варьирования актуализированных коэффициентов годовых эмиссий, %	Характеристика варьирования коэффициентов годовых эмиссий (национальный кадастр), %
Открытая добыча	5.8	16.6	21.6
Подземная добыча	4.7	13.6	19.2
Последующие операции с углем	7.3	21.0	40.9

Низкие по абсолютной величине значения актуализированных обобщенных коэффициентов эмиссии метана свидетельствуют о качественных изменениях в угледобывающей отрасли, о тенденции ее перехода на низкоуглеродное развитие.

На рис. 4 представлена сравнительная оценка результатов расчетов выбросов метана при открытом и подземном способах добычи угля, выполненных, по состоянию на 2022 год, с использованием применяемых в национальном кадастре и актуализированных коэффициентов выбросов для различных угледобывающих федеральных округов. Как видно из рисунка, наиболее существенные сокращения выбросов метана отмечаются в случае открытой добычи угля в Сибирском и Дальневосточном федеральных округах.

Использование актуализированных коэффициентов привело к сокращению расчетных эмиссий метана в 2022 году от открытой добычи угля на 665 тыс. т, а от добычи угля подземным способом – на 475.1 тыс. т по сравнению с аналогичными оценками, выполненными с использованием коэффициентов эмиссий, применяемых в национальном кадастре (рис. 4). Рассчитанная аналогично суммарная масса сокращений выбросов метана при последующих операциях с углем, добытым подземным способом, составила 7.32 тыс. т. В целом, использование актуализированных коэффициентов эмиссий, разработанных на основе данных угледобывающих предприятий, обеспечило снижение расчетной массы выбросов метана при добыче угля в Российской Федерации в 2022 году более чем на 40%.

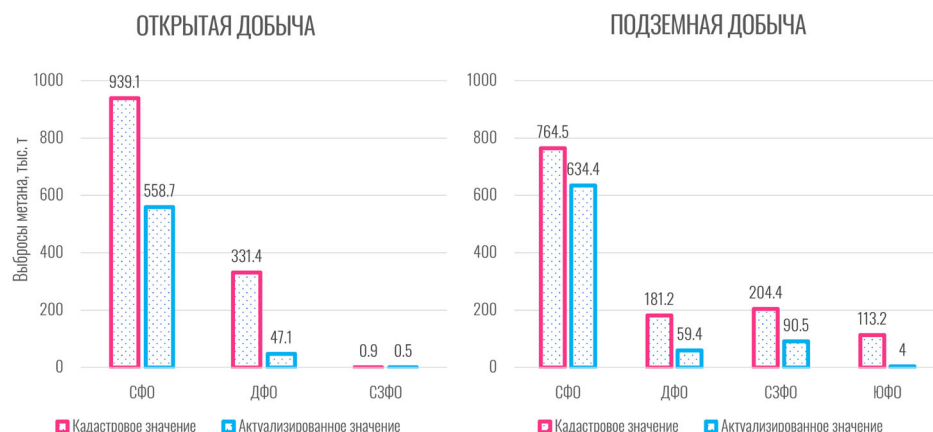


Рисунок 4. Сравнение значений расчетной эмиссии метана при добыче угля открытым и подземным способами за 2022 год для различных федеральных округов, тыс. т (СФО – Сибирский федеральный округ; ДФО – Дальневосточный федеральный округ; СЗФО – Северо-Западный федеральный округ; ЮФО – Южный федеральный округ)

Figure 4. Comparison of calculated methane emissions from open-pit and underground coal mining in 2022 within the federal regions of the Russian Federation, Kt (СФО – Siberian Federal Region; ДФО – Far Eastern Federal Region; СЗФО – North-Western Federal Region; ЮФО – Southern Federal Region)

При актуализации коэффициентов эмиссии авторы не ставили цель учесть выбросы метана, которые могут быть при разведке угольных месторождений, из законсервированных или ликвидированных шахт, а также от каких-либо видов деятельности по ликвидации накопленного вреда окружающей среде. Кроме того, не учитывались и выбросы от самопроизвольного возгорания угля, включая эндогенные пожары. Можно предположить, что величины выбросов метана и диоксида углерода от указанных категорий источников будут незначительными по сравнению с основной производственной деятельностью угледобывающей отрасли. Их анализ должен быть предметом отдельных исследований.

Закключение

Учет эмиссии метана при добыче и последующем обращении с углем важен для выполнения международных климатических обязательств России, обеспечения безопасности горных работ, разработки мероприятий по повышению эффективности дегазации угольных пластов, а также для демонстрации в будущем целей ESG-повестки.

Российские угледобывающие предприятия осуществляют технологическую модернизацию, внедряют наилучшие доступные технологии, проводят цифровизацию, в том числе совершенствуют учет выбросов метана. Поэтому данные, полученные непосредственно от действующих предприятий, обеспечивают наиболее адекватные, достоверные и точные оценки эмиссий.

В рамках данной работы впервые выполнены столь масштабные сбор, систематизация и анализ фактических данных метанообильности и метаносности от действующих угледобывающих предприятий России за 2006-2021 годы. Эта информация использовалась авторами при разработке методических подходов к актуализации коэффициентов эмиссий в целях уточнения выбросов метана от российской угледобывающей отрасли, данные о которой, в том числе, представляются в национальный кадастр.

В данной работе рассчитаны актуализированные обобщенные коэффициенты эмиссии метана, отражающие современный уровень развития угледобывающей отрасли – усовершенствование технологий добычи и удаления метана угольных пластов, а также обращения с добытым углем. Полученные коэффициенты эмиссии свидетельствуют не только о стабильной работе угледобывающих предприятий, но и внедрении на них низкоуглеродных технологий, следствием которого является снижение с 2016 года общей углеродоемкости российской угледобывающей отрасли. Перерасчет суммарной эмиссии метана с использованием актуализированных коэффициентов дает снижение расчетных выбросов метана на величину около 1 млн т ежегодно, начиная с 2016 года.

Низкие показатели неопределенности актуализированных коэффициентов эмиссии метана дают основание рекомендовать их для внедрения в национальный кадастр. При этом рекомендуется выполнить перерасчет эмиссии метана от добычи и последующих операций с углем с использованием актуализированных коэффициентов за временной отрезок с 2016 по 2021 годы, а также применять эти коэффициенты для расчета выбросов за 2022 и последующие годы.

Сравнение применяемых в национальном кадастре и актуализированных коэффициентов эмиссии метана с коэффициентами других стран РКИК ООН приведены на рис. 5. Сравнение показывает, что актуализированные значения хорошо согласуются с коэффициентами выбросов других угледобывающих стран (Australia, 2022; EU, 2022; Национальный доклад Республики Казахстан, 2022; US, 2022; Turkey, 2022).⁷⁾

Разработанный авторами методический подход является эффективным инструментом повышения качества количественных оценок выбросов метана и, кроме того, подтверждает предпринятые российской угольной отраслью меры в области низкоуглеродного развития. Снижение негативного воздействия на окружающую среду и климат является одним из императивов производственного функционала угледобывающей отрасли России. Поэтому актуализацию коэффициентов эмиссии метана следует проводить на регуляр-

⁷⁾ В задачи выполненного исследования не входило проведение анализа использованных методов для оценки величин коэффициентов эмиссии метана в зарубежных странах (рекомендуемые МГЭИК коэффициенты или уточненные по национальным данным значения). Для авторов представлялось важным сопоставить величины коэффициентов эмиссий, представленные в официальной отчетности стран перед РКИК ООН, например, отчетность стран 2023 года – <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2023>.

ной основе, по мере дальнейшего совершенствования технологий добычи и последующего обращения с углем.

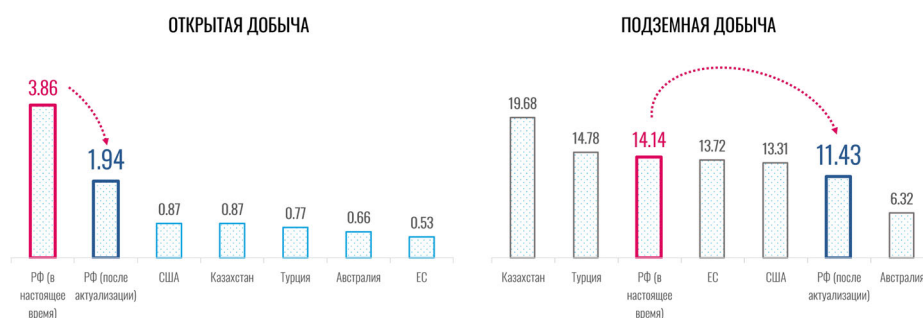


Рисунок 5. Коэффициенты эмиссии метана (кг т⁻¹) в некоторых странах-членах РКИК ООН

Figure 5. Methane emission factors (kg t⁻¹) in some UNFCCC member-states

Благодарности

Работа выполнена при поддержке и непосредственном участии Министерства энергетики Российской Федерации.

Авторы выражают признательность А.И. Нахутину и М.М. Дыгану за ценные замечания и предложения, высказанные при подготовке статьи.

Список литературы

Газоносность угольных бассейнов и месторождений СССР (1980) В 3 т. Гл. ред. А.И. Кравцов, М., Недра.

ГОСТ 34100.3-2017 (2018) *Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения*, М., Стандартинформ, 112 с.

ИТС 37-2023 (2023) *Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Добыча и обогащение угля*, М., Бюро НДТ, 319 с.

МГЭИК (2006) *Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов*. Подготовлено Программой МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. Игглестон Х. С., Буэндиа Л., Мива К., Нгара Т. и Танабе К. (Ред.) МГЭИК-ИГЕС, электронный ресурс, URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/2_Volume2/V2_4_Ch4_Fugitive_Emissions.pdf (дата обращения 19.09.2024).

Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990-2021 гг. Часть I. (2023) М., ИГКЭ, 479 с., электронный ресурс, URL: <http://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2023/> (дата обращения 27.09.2024).

Национальный доклад Республики Казахстан о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом о кадастре парниковых газов за 1990-2020 гг. (2022) Министерство экологии, геологии и природных ресурсов Республики Казахстан, 500 с., электронный ресурс, URL: <http://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2022/> (дата обращения 27.09.2024).

Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20 октября 2023 г. № 2909-р. (2023) Электронный ресурс, URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202310230035> (дата обращения 19.09.2024).

«О внесении изменений в Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях». Проект Федерального закона (2024) Электронный ресурс, URL: <https://sozd.duma.gov.ru/bill/594956-8> (дата обращения 19.09.2024).

РКИК ООН (2022) *Доклад Конференции Сторон, действующей в качестве совещания Сторон Парижского соглашения, о работе ее третьей сессии, состоявшейся в Глазго с 31 октября по 13 ноября 2021 года. Часть вторая: Меры, принятые Конференцией Сторон, действующей в качестве совещания Сторон Парижского соглашения, на ее третьей сессии*, электронный ресурс, URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021_10a01R.pdf (дата обращения 19.09.2024).

РКИК ООН (2024) *Доклад Конференции Сторон, действующей в качестве совещания Сторон Парижского соглашения, о работе ее пятой сессии, состоявшейся в Объединенных Арабских Эмиратах с 30 ноября по 13 декабря 2023 года. Часть вторая: Меры, принятые Конференцией Сторон, действующей в качестве совещания Сторон Парижского соглашения, на ее пятой сессии*, электронный ресурс, URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2023_16a01R.pdf (дата обращения 19.09.2024).

Тайлаков О.В., Кормин А.Н., Гитарский М.Л., Тайлаков В.О. (2009) Эмиссия метана при добыче угля в России, В сб.: *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*, т. 22, гл. ред. Ю.А. Израэль, М., ИГКЭ, с. 216-227.

Угольная база России (2003) В 5 т., гл. ред. В.Ф. Череповский, М., ЗАО «Геоинформмарк», 1997-2003.

EU (2022) *Annual European Union greenhouse gas inventory 1990-2020 and inventory report 2022*. Submission to the UNFCCC Secretariat. 27 May 2022, 961 p., URL: <http://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2022/> (дата обращения 27.09.2024).

Australia (2022) *National Inventory Report 2020. The Australian Government Submission to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Australian National Greenhouse Accounts. Vols. 1-5*, Commonwealth of Australia. 2022, URL: <http://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2022/> (дата обращения 27.09.2024).

Turkey (2022) *Turkish Greenhouse Gas Inventory 1990-2020. Annual Report for submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Turkish Statistical Institute. National Inventory Report for submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change. April 2022, 576 p., URL: <http://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2022/> (дата обращения 27.09.2024).

UNEP (2021) *Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions*. United Nations Environment Programme and Climate and Clean Air Coalition. 2021. Nairobi: United Nations Environment Programme, URL: <https://www.unep.org/ru/resources/doklad/vsemirnaya-ocenka-metana-vygody-i-zatraty-ot-snizheniya-urovnya-vybrossov-metana> (дата обращения 19.09.2024).

US (2022) *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2020*. United States Environmental Protection Agency, EPA 430-R-22-003, 2022, 841 p., URL: <http://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2022/> (дата обращения 27.09.2024).

References

Gazonosnost' ugol'nyh bassejnov i mestorozhdenij SSSR [Gas content of coal basins and deposits of the USSR: in 3 vols.] (1980) In F.I. Kravtsov (ed.), Nedra, Moscow, Russia.

GOST 34100.3-2017 (2018) Neopredelennost' izmereniya. Chast' 3. Rukovodstvo po vyrazheniyu neopredelennosti izmereniya. ISO/IEC Guide 98-3:2008. [Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement. Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). 2008], Moscow, Russia, 130 p.

ITS 37-2023 (2023) *Informacionno-tekhnicheskij spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam ITS 37-2023. Dobycha i obogashchenie ugl'ya* [Information and technical reference book on the best available technologies ITS 37-2023. Coal mining and preparation], Moscow, Russia, 319 p.

MGEIK (2006) *Rukovodyashchie principy nacional'nyh inventarizacij parnikovyyh gazov. Podgotovleno Programmoj MGEIK po nacional'nyh kadastram parnikovyyh gazov* [IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories], vol. 2 Energy, ch. 4, p. 4.6, available at: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_4_Ch4_Fugitive_Emissions.pdf (accessed 19 September 2024).

Nacional'nyj doklad (2023) *Nacional'nyj doklad o kadastre antropogennyh vybrossov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikovyyh gazov ne reguliruemyyh Monreal'skim protokolom za 1990-2021 gg. Chast' I*, [National Report on the Anthropogenic Emissions from Sources and Removals by Sinks of the Greenhouse Gases not Controlled by the Montreal Protocol for the 1990-2021], part I, IGCE, Moscow, Russia, 479 p., available at: <http://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2022/> (accessed 27 September 2024).

Nacional'nyj doklad Respubliki Kazahstan (2022) *Nacional'nyj doklad Respubliki Kazahstan o kadastre antropogennyh vybrosov iz istochnikov i absorbcii poglotitelyami parnikovyh gazov, ne reguliruemym Monreal'skim protokolom o kadastre parnikovyh gazov za 1990-2020 gg.* [National Report on the Anthropogenic Emissions from Sources and Removals by Sinks of the Greenhouse Gases not Controlled by the Montreal Protocol for the 1990-2020], Almaty, 500 p., available at: <http://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2022/> (accessed 27 September 2024).

Pravitel'stvo RF (2023) *Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 20 oktyabrya 2023 g. № 2909-r* [Decree of the Government of the Russian Federation no. 2909-r dated October 20, 2023], available at: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202310230035> (accessed 19 September 2024).

Proekt (2024) «*O vnesenii izmenenij v Kodeks Rossijskoj Federacii ob administrativnyh pravonarusheniyah*». *Proekt Federal'nogo zakona* [Draft Federal Law 'On Amendments to the Code of the Russian Federation on Administrative Offences'], available at: <https://sozd.duma.gov.ru/bill/594956-8> (accessed 19 September 2024).

RKIK OON (2022) *Doklad Konferencii Storon, dejstvuyushchej v kachestve soveshchaniya Storon Parizhskogo soglasheniya, o rabote ee tret'ej sessii, sostoyavshejsya v Glazgo s 31 oktyabrya po 13 noyabrya 2021 goda. Chast' vtoraya: Mery, prinyatye Konferenciej Storon, dejstvuyushchej v kachestve soveshchaniya Storon Parizhskogo soglasheniya, na ee tret'ej sessii* [Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement on its third session, held in Glasgow from 31 October to 13 November 2021. Part two: Action taken by the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement at its third session], available at: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021_10_add1_adv.pdf (accessed 19 September 2024).

RKIK OON (2024) *Doklad Konferencii Storon, dejstvuyushchej v kachestve soveshchaniya Storon Parizhskogo soglasheniya, o rabote ee pyatoj sessii, sostoyavshejsya v Ob"edinennyh Arabskih Emiratah s 30 noyabrya po 13 dekabrya 2023 goda. Chast' vtoraya: Mery, prinyatye Konferenciej Storon, dejstvuyushchej v kachestve soveshchaniya Storon Parizhskogo soglasheniya, na ee pyatoj sessii* [Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement on its fifth session, held in the United Arab Emirates from 30 November to 13 December 2023. Part two: Action taken by the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement at its fifth session], available at: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2023_16a01E.pdf (accessed 19 September 2024).

Taylakov, O.V., Kormin, A.N., Gitarskiy, M.L., Taylakov, V.O. (2009) *Emissiya metana pri dobyche uglya v Rossii* [Methane emissions from coal mining in Russia], *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem* [Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling], vol. XXII, Moscow, Russia, pp. 216-227.

Ugol'naya baza (2003) *Ugol'naya baza Rossii*. [Coal Base of Russia], In V.F. Cherepovskiy (ed.), vols. 1-5, Geionformmark, Moscow, Russia.

EU (2022) *Annual European Union greenhouse gas inventory 1990-2020 and inventory report 2022*, Submission to the UNFCCC Secretariat. 27 May 2022, 961 p., available at: <http://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2022/> (accessed 27 September 2024).

Australia (2022) National Inventory Report 2020. *The Australian Government Submission to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, Australian National Greenhouse Accounts. May 2022, vols. 1-3, Commonwealth of Australia, available at: <http://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2022/> (accessed 27 September 2024).

Turkey (2022) *Turkish Greenhouse Gas Inventory 1990-2020. Annual Report for submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Turkish Statistical Institute. National Inventory Report for submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change, April 2022, 576 p., available at: <http://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2022/> (accessed 27 September 2024).

UNEP (2021) *Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions*. Nairobi: United Nations Environment Programme and Climate and Clean Air Coalition. United Nations Environment Programme, available at: <https://www.unep.org/ru/resources/doklad/vsemirnaya-ocenka-metana-vygody-i-zatraty-ot-snizheniya-urovnya-vybrosov-metana> (accessed 19 September 2024).

US (2022) *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2020*. United States Environmental Protection Agency, EPA 430-R-22-003, 841 p., available at: <http://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2022/> (accessed 27 September 2024).

Статья поступила в редакцию (Received): 04.08.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 01.10.2024.

Принята к публикации (Accepted): 13.10.2024.

Для цитирования / For citation:

Бердин, В.Х., Уледова, Н.В., Кевбрина, И.А., Миронов, А.А., Попов, Н.В., Третьяк, О.С., Бобылев, П.М., Кабанов, Н.С., Гитарский, М.Л. (2024) Актуализация оценок эмиссии метана в угледобывающей промышленности России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 4, с. 541-560, doi:10.21513/2410-8758-2024-4-541-560.

Berdin, V.Kh., Uledova, N.V., Kevbrina, I.A., Mironov, A.A., Popov, N.V., Tret'yak, O.S., Bobylev, P.M., Kabanov, N.S., Gitarskiy, M.L. (2024) The update of methane emission estimates for the coal mining sector in the Russian Federation, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 4, pp.541-560, doi:10.21513/2410-8758-2024-4-541-560.

**Исторические известия о климатических условиях,
погодных и природных явлениях на территории России
в письменных источниках XVII века:
опыт составления базы данных и перспективы изучения**

И.А. Кирпичников

Институт географии РАН,
РФ, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29

МГУ им. М.В. Ломоносова,
РФ, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

Адрес для переписки: ivkirs@mail.ru

Реферат. В статье представлены результаты работы по созданию пополняемой базы данных, содержащей информацию из письменных исторических источников о климатических условиях, погодных и природных явлениях на территории России в XVII веке. Предложена новая стратегия поиска палеоклиматических свидетельств, которая основана на значительном расширении круга исторических источников по сравнению с предшествующими каталогами и исследованиями. Наряду с летописными памятниками, которые традиционно использовались для получения информации о климате прошлого, активно привлекаются хорошо сохранившиеся для этого исторического периода материалы делопроизводственного характера (административная и дипломатическая документация) и источники личного происхождения (сочинения иностранных авторов, частная переписка). Для систематизации обнаруженных источниковых известий разработан дизайн базы данных, который обеспечивает простоту навигации, а также полноту, проверяемость и понятность представленной информации для пользователя. В результате работы выявлен и представлен в табличной форме значительный массив исторических свидетельств, которые охватывают практически все годы XVII столетия и отличаются географическим разнообразием; большинство из этих известий ранее не использовались в палеоклиматических исследованиях. На нескольких примерах проанализирована новая информация о климатических условиях, а также природных и погодных явлениях, которая содержится в публикуемой базе данных. Рассмотрены перспективы дальнейшего поиска и изучения палеоклиматических известий применительно к территории России XVII века: показано значение косвенных индикаторов природных условий, которые могут быть выявлены в письменных исторических источниках; оценен потенциал архивных поисков; отмечена потребность в лексикографическом изучении источниковых известий; акцентирована необходимость

интеграции полученных результатов с реконструкциями на основе данных природных палеоклиматических архивов.

Ключевые слова. Палеоклиматология, история климата, изменение климата, засуха, наводнение, осадки, экология, человек и природа, Московское государство, история России, XVII век.

**Historical documentary evidence related to climatic conditions,
weather and natural phenomena on the territory of Russia
in the seventeenth-century written historical sources:
construction of the database and research perspectives**

I.A. Kirpichnikov

Institute of Geography RAS,
29, Staromonetnyj lane, 119017, Moscow, Russian Federation

Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie gory, 119991, Moscow, Russian Federation

Correspondence address: *ivkirs@mail.ru*

Abstract. The article presents a database containing historical documentary evidence related to climatic conditions, weather, and natural phenomena on the territory of 17th-century Russia. A new strategy for searching for historical documentary evidence is proposed, which is based on a significant expansion of the range of primary historical sources compared to previous catalogs and studies. Along with historical chronicles (*letopisi*), which were traditionally used to obtain information about the climate of the past, this research actively involves bureaucratic documentation (administrative and diplomatic documents) and ego-documents (accounts of foreign voyagers and private correspondence). To systematize the discovered documentary evidence, a database design has been developed that ensures ease of navigation as well as completeness, verifiability, and understandability of the information. As a result of the work, we identify and present in tabular form a significant array of new documentary evidence from primary historical sources that were not previously used in paleoclimatic studies. On a number of examples, we analyze new information on climatic conditions as well as natural and weather phenomena, that is contained in the database. Finally, we consider the prospects for future research of historical documentary evidence, including the possibility of archival research, the significance of indirect (proxy) data, the need for lexicographic study of documentary evidence, and the necessity of integrating the data obtained into a multidisciplinary paleoclimatological reconstruction.

Keywords. Paleoclimatology, history of climate, climate change, drought, flood, precipitation, ecology, man and nature, Muscovy, history of Russia, XVII century.

Введение

В последние десятилетия в мировой науке происходит интенсивное накопление информации о климатических условиях, погодных и природных явлениях прошлого. Значительную роль в этом процессе играют выявление и систематизация сведений письменных исторических источников (Nash et al., 2021). Как показывает недавний обзор, сегодня в распоряжении исследователей находится целый ряд баз данных, которые охватывают различные географические регионы и хронологические периоды (Burgdorf, 2022). Особую ценность эти материалы имеют для эпохи до начала инструментальных наблюдений. Собранные свидетельства широко используются для проведения комплексных палеоклиматических реконструкций (Brázdil et al., 2022).

Систематическая работа по введению в научный оборот новых источниковых данных о климате на территории России для эпохи до инструментальных наблюдений, начавшихся в Санкт-Петербурге во второй четверти XVIII в. (Бедрицкий и др., 1997), является актуальной задачей. Отечественная традиция таких исследований, восходящая к дореволюционному времени, основана на изучении, главным образом, летописных памятников. Первые своды палеоклиматических известий, почерпнутых из русских летописей, появились в работах М.А. Боголепова (1908) и И.Е. Бучинского (1954). Наиболее полный на сегодняшний день каталог летописных свидетельств представлен в фундаментальном труде Е.П. Борисенкова и В.М. Пасецкого (1983)¹⁾, к которому активно обращаются специалисты из различных областей знания, в том числе географы (Cook et. al., 2020). Между тем, одно из ключевых затруднений состоит в том, что во второй половине XVI-XVII вв. памятники летописания утрачивают прежнее значение и не содержат достаточного объёма информации для палеоклиматических реконструкций (Боголепов, 1908, с. 9-10; Важов, 1961, с. 6-7). Е.П. Борисенков и В.М. Пасецкий справедливо отметили, что для преодоления этого ограничения необходимо расширение источниковой базы (1983, с. 70-71). Такие попытки до сих пор были предприняты только в монографии В.С. Мыглана (2010) применительно к Сибири, а также в нескольких работах географов и историков, посвященных отдельным регионам и периодам (Корецкий, 1975; Мининков, 1998; Прохоров, 2016; Chernavskaya 1994, 1996). Некоторый опыт систематизации разнородных материалов может быть почерпнут из исследований гидрологических (Савенкова, 2014), астрономических (Святский, 2007) и сейсмических (Мокрушина и др., 2009; Новый..., 1977; Шихсаидов, Исмаилов, 1979) явлений.

В настоящей статье представлены результаты работы по созданию пополняемой базы исторических свидетельств о климатических условиях, погодных и природных явлениях на территории России (Московской Руси) и некоторых сопредельных регионов в XVII столетии. Как будет продемонстрировано, существенное расширение круга используемых письменных источни-

¹⁾ См. также (Борисенков, Пасецкий, 1988, 2002; Borisenkov, 1994, 1995).

ков позволило выявить значительный массив новых сведений, которые ранее не использовались в палеоклиматологических исследованиях. В статье предложен дизайн табличной базы данных для систематизации собранных свидетельств. База данных размещена на специальной интернет-странице Института географии РАН²⁾.

Источники

Характер интереса к природным явлениям в России XVII в. В странах Западной и Центральной Европы документирование сведений о природных явлениях, имевшее место ещё в Средневековье, с конца XV в. стало распространённым учёным занятием. Ярким свидетельством этого увлечения являются сохранившиеся дневники погоды, составители которых, интеллектуалы из разных стран, систематически фиксировали результаты своих наблюдений за состоянием окружающей среды и атмосферы (Domínguez-Castro, 2015; Pfister et al., 1999). Такая научная практика не была характерна для жителей Московской Руси, хотя имеются отдельные свидетельства формирования самоценного интереса к природе. Погодные явления становились предметом внимания главным образом из досужего любопытства или повседневных жизненных обстоятельств (прежде всего, в связи с негативными последствиями для хозяйственной деятельности), а также в поисках божественных предзнаменований будущих событий (Богданов, Шамин, 2003; Ужанков, 1995). Фундаментальное изменение познавательных установок произошло только в эпоху Петра I (т.е. в конце XVII – начале XVIII в.), который сам с большим интересом проводил метеорологические наблюдения (Бедрицкий и др., 1997, с. 8-16). Как следствие, сведения о климате, погодных и природных явлениях разбросаны по множеству разнообразных письменных источников, ни один из которых не создавался со специальной целью систематизации этих данных.

Общая характеристика источниковой базы. Два события выступают ключевыми водоразделами, которые определили состояние источниковой базы по русской истории раннего Нового времени. Во-первых, в третьей четверти XVI в. прекратилось официальное летописание, и с этого момента вклад летописей в знание об общерусском прошлом снижается. В работе специалиста по XVII столетию летописи теряют прежнее привилегированное положение и на первый план выходят другие типы источников. Отметим, что в русской письменной традиции этой эпохи весьма ограниченно представлены и преемники летописного жанра – памятники мемуарного и дневникового характера (которые являются важными источниками информации о природных явлениях для других регионов Европы раннего Нового времени). Во-вторых, в 1626 г. произошёл большой московский пожар, в огне которого погибли архивы многих правительственных учреждений. Исследователи «допожарного» и «послепожарного» периодов находятся в принципиально

²⁾ Исторические известия о климате XVII века [Электронный ресурс]. URL: <http://hist-clim.igras.ru/> (дата обращения: 01.06.2024).

различном положении. Общее количество источников по русской истории с древности до 1626 г. исчисляется лишь несколькими тысячами, и абсолютное большинство из них опубликованы. Историк «послепожарного» времени, напротив, сталкивается с необозримыми массивами материалов, которые продолжают постепенно вводиться в научный оборот.

Описанное состояние источниковой базы определяет логику поиска новых палеоклиматических свидетельств применительно к территории России XVII в. Необходимой задачей является выход за рамки летописной традиции и привлечение новых материалов. Прежде всего, речь идёт о сочинениях иностранных авторов, частной переписке и делопроизводственной документации. Кратко охарактеризуем каждую из групп источников, использованных при составлении базы данных, а также прокомментируем возможности и ограничения работы с содержащимися в них сведениями. Основное внимание в данном разделе уделяется опубликованным источникам; в заключении к статье будут высказаны также некоторые замечания о перспективах архивного поиска. Приводимый здесь перечень источников, безусловно, не является исчерпывающим.

Летописи. Сохранившиеся летописные памятники с известиями за XVII в. имеют в основном региональный характер. Представлены данные по юго-западному (Поднепровье), северо-западному (Новгородская и Псковская земли) и северному (Поморье) регионам, в то время как климат и погода центральных, южных и сибирских (несмотря на наличие местной летописной традиции) уездов практически не охвачены вниманием летописцев. Изложение событий по годам в ряде случаев ограничивает возможности точной датировки описываемых событий; кроме того, некоторые известия могут быть локализованы лишь приблизительно, исходя из общих предположений о месте создания летописи. Далеко не всегда возможно установить, записано ли свидетельство очевидцем или передано по слухам. Как и в более ранний период (Комендова, 2022), летописцы XVII в. фиксировали главным образом экстремальные и катастрофические явления, которые выходили за рамки повседневного опыта. Необходимо иметь в виду, что для этого вида источников особенно характерны сенсационализм (неверифицируемые утверждения о беспрецедентности описываемых событий) и связанное с ним стремление интерпретировать природные феномены в религиозно-символическом ключе³⁾.

Основной массив палеоклиматических известий русских летописей собран в монографии Е.П. Борисенкова и В.М. Пасецкого (1983), которые осуществили сплошной просмотр томов «Полного собрания русских летописей», изданных на 1983 г. Работа исследователей по выявлению и публикации

³⁾ Данный аспект, как представляется, заслуживает большего внимания в палеоклиматических исследованиях, особенно при работе с известиями ранних летописных сводов. В последние десятилетия неоднократно подчёркивалось, что летописи могут содержать сложные аллюзии (прежде всего, библейские или апокрифические) и скрытые цитаты, выявление и интерпретация которых должны предшествовать изучению фактологической стороны известия.

новых летописных материалов с тех пор продолжается, что позволяет в отдельных случаях пополнить коллекцию этих свидетельств.

Сочинения иностранцев. Дипломаты, военные и путешественники из разных стран Европы и Азии оставили обширный комплекс текстов о России, порядка двухсот из которых опубликованы в переводе на русский язык (Западноевропейские..., 2018). Значение этих сочинений для палеоклиматических исследований подчеркнул И.Е. Бучинский (1954, с. 104-123). Записанные иностранцами впечатления о повседневных погодных перипетиях сухопутных, речных и морских маршрутов (за редкими исключениями, по европейской части России) представляют большую ценность. Необходимо, однако, с осторожностью относиться к более общим заключениям таких авторов относительно (не)типичности тех или иных природных явлений для местного контекста. Характерный пример – частые указания на экстремально холодные зимы. Подобные оценки могут свидетельствовать о непривычности погодных условий, в которых оказывался иностранец в момент своего визита, но лишь немногие из прибывших проводили в России достаточно долгий срок, чтобы иметь возможность сравнить несколько зимних периодов. Кроме того, важно учитывать, что представление о суровости русского климата довольно рано стало в европейской традиции одним из некритически воспроизводимых общих мест.

Особого упоминания заслуживают англоязычные дневники шотландца Патрика Гордона (1635-1699). Недавно было завершено многотомное академическое издание этого уникального источника на русском языке. Вторую половину жизни Гордон провёл на службе московским царям и принимал деятельное участие в ключевых военных кампаниях. Сведения о погодных явлениях часто появляются среди ежедневных записей военачальника в тех случаях, когда они влияли на организацию походов или ведение боевых действий.

Частная переписка. К настоящему времени выявлены и опубликованы несколько тысяч личных писем (большинство из них относятся к последним десятилетиям XVII в.), которые содержат богатые сведения о повседневных делах и бытовых заботах представителей различных социальных групп Московской Руси (Новохатко, 2018). Особого внимания заслуживают материалы хозяйственной переписки крупных собственников с приказчиками (управляющими) разбросанных по разным регионам землевладений. Среди других местных новостей в письмах встречаются и сообщения о неурожаях в связи с природными условиями (Новосельский, 1929, с. 91-99). Хотя нельзя полностью исключить возможность искажения информации со стороны приказчиков, подобные попытки едва ли были частыми. Такие известия не только могут быть уверенно датированы и локализованы, но в отдельных случаях дают синхронную картину по нескольким регионам. Наиболее значимыми в свете настоящей работы являются комплексы хозяйственной переписки из архивов боярина Б.И. Морозова и стольника А.И. Безобразова.

Делопроизводство. В России раннего Нового времени получили широкое развитие практики бюрократического документирования различных обла-

стей государственной жизни. Фонды правительственных учреждений «послепожарного» (после пожара 1626 г.) времени, сосредоточенные в Российском государственном архиве древних актов (РГАДА), хранят огромные массивы делопроизводственных источников, которые лишь в небольшой степени освоены исследователями. При таком положении дел возможности эффективного поиска палеоклиматических известий весьма ограничены. Е.П. Борисенков и В.М. Пасецкий (1983) эпизодически использовали при составлении своего свода опись материалов архива. Однако необходимая информация содержится в описи лишь в тех редких случаях, когда погода является основной темой описываемого документа. Кроме того, В.С. Мыглан (2010) обратился к работам историков, которые ввели в научный оборот значительный объём архивных данных о земледельческом и промысловом освоении Сибири в контексте суровых климатических условий. Такие специальные исследования хозяйства могут играть важную вспомогательную роль при выявлении архивных известий о природных явлениях, но они в гораздо меньшей степени представлены для других регионов России XVII в.

В документах административного управления и учёта палеоклиматические свидетельства встречаются прежде всего в связи с проблемами налогообложения. В частности, распространены сообщения о невозможности выполнения податных обязательств в связи с неурожаем, который, в свою очередь, вызван погодными условиями. При работе с этими свидетельствами необходимо иметь в виду формулярные особенности делопроизводственных документов. Например, часто встречающиеся фразы о «конечном разорении» и отсутствии пропитания представляют собой элементы стандартного речевого этикета XVII в. и вовсе необязательно должны интерпретироваться как указания на крайне бедственное положение просителя.

Ценные палеоклиматические свидетельства могут быть найдены в архиве Посольского приказа (дипломатического ведомства). Среди опубликованных материалов важные сведения содержат документы сношений с донскими казаками, использованные Н.А. Мининковым (1998) для характеристики природных условий в нижнем течении Дона в XVI-XVII вв. Кроме того, большой интерес представляют статейные списки (донесения) посольств в Китай Н. Спафария (1675-1677) и Ф.А. Головина (1686-1689), в которых часто описываются препятствия погодного характера, встреченные в ходе этих дипломатических экспедиций.

Особняком среди делопроизводства XVII в. стоят «Дневальные записки приказа Тайных дел» – памятник, который по типу данных близок к европейским дневникам погоды (Chernavskaya, 1994). На потенциал этого источника для палеоклиматических реконструкций обратил внимание публикатор С.А. Белокуров, а Е.П. Борисенков и В.М. Пасецкий включили в свой свод избранные свидетельства из него «в обобщённом виде» (1983, с. 71). Одну из возможных методик анализа этих известий, основанную на сопоставлении частоты упоминаний показателей погоды с данными XX в. за аналогичные временные периоды, предложили В.В. Канищев и Ю.А. Мизис (2014). Дневальные (повседневные) записки представляют собой записи дневникового

типа, которые велись подьячими (канцелярскими служащими) и содержали, помимо разнообразных сведений о московских событиях, субъективные оценки погоды и даже водомерные наблюдения. Распоряжение царя Алексея Михайловича о составлении подобных записей было отдано ещё в 1650 г., однако сохранились только материалы с 1657 г. Полностью представлены 1662, 1666, 1667 гг.; с января по август – 1657, 1660, 1663, 1668, 1673 гг.; с сентября по декабрь – 1659, 1661, 1665, 1672, 1674 гг. Практика письменной фиксации визуальных метеорологических наблюдений возобновилась в 1695–1696 гг., когда силами приближённых Петра I началось ведение «походных журналов» (Борисенков, Пасецкий, 1983, с. 72; Майкова; Chernavskaya, 1994, 1996). С этого времени количество источников такого типа неуклонно возрастает (Бедрицкий и др., 1997, с. 14–16). Всего известные к настоящему времени материалы позволяют выявить несколько тысяч поденных записей XVII в., образующих непрерывные ряды однородных данных за отдельные периоды. Формализация этих свидетельств является самостоятельной задачей, которая выходит за рамки настоящей работы.

База данных

Главными требованиями к дизайну базы данных являлись простота навигации, а также полнота, проверяемость и понятность представленной информации для пользователя, который может не являться профессиональным историком.

Простота навигации обеспечивается стандартным табличным дизайном. Мы не прибегали к более сложной формализации данных ввиду ограниченности количества палеоклиматических известий, которые потенциально могут быть выявлены в источниках XVII в. Применение методов автоматизированной количественной обработки при таком небольшом объёме разнородных данных представляется маловероятным. Свидетельства источников дневникового типа, которые содержат непрерывные ряды однородных данных, будут в дальнейшем формализованы в рамках отдельной базы данных, а наиболее значимые сведения из них – включены в общую таблицу. Отметим, что для облегчения навигации введён специальный столбец с категорией природного явления, о котором идёт речь в приводимом известии⁴⁾.

Полнота представленной информации достигается путём воспроизведения целостных фрагментов исходных текстов. Если в доцифровую эпоху ввиду необходимости экономии места исследователи сочетали сокращённый пересказ (т.е. первичную интерпретацию) с цитированием отдельных фраз (Борисенков, Пасецкий, 1983), что с неизбежностью приводило к искажениям, мы следовали современной норме полного воспроизведения источниковых свидетельств. Такой подход позволяет минимизировать субъективное влияние составителя базы данных. В целях удобства известия одного источ-

⁴⁾ Схожее решение использовано в работе (Мыглан, 2010).

ника, относящиеся к разным периодам в рамках одного года, могут быть приведены совместно в одной строке базы данных.

Проверяемость подразумевает приведение необходимых сведений о характерных особенностях, авторстве, времени и обстоятельствах создания конкретного документа, который содержит обнаруженное палеоклиматическое известие, а также ссылок на место архивного хранения или публикации. Составители сводов палеоклиматических свидетельств нередко опирались на каталоги предшественников или сведения вторичной литературы, что затрудняет поиск первоисточников. В предлагаемой базе данных в абсолютном большинстве случаев содержатся ссылки на академические публикации исходных текстов и иногда – на специализированную литературу.

Понятность текста источника XVII в. обеспечивается специальными усилиями по подготовке справочного аппарата. Язык этой эпохи как правило ясен для неподготовленного читателя и только иногда требуется перевод отдельных слов или целых предложений на современный русский язык (свидетельства иностранцев цитируются по переводам). Важно отметить, что знаки препинания в памятниках XVII в. в большинстве случаев расставляются публикатором (система пунктуации только формировалась), поэтому нельзя полностью исключить возможности искажения смысла текста. Годы от сотворения мира (византийской эры) переводятся в современное летоисчисление⁵⁾. Даты по старому стилю (юлианскому календарю) сохраняются в таблице во избежание неточностей, и для перерасчёта в новый стиль (григорианский календарь) в XVII в. необходимо прибавить 10 дней. Если в источнике известии содержатся точные даты, в специальном столбце представлен их перевод на новый стиль. Применительно к иностранным источникам не во всех случаях можно с уверенностью судить о календаре, которым пользовался автор. Церковные праздники, служившие в Московской Руси естественным хронологическим ориентиром, датируются по справочнику (Черепнин, 1944). Географические рамки базы данных заданы не строго и определяются логикой источников, поэтому охватывают как историческую территорию Московской Руси, так и некоторые сопредельные земли. В некоторых случаях для облегчения ориентирования в особом столбце указывается привязка к современному административно-территориальному делению.

В актуальном варианте табличной базы данных представлены следующие столбцы: (1) год; (2) дата и месяц (по старому стилю); (3) дата и месяц (по новому стилю, при наличии в известии точной даты); (4) регион; (5) категория явления; (6) известие: цитата из исторического источника; (7) характеристика исторического источника; (8) библиографическая ссылка на публикацию исторического источника, его архивный шифр или упоминание в

⁵⁾ Новый год в Московской Руси начинался с 1 сентября, поэтому из цифрового обозначения года в источнике вычитается 5508 – если событие произошло между 1 января и 31 августа, и 5509 – если событие произошло между 1 сентября и 31 декабря. Если известен только год от сотворения мира и уточнить датировку не получается, указываются оба возможных варианта (например, 1657/58 г.).

литературе; (9) особые примечания по поводу известия; (10) номер известия в рамках таблицы; (11) данные других реконструкций.

Результаты

Общая характеристика результатов. Главным итогом проделанной работы стало составление базы данных, которая на момент завершения статьи содержит более 500 строк с известиями из письменных исторических источников. Данный результат достигнут благодаря просмотру десятков тысяч страниц и листов нескольких сотен разнообразных текстов. Большая часть выявленных известий ранее не использовались в палеоклиматологических работах: пересечение с наиболее полным из предшествующих сводов (Борисенков, Пасецкий, 1983) составляет не более 20%. Обнаруженные свидетельства охватывают практически все годы XVII в. Важным отличием от более ранних каталогов является широкое географическое разнообразие представленных известий, которые покрывают районы Восточно-Европейской равнины, Крыма, Кавказа, Сибири и Дальнего Востока. Собранные свидетельства имеют различное временное разрешение – от конкретного времени суток до более длительных периодов (месяц, год) – или могут содержать общую характеристику местных климатических условий без конкретной хронологической привязки.

Новые данные. Публикуемая база данных вводит в научный оборот новые сведения о самом широком круге природных явлений. Проведённая работа показывает, что даже феномены, которые традиционно находились в фокусе внимания специалистов по палеоклиматологии, далеко не в полной мере отражены в предшествующих сводах. Так, расширение круга источников позволило выявить ряд не отмеченных в каталогах периодов засухливости. В качестве примера обратимся к сильной засухе 1681 г., следствием которой являлся неурожай в европейской части России. Серия сообщений приказчиков А.И. Безобразова из разных регионов позволяет получить ясную картину этого бедствия. Приведём характерный фрагмент донесения приказчика с. Спасского (современная Калужская область): «А у нас, государь, волею Божию рошь з жеров высохла, и ярь и трава – все зосохла, а иконы Богородицу и пророка Илью подымали двожди и около поль твоих ходили». Аналогичное донесение из д. Завалова (современная Орловская область) позволяет установить момент начала засухливого периода и показывает его последствия: «А дожжов, государь, у нас с Николина дни [9 (19) мая] и по се число [8 (18) августа] не бывало, еровые хлебы выгорели, ячмени ничего и маку нет, сваялся, онис взошол было хорошо, от засухи замер». Подобные известия поступили также от управляющих с территорий современных Вологодской, Нижегородской и Ярославской областей. Отметим, что весенне-летняя засуха 1681 г. фиксируется и в других странах Европы (Camenisch, Salvisberg, 2020).

В ходе работы выявлен значительный объём новой информации о гидрологических явлениях. Наиболее полные сведения собраны исследователями для Москвы-реки: иностранные авторы записали свои впечатления о крупных

весенних наводнениях 1607, 1655 и 1687 гг., а «Дневальные записки приказа Тайных дел» содержат данные о времени прохождения половодий за ряд лет и измерения уровня воды (Савенкова, 2014). В источниках нередко известия о пересыханиях, паводках, половодьях, наводнениях и ледовом режиме водоёмов в других регионах. Так, польские наблюдатели зафиксировали вскрытие Волги и Которосли 15 (25) апреля, а Белого озера – 23 мая (2 июня) 1607 г.; П. Гордон записал в дневник информацию о «прохождении» Днепра в районе Киева 29-30 марта (8-9 апреля) 1684 г. и 7 (17) апреля 1685 г.; Пётр I писал матери, что 20 (30) апреля 1689 г. закончился ледостав на Плещеевом озере. В послании царю Алексею Михайловичу, написанном в конце июня (начале июля н.ст.) 1652 г., патриарх Никон сообщал об аномальном обмелении Волги на маршруте от с. Рыбного (Рыбинска) до Углича. Последнему известию соответствуют данные о маловодье на Оке и засухах в нескольких регионах в тот же период.

Если внимание составителей предшествующих сводов было сосредоточено на экстремальных природных явлениях, мы рассматриваем любые указания на погодные условия как источник потенциально значимой палеоклиматической информации. Например, отрывочные упоминания «глубокого снега» и лыжных военных экспедиций в дневнике польско-литовского военачальника Яна-Петра Сапеги в отсутствие других данных свидетельствуют по меньшей мере о том, что зима 1609 г. в центральных районах России не была бесснежной. В совокупности эти записи дают вполне ясную картину устойчивого снежного покрова с февраля по апрель 1609 г. Кроме того, в дневнике можно найти даты позднего весеннего выпадения твердых осадков 28 мая (7 июня) и первого осеннего снега 8 (18) октября 1609 г. Таким образом, первостепенные задачи при составлении и пополнении публикуемой базы данных – выявление и качественная систематизация как можно большего количества релевантных сведений, отбор и интерпретация которых предоставлены будущим исследователям. Рассмотрим теперь некоторые перспективы дальнейшего поиска и изучения палеоклиматических известий.

Перспективы исследования

Косвенные данные. Помимо прямых описаний погоды, заслуживает внимания информация, которая может служить косвенным индикатором природных условий. Систематическое изучение маршрутов землепроходцев и мореходов XVII в., которые отражены в их донесениях, позволяет сделать предположения об изменении ледового режима сибирских водоёмов (Борисенков, Пасецкий, 1983, с. 111-112). М.М. Дадыкиной (2016) удалось на основе книг судового хода (реестров расходов на плавание) Спасо-Прилуцкого монастыря реконструировать сроки навигации по Сухоно-Двинскому пути, которые определялись временем вскрытия рек. Исследовательница констатировала более позднюю отправку судов в начале и в конце XVII в. и связала эти наблюдения с похолоданиями. О неблагоприятном климатическом контексте могут свидетельствовать сообщения о пожарах, а также масштаб-

ных неурожаях, причины которых не обозначены в источниках. В качестве косвенного показателя природных условий традиционно используются также цены на сельскохозяйственные продукты (Ljungqvist et al., 2022), однако использование этого индикатора применительно к истории России XVII в. пока затруднительно ввиду недостаточной разработанности вопросов ценообразования и функционирования местных рынков.

Архивный поиск. Наиболее перспективное, но весьма трудоёмкое направление поисковой работы – выявление палеоклиматических свидетельств в неопубликованных архивных материалах. Выше была обозначена главная сложность на этом пути: обширность массивов документации, не введенных в научный оборот, при отсутствии подробных архивных описей. Полученный опыт позволяет наметить некоторые первоначальные маршруты такого поиска. Наиболее вероятно обнаружение палеоклиматических известий в источниках, создатели которых вынуждены были учитывать погодные условия в силу характера своей практической деятельности. К занятиям такого рода, оставлявшим после себя документальный след, относятся, прежде всего, организация военного дела и дипломатические экспедиции. Заслуживают внимания, в частности, описания путешествий московских дипломатов, которые сохранились в составе неопубликованных посольских книг XVII в. (Рогожин, 1990). Отметим, что эффективное выявление палеоклиматических свидетельств в разрозненных архивных источниках возможно при расширении участия историков, которые, занимаясь собственными темами, обычно не обращают внимания на описания природных явлений. Одним из способов такого вовлечения специалистов является публикация базы данных в онлайн-формате, открытом для модерируемого пополнения другими пользователями.

Русские источники в исследованиях других регионов. Хотя материалы из отечественных архивных и библиотечных хранилищ постепенно начинают использоваться в международных палеоклиматических исследованиях (Необычные..., 2017-2020; Brönnimann, 2023), эта тенденция пока практически не затронула русские источники XVII в. Поскольку московские дипломаты широко путешествовали по миру, систематический поиск позволит выявить значительное количество известий о природных условиях различных регионов Европы и Азии. Внимания заслуживает, например, документация «Великого посольства» Петра I 1697-1698 гг. (Гуськов, 2005). В «Вестях-Курантах» – рукописной газете, которая составлялась в Посольском приказе и содержала отобранные для придворной элиты новости из европейских источников, – также можно найти целый ряд переводных известий о природных явлениях (Богданов, Шамин, 2003).

Лексикографическое изучение. Первичный анализ палеоклиматических известий в русских письменных источниках позволяет реконструировать лексический репертуар, который использовался для описания природных явлений. Составление такого прикладного «словаря» позволяет, среди прочего, в будущем упростить автоматизированный поиск информации в оцифрованных источниках, а также уточнить значения некоторых слов и выражений. Лекси-

ческий анализ обнаруживает устойчивые феномены, названия которых вышли из употребления. Характерный пример – оригинальное слово «хуртина», встречающееся в русских описаниях Азовских походов. Сопоставление с дневником П. Гордона позволяет установить, что данный термин обозначал ветровой нагон в устье Дона, приводивший к затоплению низин.

Комплексные реконструкции. Письменные исторические материалы являются одним из множества источников палеоклиматических сведений. В последние десятилетия достигнут значительный прогресс на пути естественнонаучного изучения природных архивов. Отметим, например, новейшие работы по созданию температурных реконструкций для всего голоцена (Kaufman et al., 2020), тысячелетних реконструкций температуры (Hantemirov et al., 2022) и засушливости (Büntgen et al., 2021) высокого разрешения на основе древесно-кольцевых архивов, пространственные реконструкции температуры (Anchukaitis et al., 2017) и засушливости (Cook et al., 2020). Отдельно выделим реконструкции температуры и засушливости для территории Европейской России (Соломина и др., 2017; Cook, 2020; Dolgova, 2016; Solomina et al., 2022), которые могут непосредственно сопоставляться с базой данных, описанной в настоящем исследовании. Перспективными представляются не только систематическое сравнение, но и интеграция новых результатов, полученных при анализе письменных исторических источников, в комплексные реконструкции на основе различных природных палеоклиматических архивов. Семнадцатое столетие, которое традиционно рассматривается как эпоха глобального кризиса, вызванного климатическими изменениями (Parker, 2013), представляет особый интерес для такого исследования.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-17-00264).

Список литературы

- Бедрицкий, А.И., Борисенков, Е.П., Коровченко, А.С., Пасецкий, В.М. (1997) *Очерки по истории гидрометеорологической службы России*, т. 1, СПб., Гидрометеиздат, 363 с.
- Богданов, А.П., Шамин, С.М. (2003) Природные явления в царствование Федора Алексеевича и человеческое сознание (по газетной информации Посольского приказа), *Историческая экология и историческая демография*, М., РОССПЭН, с. 239-255.
- Боголепов, М.А. (1908) *О колебаниях климата Европейской России в историческую эпоху*, М., Типография И.Н. Кушнерева и К°, 112 с.
- Борисенков, Е.П., Пасецкий, В.М. (2002) *Летопись необычайных явлений природы за 2.5 тысячелетия*, СПб., Гидрометеиздат, 536 с.
- Борисенков, Е.П., Пасецкий, В.М. (1988) *Тысячелетняя летопись необычайных явлений природы*, М., Мысль, 528 с.

Борисенков, Е.П., Пасецкий, В.М. (1983) *Экстремальные природные явления в русских летописях XI-XVII вв.*, Л., Гидрометеиздат, 240 с.

Бучинский, И.Е. (1954) *Очерки климата Русской равнины в историческую эпоху*, Л., Гидрометеиздат, 88 с.

Важов, В.И. (1961) Повторяемость засух на Русской равнине в историческую эпоху, *Изв. Крымского отд. Географического общества СССР*, вып. 7, с. 13-24.

Гуськов, А.Г. (2005) *Великое посольство Петра I. Источниковедческое исследование*, М., ИРИ РАН, 398 с.

Дадыкина, М.М. (2016) Управляя пространством: организация Спасо-Прилуцким монастырем водных коммуникаций и их структура (XVI-XVII вв.), *Quaestio Rossica*, т. 4, № 3, с. 123-140, doi: 10.15826/qr.2016.3.179.

Западноевропейские авторы XV-XVII вв. о России (2018) Материалы к библиографическому словарю, сост. П.Д. Малыгин, отв. ред. П.Г. Гайдуков, М., ИА РАН, 192 с.

Канищев, В.В., Мизис, Ю.А. (2014) К вопросу о методах историко-климатических исследований: московские погоды в середине XVII и середине XX вв., *История и современность*, вып. 2 (20), с. 17-23.

Комендова, Й. (2022) Необычные природные явления в древнерусской и чешской историографии XII-XIII вв. в сравнительной перспективе, *Slověne*, т. 11, № 2, с. 7-27, doi: 10.31168/2305-6754.2022.11.2.1.

Корецкий, В.И. (1975) *Формирование крепостного права и первая крестьянская война в России*, М., Наука, 388 с.

Майкова, Т.С. (1969) Военные «Юрнали» петровского времени (По материалам ЦГАДА), *Вопросы военной истории России XVIII и первой половины XIX века*, М., Наука, с. 368-390.

Мининков, Н.А. (1998) *Донское казачество в эпоху позднего средневековья (до 1671 г.)*, Ростов-на-Дону, Издательство Ростовского университета, 510 с.

Мокрушина, Н.Г., Никонов, А.А., Флейфель, Л.Д. (2009) Сейсмический казус: «Уральское» землетрясение 1693 г., *Вопросы инженерной сейсмологии*, т. 36, № 3, с. 55-60.

Мыглан, В.С. (2010) *Климат и социум Сибири в малый ледниковый период*, Красноярск, СФУ, 230 с.

Необычные и экстремальные явления XVIII века (2020) Сост. С.Ю. Нечаев, СПб., БАН, вып. 1-3.

Новосельский, А.А. (1929) *Вотчинник и его хозяйство в XVII в.*, М., Госиздат, 192 с.

Новохатко, О.В. (2018) *Частная переписка XVII века*, М., Памятники исторической мысли, 663 с.

Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. (1977) М., Наука, 536 с.

Прохоров, Д.А. (2016) Последствия природных катаклизмов и стихийных бедствий на Крымском полуострове в описаниях авторов и документах XVII-XVIII вв., *Боспорские исследования*, № 33, с. 319-347.

Рогожин, Н.М. (1990) *Обзор посольских книг из фондов-коллекций, хранящихся в ЦГАДА (конец XV – начало XVIII вв.)*, М., Институт истории СССР, 237 с.

Савенкова, В.М. (2014) *История изучения ледовых явлений на реках Европейской части России*, Дисс. ... канд. геогр. наук, М., Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, 164 с.

Святский, Д.О. (2007) *Астрономия Древней Руси*, М., Русская панорама, 664 с.

Соломина, О.Н., Бушуева, И.С., Долгова, Е.А. и др. (2017) *Засухи Восточно-Европейской равнины по гидрометеорологическим и дендрохронологическим данным*, М., СПб., Нестор-История, 360 с.

Ужанков, А.Н. (1995) Эволюция пейзажа в русской литературе XI – первой трети XVIII вв., *Древнерусская литература: изображение природы и человека*, М., Наследие, с. 19-87.

Черепнин, Л.В. (1944) *Русская метрология*, М., 1-я тип. Трансжелдориздата, 94 с.

Шихсаидов, А.Р., Исмаилов, А.Ш. (1979) Анализ исторических данных о разрушительных землетрясениях середины XVII в. в Южном Дагестане, *Геодинамика и сейсмичность территории Дагестана*, Махачкала, Даг. фил. АН СССР, с. 50-55.

Anchukaitis, K.J, Wilson, R., Briffa, K.R. et al. (2017) Last Millennium Northern Hemisphere Summer Temperatures from Tree Rings: Part II, Spatially Resolved Reconstructions, *Quaternary Science Reviews*, vol. 163, pp. 1-22, doi: 10.1016/j.quascirev.2017.02.020.

Borisenkov, Y.P. (1994) Climatic and Other Natural Extremes in the European Territory of Russia in the Late Maunder Minimum (1675-1715), *Climatic Trends and Anomalies in Europe 1675-1715*, in Frenzel, B., Pfister, C., Glaeser, B. (eds.), Stuttgart, Jena, New York, Gustav Fischer Verlag, pp. 83-94.

Borisenkov, Y.P. (1995) Documentary evidence from the U.S.S.R, *Climate since the A.D. 1500*, in Bradley, R.S., Jones, P.D. (eds.), London and New York, Routledge, pp. 171-183, doi: 10.4324/9780203430996.

Brázdil, R., Dobrovolný, P., Mikšovský, J., Pišoft, P., Trnka, M., Možný, M., Bialek, J. (2022) Documentary-based climate reconstructions in the Czech Lands 1501-2020 CE and their European context, *Clim. Past*, vol. 18, issue 4, pp. 935-959, doi: 10.5194/cp-18-935-2022.

Brönnimann, S. (2023) The weather diary of Georg Christoph Eimmart for Nuremberg, 1695-1704, *Clim. Past*, vol. 19, issue 7, pp. 1345-1357, doi: 10.5194/cp-19-1345-2023.

Burgdorf, A.-M. (2022) A global inventory of quantitative documentary evidence related to climate since the 15th century, *Clim. Past*, vol. 18, issue 6, pp. 1407-1428, doi: 10.5194/cp-18-1407-2022.

Büntgen, U., Urban, O., Krusic, P.J. et al. (2021) Recent European drought extremes beyond Common Era background variability, *Nat. Geosci.*, vol. 14, pp. 190-196, doi: 10.1038/s41561-021-00698-0.

Camenisch, C., Salvisberg, M. (2020) Droughts in Bern and Rouen from the 14th to the beginning of the 18th century derived from documentary evidence, *Clim. Past*, vol. 16, issue 6, pp. 2173-2182, doi: 10.5194/cp-16-2173-2020.

Chernavskaya, M. (1994) The climate of the Russian plain according to the diary of Peter the Great, and the weather records of Czar Aleksey's court, *Climatic Trends and Anomalies in Europe 1675-1715*, in Frenzel, B., Pfister, C., Glaeser B. (eds.), Stuttgart, Jena, New York, Gustav Fischer Verlag, pp. 74-81.

Chernavskaya, M. (1996) Weather Conditions of 1695-96 in European Russia, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 35, issue 7, pp. 1059-1062.

Cook, E.R., Solomina, O., Matskovsky, V. et al. (2020) The European Russia Drought Atlas (1400-2016 CE), *Clim. Dyn.*, vol. 54, issue 3-4, pp. 2317-2335, doi: 10.1007/s00382-019-05115-2.

Dolgova E. (2016) June-September temperature reconstruction in the Northern Caucasus based on blue intensity data, *Dendrochronologia*, vol. 39, pp. 17-23, doi: 10.1016/j.dendro.2016.03.002.

Domínguez-Castro, F., García-Herrera, R., Vaquero, J.M. (2015) An early weather diary from Iberia (Lisbon, 1631-1632), *Weather*, vol. 70, issue 1, pp. 20-24, doi:10.1002/wea.2319.

Hantemirov, R.M., Corona, C., Guillet, S. et al. (2022) Current Siberian heating is unprecedented during the past seven millennia, *Nat. Commun.*, vol. 13, issue 1, p. 4968, doi: 10.1038/s41467-022-32629-x.

Kaufman, D., McKay, N., Routson, C. et al. (2020) Holocene global mean surface temperature, a multi-method reconstruction approach, *Sci. Data*, vol. 7, no. 267, doi: 10.1038/s41597-020-0530-7.

Ljungqvist, F.C., Thejll, P., Christiansen, B. et al. (2022) The significance of climate variability on early modern European grain prices, *Cliometrika*, vol. 16, issue 1, pp. 29-77, doi: 10.1007/s11698-021-00224-7.

Nash, D.J., Adamson, G.C.D., Ashcroft, L. et al. (2021) Climate indices in historical climate reconstructions: a global state of the art, *Clim. Past*, vol. 17, issue 3, pp. 1273-1314, doi: 10.5194/cp-17-1273-2021.

Parker, G. (2013) *Global Crisis: War, Climate Change and Catastrophe in the Seventeenth Century*, New Haven, Conn., Yale University Press, 871 p.

Pfister, C., Brázdil, R., Glaser, R. et al. (1999) Daily Weather Observations in Sixteenth-Century Europe, *Climatic Change*, vol. 43, pp. 111-150, doi: 10.1023/A:1005505113244.

Solomina, O., Matskovsky, V., Dolgova, E. et al. (2022) Tree-ring data set for dendroclimatic reconstructions and dendrochronological dating in European Russia, *Sci. Data*, vol. 9, no. 367, doi: 10.1038/s41597-022-01456-6.

References

Bedritsky, A.I., Borisenkov, E.P., Korovchenko, A.S., Pasetsky, V.M. (1997) *Ocherki po istorii gidrometeorologicheskoy sluzhby Rossii* [Essays on the history of the hydrometeorological service of Russia], vol. 1, Gidrometeoizdat, St. Petersburg, Russia, 363 p.

Bogdanov, A.P., Shamin, S.M. (2003) *Prirodnyye yavleniya v tsarstvovaniye Fedora Alekseyevicha i chelovecheskoye soznaniye (po gazetnoy informatsii Posol'skogo prikaza)*, [Natural phenomena during the reign of Fyodor Alekseevich and human consciousness (according to newspaper information from the Ambassadorial Office)], *Istoricheskaya ekologiya i istoricheskaya demografiya* [Historical ecology and historical demography], ROSSPEN, Moscow, Russia, pp. 239-255.

Bogolepov, M.A. (1908) *O kolebaniyakh klimata Yevropeyskoy Rossii v istoricheskuyu epokhu* [On climate fluctuations in European Russia in the historical era], I.N. Kushnerev and Co. Printing House, Moscow, Russia, 112 p.

Borisenkov, E.P., Pasetsky, V.M. (2002) *Letopis' neobychnykh yavleniy prirody za 2.5 tysyacheletiya* [Chronicle of extraordinary natural phenomena for 2.5 millennia], Gidrometeoizdat, St. Petersburg, Russia, 536 p.

Borisenkov, E.P., Pasetsky, V.M. (1988) *Tysyacheletnyaya letopis' neobychnykh yavleniy prirody* [Thousand-year chronicle of extraordinary natural phenomena], Mysl, Moscow, Russia, 528 p.

Borisenkov, E.P., Pasetsky, V.M. (1983) *Ekstremal'nyye prirodnyye yavleniya v russkikh letopisyakh XI-XVII vv.* [Extreme natural phenomena in Russian chronicles of the 11th-17th centuries], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 240 p.

Buchinsky, I.E. (1954) *Ocherki klimata Russkoy ravniny v istoricheskuyu epokhu* [Essays on the climate of the Russian Plain in the historical era], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 88 p.

Vazhov, V.I. (1961) *Povtoryayemost' zasukh na Russkoy ravnine v istoricheskuyu epokhu* [Recurrence of droughts on the Russian Plain in the

historical era], *Izv. Krymskogo otd. Geograficheskogo obshchestva SSSR* [Izvestiya Krymskogo otd. Geograficheskogo sossii SSSR], issue 7, pp. 13-24.

Guskov, A.G. (2005) *Velikoye posol'stvo Petra I. Istochnikovedcheskoye issledovaniye* [The Great Embassy of Peter I. Source study], IRI RAS, Moscow, Russia, 398 p.

Dadykina, M.M. (2016) *Upravlyaya prostranstvom: organizatsiya Spaso-Prilutskim monastyrem vodnykh kommunikatsiy i ikh struktura (XVI-XVII vv.)* [Managing space: the organization of water communications by the Spaso-Prilutsky Monastery and their structure (16th-17th centuries)], *Quaestio Rossica*, vol. 4, no. 3, pp. 123-140, doi: 10.15826/qr.2016.3.179.

Zapadnoyevropeyskiye avtory XV-XVII vv. o Rossii [Western European authors of the 15th-17th centuries about Russia] (2018) *Materialy k bibliograficheskomu slovaryu*, sost. P.D. Malygin, otv. red. P.G. Gaydukov [Materials for the bibliographic dictionary, compiled by P.D. Malygin, ed. by P.G. Gaidukov], Institute of Archaeology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 192 p.

Kanishchev, V.V., Mizis, Yu.A. (2014) *K voprosu o metodakh istoriko-klimaticheskikh issledovaniy: moskovskiye pogody v seredine XVII i seredine XX vv.* [On the methods of historical and climatic research: Moscow weather in the mid-17th and mid-20th centuries, *Istoriya i sovremennost'* [History and Modernity], issue 2 (20), pp. 17-23.

Komendova, J. (2022) *Neobychnnyye prirodnyye yavleniya v drevnerusskoy i cheshskoy istoriografii XII-XIII vv. v sravnitel'noy perspektive* [Unusual natural phenomena in old Russian and Czech historiography of the 12th-13th centuries in comparative perspective], *Slověne*, vol. 11, no. 2, p. 7-27, doi: 10.31168/2305-6754.2022.11.2.1.

Koretsky, V.I. (1975) *Formirovaniye krepostnogo prava i pervaya krest'yanskaya vojna v Rossii* [Formation of serfdom and the first peasant war in Russia], Nauka, Moscow, Russia, 388 p.

Maikova, T.S. (1969) *Voyennyye «Yurnaly» petrovskogo vremeni (Po materialam TSGADA)* [Military "Journals" of the Peter the Great's Time (Based on Materials from the Central State Archive of Ancient Documents)], *Voprosy voyennoy istorii Rossii XVIII i pervoy poloviny XIX veka* [Issues of Military History of Russia in the 18th and First Half of the 19th Century], Nauka, Moscow, Russia, pp. 368-390.

Mininkov, N.A. (1998) *Donskoye kazachestvo v epokhu pozdnego srednevekov'ya (do 1671 g.)* [Don Cossacks in the Late Middle Ages (before 1671)], Rostov University Publishing House, Rostov-on-Don, Russia, 510 p.

Mokrushina, N.G., Nikonov, A.A., Fleifel, L.D. (2009) *Seysmicheskiy kazus: «Ural'skoye» zemletryaseniye 1693 g.* [Seismic Incident: The "Ural" Earthquake of 1693], *Voprosy inzhenernoy seysmologii*, vol. 36, no. 3, pp. 55-60.

Myglan, V.S. (2010) *Klimat i sotsium Sibiri v malyy lednikovyy period* [Climate and society of Siberia during the Little Ice Age], SFU, Krasnoyarsk, Russia, 230 p.

Neobychnyye i ekstremal'nyye yavleniya XVIII veka [Unusual and extreme phenomena of the 18th century] (2020) In. S.Yu. Nechaev, issues 1-3, BAN, St. Petersburg, Russia.

Novoselsky, A.A. (1929) *Votchinnik i yego khozyaystvo v XVII v.* [The patrimonial farmer and his farm in the 17th century], Gosizdat, Moscow, Leningrad, Russia, 192 p.

Novokhatko, O.V. (2018) *Chastnaya perepiska XVII veka* [Private correspondence of the 17th century], Monuments of historical thought, Moscow, Russia, 663 p.

Novyy katalog sil'nykh zemletryaseniy na territorii SSSR s drevneyshikh vremen do 1975 g. [New catalog of strong earthquakes on the territory of the USSR from ancient times to 1975] (1977) Nauka, Moscow, Russia, 536 p.

Prokhorov, D.A. (2016) (2016) *Posledstviya prirodnykh kataklizmov i stikhiynykh bedstviy na Krymskom poluostrove v opisaniyakh avtorov i dokumentakh XVII-XVIII vv.* [Consequences of natural disasters and cataclysms on the Crimean peninsula in the descriptions of authors and documents of the 17th-18th centuries], *Bosporskiye issledovaniya*, no. 33, pp. 319-347.

Rogozhin, N.M. (1990) *Obzor posol'skikh knig iz fondov-kollektsiy, khranyashchikhsya v TSGADA (konets XV – nachalo XVIII vv.)* [Review of embassy books from the collections stored in the Central State Archives of Ancient Documents (late 15th – early 18th centuries)], Institute of History of the USSR, Moscow, Russia, 237 p.

Savenkova, V.M. (2014) *Istoriya izucheniya ledovykh yavleniy na rekakh Yevropeyskoy chasti Rossii* [History of the study of ice phenomena on the rivers of the European part of Russia], Extended abstract of candidate's thesis, S.I. Vavilov Institute of the History of Natural Science and Technology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 164 p.

Svyatsky, D.O. (2007) *Astronomiya Drevney Rusi* [Astronomy of Ancient Rus], Russian Panorama, Moscow, Russia, 664 p.

Solomina, O.N., Bushueva, I.S., Dolgova, E.A. et al. (2017) *Zasukhi Vostochno-Yevropeyskoy ravniny po gidrometeorologicheskim i dendrokronologicheskim dannym* [Droughts of the East European Plain Based on Hydrometeorological and Dendrochronological Data], Nestor-History, Moscow, St. Petersburg, Russia, 360 p.

Uzhankov, A.N. (1995) *Evolutsiya peyzazha v russkoy literature XI – pervoy treti XVIII vv.* [Evolution of Landscape in Russian Literature of the 11th – First Third of the 18th Centuries], *Drevnerusskaya literatura: izobrazheniye*

prirody i cheloveka [Old Russian Literature: Image of Nature and Man], Nasledie, Moscow, Russia, pp. 19-87.

Cherepnin, L.V. (1944) *Russkaya metrologiya* [Russian Metrology], Transzheldorizdat, Moscow, Russia, 94 p.

Shikhsaidov, A.R., Ismailov, A.Sh. (1979) Analiz istoricheskikh dannykh o razrushitel'nykh zemletryaseniyyakh serediny XVII v. v Yuzhnom Dagestane [Analysis of Historical Data on Destructive Earthquakes of the Mid-17th Century in Southern Dagestan], *Geodinamika i seysmichnost' territorii Dagestana* [Geodynamics and Seismicity of the Territory of Dagestan], Dag. Branch of the USSR Academy of Sciences, Makhachkala, Russia, p. 50-55.

Anchukaitis, K.J., Wilson, R., Briffa, K.R. et al. (2017) Last Millennium Northern Hemisphere Summer Temperatures from Tree Rings: Part II, Spatially Resolved Reconstructions, *Quaternary Science Reviews*, vol. 163, pp. 1-22, doi: 10.1016/j.quascirev.2017.02.020.

Borisenkov, Y.P. (1994) Climatic and Other Natural Extremes in the European Territory of Russia in the Late Maunder Minimum (1675-1715), *Climatic Trends and Anomalies in Europe 1675-1715*, in Frenzel, B., Pfister, C., Glaeser, B. (eds.), Stuttgart, Jena, New York, Gustav Fischer Verlag, pp. 83-94.

Borisenkov, Y.P. (1995) Documentary evidence from the U.S.S.R, *Climate since the A.D. 1500*, in Bradley, R.S., Jones, P.D. (eds.), London and New York, Routledge, pp. 171-183, doi: 10.4324/9780203430996.

Brázdil, R., Dobrovolný, P., Mikšovský, J., Pišoft, P., Trnka, M., Možný, M., Balek, J. (2022) Documentary-based climate reconstructions in the Czech Lands 1501-2020CE and their European context, *Clim. Past*, vol. 18, issue 4, pp. 935-959, doi: 10.5194/cp-18-935-2022.

Brönnimann, S. (2023) The weather diary of Georg Christoph Eimmart for Nuremberg, 1695-1704, *Clim. Past*, vol. 19, issue 7, pp. 1345-1357, doi: 10.5194/cp-19-1345-2023.

Burgdorf, A.-M. (2022) A global inventory of quantitative documentary evidence related to climate since the 15th century, *Clim. Past*, vol. 18, issue 6, pp. 1407-1428, doi: 10.5194/cp-18-1407-2022.

Büntgen, U., Urban, O., Krusic, P.J. et al. (2021) Recent European drought extremes beyond Common Era background variability, *Nat. Geosci.*, vol. 14, pp. 190-196, doi: 10.1038/s41561-021-00698-0.

Camenisch, C., Salvisberg, M. (2020) Droughts in Bern and Rouen from the 14th to the beginning of the 18th century derived from documentary evidence, *Clim. Past*, vol. 16, issue 6, pp. 2173-2182, doi: 10.5194/cp-16-2173-2020.

Chernavskaya, M. (1994) The climate of the Russian plain according to the diary of Peter the Great, and the weather records of Czar Aleksey's court, *Climatic*

Trends and Anomalies in Europe 1675-1715, in Frenzel, B., Pfister, C., Glaeser B. (eds.), Stuttgart, Jena, New York, Gustav Fischer Verlag, pp. 74-81.

Chernavskaya, M. (1996) Weather Conditions of 1695-96 in European Russia, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 35, issue 7, pp. 1059-1062.

Cook, E.R., Solomina, O., Matskovsky, V. et al. (2020) The European Russia Drought Atlas (1400-2016 CE), *Clim. Dyn.*, vol. 54, issue 3-4, pp. 2317-2335, doi: 10.1007/s00382-019-05115-2.

Dolgova E. (2016) June-September temperature reconstruction in the Northern Caucasus based on blue intensity data, *Dendrochronologia*, vol. 39, pp. 17-23, doi: 10.1016/j.dendro.2016.03.002.

Domínguez-Castro, F., García-Herrera, R., Vaquero, J.M. (2015) An early weather diary from Iberia (Lisbon, 1631-1632), *Weather*, vol. 70, issue 1, pp. 20-24, doi:10.1002/wea.2319.

Hantemirov, R.M., Corona, C., Guillet, S. et al. (2022) Current Siberian heating is unprecedented during the past seven millennia, *Nat. Commun.*, vol. 13, issue 1, p. 4968, doi: 10.1038/s41467-022-32629-x.

Kaufman, D., McKay, N., Routson, C. et al. (2020) Holocene global mean surface temperature, a multi-method reconstruction approach, *Sci. Data*, vol. 7, no. 267, doi: 10.1038/s41597-020-0530-7.

Ljungqvist, F.C., Thejll, P., Christiansen, B. et al. (2022) The significance of climate variability on early modern European grain prices, *Climatologica*, vol. 16, issue 1, pp. 29-77, doi: 10.1007/s11698-021-00224-7.

Nash, D.J., Adamson, G.C.D., Ashcroft, L. et al. (2021) Climate indices in historical climate reconstructions: a global state of the art, *Clim. Past*, vol. 17, issue 3, pp. 1273-1314, doi: 10.5194/cp-17-1273-2021.

Parker, G. (2013) *Global Crisis: War, Climate Change and Catastrophe in the Seventeenth Century*, New Haven, Conn., Yale University Press, 871 p.

Pfister, C., Brázdil, R., Glaser, R. et al. (1999) Daily Weather Observations in Sixteenth-Century Europe, *Climatic Change*, vol. 43, pp. 111-150, doi: 10.1023/A:1005505113244.

Solomina, O., Matskovsky, V., Dolgova, E. et al. (2022) Tree-ring data set for dendroclimatic reconstructions and dendrochronological dating in European Russia, *Sci. Data*, vol. 9, no. 367, doi: 10.1038/s41597-022-01456-6.

Статья поступила в редакцию (Received): 18.08.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 25.09.2024.

Принята к публикации (Accepted): 13.10.2024.

Для цитирования / For citation:

Кирпичников, И.А. (2024) Исторические известия о климатических условиях, погодных и природных явлениях на территории России в письменных источниках XVII века: опыт составления базы данных и перспективы изучения, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 4, с. 561-582, doi:10.21513/2410-8758-2024-4-561-582.

Kirpichnikov, I.A. (2024) Historical documentary evidence related to climatic conditions, weather and natural phenomena on the territory of Russia in the seventeenth-century written historical sources: construction of the database and research perspectives, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 4, pp. 561-582, doi:10.21513/2410-8758-2024-4-561-582.

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>.
