

Федеральная служба
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
им. А. И. Воейкова

Выпуск

612

Под редакцией

д-ра физ.-мат. наук В. М. Катцова,

д-ра физ.-мат. наук В. П. Мелешко

Санкт-Петербург

2024

Адрес: 194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Телефон: (812) 297-43-90

ФАКС: (812) 297-86-61

e-mail: director@main.mgo.rssi.ru

web site: <http://www.voeikovmgo.ru>

Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И.Воейкова – научный рецензируемый журнал, публикующий результаты теоретических и экспериментальных исследований по актуальным проблемам изменения климата и прогноза погоды, атмосферной диффузии и мониторинга состояния атмосферы, климатологии, дистанционного зондирования атмосферы.

Журнал рассчитан на широкий круг научных работников и инженеров, интересующихся результатами современных исследований в области метеорологии и прикладной геофизики и их практическим использованием.

В соответствии с решением Президиума высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук по специальностям: 1.6.18 – науки о Земле и климате.

Полное библиографическое описание всех статей журнала представлено в Научной электронной библиотеке eLibrary.ru с целью формирования Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Электронные версии журнала доступны на сайте Научной электронной библиотеки <http://elibrary.ru> и в разделе «Труды ГГО им. А.И.Воейкова» на сайте ГГО <http://voeikovmgo.ru>. Публикация в журнале бесплатная.

РЕДАКТОРЫ:

Катцов В.М., д-р физ.-мат. наук;

Мелешко В.П., д-р физ.-мат. наук, заслуженный деятель науки РФ.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Е. М. Аментьева, канд. геогр. наук, С. Ю. Гаврилова, канд. геогр. наук,

Е. Л. Генихович, д-р физ.-мат. наук, А. С. Грицун, д-р физ.-мат. наук,

С. К. Гулев чл. корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, А. С. Зайцев, канд. физ.-мат. наук,

В. И. Кириллова, канд. геогр. наук, А. А. Киселев, канд. физ.-мат. наук,

Е. Л. Махоткина, канд. геогр. наук, секретарь редколлегии,

В. Н. Морозов, д-р физ.-мат. наук, Т. В. Павлова, канд. физ.-мат. наук,

Г. Б. Пигольщина, д-р геогр. наук, Е. В. Розанов, канд. физ.-мат. наук,

А. А. Синькевич, д-р техн. наук, И. В. Смирнова, канд. геогр. наук,

А. П. Соколов, канд. физ.-мат. наук, П. В. Спорышев, канд. физ.-мат. наук,

И. А. Тарабукин, канд. физ.-мат. наук, Е. И. Хлебникова, канд. физ.-мат. наук,

С. С. Чичерин, канд. физ.-мат. наук, И. М. Школьник, канд. физ.-мат. наук.

ISSN 0376-1274

© Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова»
2024

Proceedings of the Voeikov Main Geophysical Observatory is a peer-reviewed scientific journal publishing the results of theoretical and experimental research on current issues of climate change and weather forecasting, atmospheric diffusion and atmospheric monitoring, climatology, remote sensing of the atmosphere.

The journal is intended for a wide range of scientists and engineers interested in the results of modern research in the field of meteorology and applied geophysics and their practical application.

The journal is included in the list of leading peer-reviewed scientific journals and publications in which the main scientific results of dissertations for Ph. D. (the scientific degree of candidate and doctor of science) on Earth and climate sciences should be published.

A complete bibliographic description of all articles in the journal is presented in the Scientific Electronic Library elibrary.ru with the aim of forming the Russian Science Citation Index (RSCI).

Electronic versions of publications are available on the website of the Scientific Electronic Library <http://elibrary.ru> and in the section "Proceedings of the Voeikov MGO" on the MGO website <http://voeikovmgo.ru>. Publication in the journal is free.

EDITORS:

Dr. V. M. Kattsov;

Dr. V. P. Meleshko, Honored Scientist of the Russian Federation.

Editorial board

Dr. E. M. Akentyeva, Dr. S. Yu. Gavrilova Dr. E. L. Genihovich, Dr. A. S. Gritsun, Dr. S. K. Gulev, Dr. A. S. Zaitsev, Dr. V. I. Kirillova, Dr. A. A. Kiselev, Dr. E. L. Makhotkina (Editorial board secretary), Dr. V. N. Morozov, Dr. T. V. Pavlova, Dr. G. B. Pigoltsina, Dr. E. V. Rozanov, Dr. A. A. Sinkevich, Dr. I. V. Smirnova, Dr. A. P. Sokolov, Dr. P. V. Sporyshev, I. A. Tarabukin, Dr. E.I. Khlebnikova, Dr. S. S. Chicherin, Dr. I. M. Shkolnik.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>С. С. Чичерин.</i> О критериях качества воздуха и их применении в целях мониторинга и охраны атмосферного воздуха.	6
<i>Е. Л. Генихович, В. И. Кириллова, Д. Ю. Румянцев, Е. А. Яковлева, И. Н. Павлов, Е. В. Булавина.</i> Совместное использование детерминистической и стохастической моделей для прогнозирования загрязнения воздушного бассейна городов.	37
<i>Д. В. Фасолько, М. В. Клюева, Е. П. Самойлова, Е. Н. Федорова, Е. Н. Разова, Е. М. Акентьева.</i> Специализированная климатическая информация для подготовки региональных планов адаптации к изменению и изменчивости климата (на примере Новосибирской области).	82
<i>Н. Е. Веремей, М. Л. Торопова, А. Б. Куров, Ю. А. Довгальук, Ю. П. Михайловский, А. А. Синькевич.</i> Взаимосвязь между молниевой активностью грозового облака и образованием и распределением града и крупы.	109
<i>Д. В. Тимошенко, Г. В. Куповых.</i> Оценка мощности глобальных и локальных токовых генераторов по электродинамическим параметрам приземного слоя.	125
<i>В. В. Занюков, Б. Г. Зайнетдинов, Л. Г. Соколенко.</i> Многолетние тенденции и современные изменения параметров атмосферного электричества.	136
<i>Н. Н. Парамонова, В. И. Привалов, В. М. Ивахов, А. В. Зинченко,</i> Мониторинг парниковых газов в России по программе «ГСА» ВМО: обеспечение сопоставимости данных наблюдений.	155
<i>Е. В. Гаврилова, И. В. Гонтовая.</i> Особенности гидрометеорологического режима в дельте Волги в 2021 г.	175

CONTENTS

<i>Chicherin S. S.</i> On ambient air quality criteria and their applications for monitoring and air protection.	6
<i>Genikhovich E. L., Kirillova V. I., Rumyantsev D. Yu., Yakovleva E. A., Pavlov I. N., Bulavina E. V.</i> Joint use of deterministic and stochastic models in forecasting the urban air pollution.	37
<i>Fasolko D. V., Klueva M. V., Samoiloa E. P., Fedorova E. N., Razova E. N., Akentyeva E. M.</i> Tailored climate information for the preparation of regional adaptation plans to climate change and variability (the case of the Novosibirsk region).	82
<i>Veremei N. E., Toropova M. L., Kurov A. B., Dovgaluk Yu. A., Mikhailovskii Yu. P., Sin'kevich A. A.</i> The relationship between thunderstorm lightning activity and formation and distribution of hail.	109
<i>Timoshenko D. V., Kupovykh G. V.</i> The estimation of global and local current generators power by surface layer electrodynamic parameters.	125
<i>Zanyukov V. V., Zaynetdinov B. G., Sokolenko L. G.</i> Long-term trends and recent changes in atmospheric electricity parameters.	136
<i>Paramonova N. N., Privalov V. I., Ivakhov V. M., Zinchenko A. V.</i> Greenhouse gas monitoring in Russia under the WMO GAW Program: Ensuring Comparability of Observational Data.	155
<i>Gavrilova E. V., Gontovaya I. V.</i> Features of the hydro-meteorological regime in the Volga delta in 2021.	175

О КРИТЕРИЯХ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА И ИХ ПРИМЕНЕНИИ В ЦЕЛЯХ ЕГО МОНИТОРИНГА И ОХРАНЫ

С. С. Чичерин

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Voeikov Main Geophysical Observatory
St. Petersburg, Karbysheva st., 7

E-mail: schicherin@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.04.2024
Поступила после доработки 29.05.2024

Введение

Критерии качества атмосферного воздуха положены в основу планирования, реализации и оценки эффективности мер по улучшению качества воздуха населенных мест, таких как установление нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ (далее – ЗВ), определение размеров санитарно-защитных зон предприятий, оценка уровня загрязнения воздуха по результатам наблюдений и по расчетам рассеивания выбросов. В соответствии с законодательством, в качестве нормативов содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе приняты гигиенические показатели — предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ для населенных мест (далее – ПДК), которые являются оценкой порога воздействия ЗВ по признаку «вредно – не вредно».

Чем более вредным является загрязняющее вещество, тем меньшее численное значение имеет установленная для него ПДК (как для кратковременного (острого), так и для продолжительного (хронического) воздействия на человека) и тем более жесткие

требования предъявляются к предприятиям, имеющим источники выбросов этого ЗВ.

При оценке качества атмосферного воздуха по данным регулярных наблюдений выявляется, соответствует ли фактический уровень загрязнения воздуха установленным нормативным значениями ПДК, а если не соответствует, то в какой количественной мере (показателе) выражается это несоответствие.

Понятно, что при установлении нормативов ПДК на основе только гигиенических соображений (т. е. определения порога в соотношении «вредно – не вредно»)¹ не принимаются во внимание такие факторы, как фактический уровень загрязнения воздуха, готовность экономики страны и наличие у нее необходимых ресурсов для уменьшения уровня загрязнения воздуха в разумные сроки до уровня ПДК и т. д. Поэтому вполне логичным представляется методологический вопрос о том, насколько успешно справляются установленные гигиенические нормативы ПДК с возложенной на них ролью по сути единственного правового регулирующего механизма, распространяющего свое действие на все сферы экономики, так или иначе связанные с выбросами загрязняющих веществ в атмосферу.

Краткая история вопроса

Масштабная государственная деятельность по охране окружающей среды была развернута в нашей стране после успешного завершения Конференции ООН по проблемам окружающей среды, прошедшей в Стокгольме 5–16 июня 1972 г. (Стокгольмская конференция), на которой были приняты Стокгольмская декларация и План действий.

¹ Как принято считать, для неканцерогенных загрязняющих веществ такой порог удается установить. Для канцерогенов такой порог отсутствует, и значение ПДК устанавливается из соображений приемлемого популяционного риска раковых заболеваний.

В этих документах (Конференция ООН, 1972) изложены принципы сохранения и улучшения окружающей человека среды, а также рекомендации по международным природоохранным действиям.

Начало этому процессу в нашей стране было положено Постановлением (Постановление, 1972) «Об усилении охраны природы и улучшении использования природных ресурсов», принятым руководящими органами страны 29.12.1972 г. Этим постановлением Главному управлению гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР (ГУГМС) было поручено (п. 10):

- организовать общегосударственную службу наблюдений и контроля уровня загрязнения атмосферного воздуха, почвы и водных объектов по физическим, химическим, гидробиологическим (для водных объектов) показателям и экстренной информации о резких изменениях уровня загрязнения атмосферы, почвы и вод;

- обеспечивать заинтересованные организации и учреждения систематической информацией и прогнозами об уровнях загрязнения атмосферы, почвы, водных объектов и о возможности их изменения под влиянием хозяйственной деятельности и гидрометеорологических условий.

В п. 23 этого постановления ГУГМС и Минздраву СССР было поручено «разработать порядок предупреждения местных органов власти и руководителей промышленных предприятий о возможном повышении концентрации загрязнения² в атмосфере в связи с ожидаемыми неблагоприятными метеорологическими условиями».

Постановлением не был освещен вопрос установления нормативов качества атмосферного воздуха³.

² Так в оригинале.

³ Возможно, это было связано с тем, что, согласно действовавшим тогда правилам и вплоть до начала 1990-х годов, любая информация о фактическом уровне загрязнения атмосферного воздуха была отнесена к категории информации для служебного пользования и не подлежала публикации не только в СМИ, но и в научных изданиях.

Законодательно понятие норматива предельно допустимой концентрации было введено (без определения) в ст. 8 Закона СССР «Об охране атмосферного воздуха» (Закон СССР, 1980). Содержательно оно было использовано в ст. 9 этого Закона, в которой было введено требование об установлении нормативов предельно допустимых выбросов на таком «уровне, при котором выбросы загрязняющих веществ <...> от конкретного и всех других источников в данном районе с учетом перспективы его развития не приведут к превышению нормативов предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе».

Подход к установлению нормативов допустимых выбросов на основе ПДК, но в несколько иной формулировке, сохранен и в п. 1 ст. 22 Федерального закона «Об охране окружающей среды», а также в п. 4 ст. 12 Федерального закона «Об охране атмосферного воздуха». Эта норма закрепила центральную роль ПДК в правовом поле государственного регулирования выбросов.

Следует подчеркнуть категоричный характер упомянутого Закона СССР в отношении установления нормативов выбросов. Закон лишь в самых общих словах требует от предприятий «проводить организационно-хозяйственные, технические и иные мероприятия для обеспечения выполнения условий и требований, предусмотренных в разрешениях на выброс, принимать меры по снижению выбросов загрязняющих веществ». Нормы этого закона не устанавливают содержания и механизма реализации «условий и требований, предусмотренных в разрешениях на выброс», которые задавали бы единые правила определения временных рамок этапов, промежуточных значений нормативов выбросов на каждом этапе на пути к достижению уровнем выбросов установленного норматива (предельно допустимых выбросов — ПДВ) и, соответственно, к достижению показателями качества атмосферного воздуха уровня ПДК.

Только в Постановлении Верховного Совета СССР «О порядке введения в действие Закона СССР "Об охране атмосферного воздуха"» от 25.06.1980 № 2354-X (Закон СССР, 1980) вводится право «специально уполномоченных на то государственных органов

устанавливать временно согласованные величины выбросов загрязняющих веществ». Эта норма адресована отдельным предприятиям, и не ставится задача постепенного улучшения качества атмосферного воздуха в целом на территории населенного пункта, в котором расположены эти предприятия.

Для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха, разработки и контроля выполнения планов по соблюдению требований по качеству атмосферного воздуха были введены гигиенические нормативы максимальных разовых и среднесуточных предельно допустимых концентраций (ПДК_{мр} и ПДК_{сс} соответственно). ПДК_{мр} относились к кратковременному (20–30 мин), а ПДК_{сс} — к долговременному, хроническому (год) воздействию.

Такая трактовка ПДК_{сс} была введена научным сообществом разработчиков ПДК. Один из участников начальной стадии разработки ПДК, авторитетный гигиенист, соавтор справочника ПДК (Беспамятнов, Кротов, 1985) Ю. А. Кротов отмечал, что «для значительного числа загрязнителей атмосферного воздуха существуют два норматива. Один из них именуется среднесуточным нормативом, однако название отражает не фактическое его значение, а суть его первоначального определения, предложенного В. А. Рязановым (Рязанов, 1954), когда производилось круглосуточное взятие проб воздуха для анализа. В действительности же под среднесуточной концентрацией подразумевалась среднегодовая, т. е. постоянное вдыхание данной концентрации в течение года. Многочисленные попытки внести временные поправки на более короткие периоды успеха не имели» (Кротов, 2002). В упомянутом справочнике приводится такое определение ПДК_{сс}: «ПДК_{сс} — предельно допустимая среднесуточная концентрация химического вещества в воздухе населенных мест, мг/м³. Эта концентрация не должна оказывать на человека прямого или косвенного вредного воздействия при неопределенно долгом (годы) вдыхании».

Подтверждение правильности применения ПДК_{сс} в качестве нормативного критерия для уровня долговременного загрязнения атмосферного воздуха содержится в относительно недавней публикации (Шур, Хасанова, 2021) специалистов ФБУН

«ФНЦ медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» (Роспотребнадзор), в которой, со ссылкой на нормативный документ, указывается что «в Российской Федерации для обеспечения безопасности для здоровья населения при неограниченно долгом поступлении химических веществ до недавнего времени применялись среднесуточные предельно допустимые концентрации» (Методические указания, 1989). Этот подход был нормативно закреплён и в документе РД 52.04.186-89 (1989), который был утверждён как первым заместителем Госкомгидромета СССР, так и главным санитарным врачом СССР, и который до настоящего времени имеет статус ведомственного нормативного документа Росгидромета.

Сказанное выше подтверждает научную и нормативную обоснованность многолетней практики применения ПДКсс в качестве критерия для оценки уровня долговременного загрязнения атмосферного воздуха путём сопоставления измеренных или рассчитанных среднегодовых концентраций с ПДКсс.

О введении нормативов среднегодовых предельно допустимых концентраций

Уровень долговременного (хронического) воздействия загрязняющих веществ оценивается путём сопоставления измеренных среднегодовых концентраций с соответствующим нормативом качества воздуха. С 1 марта 2021 г. введён в действие нормативный документ СанПиН 1.2.3685-21 (2021). Этим документом для большинства загрязняющих веществ впервые установлены среднегодовые гигиенические нормативы содержания в атмосферном воздухе — среднегодовые предельно допустимые концентрации ПДКсг. Одновременно этим документом изменён смысл норматива среднесуточных предельно допустимых концентраций ПДКсс⁴

⁴ Здесь не рассматриваются последствия введенных СанПиН 1.2.3685-21 изменений смыслового содержания и числовых значений ПДКсс.

(при наличии), который теперь нормирует качество атмосферного воздуха «при воздействии не менее 24 ч»⁵.

Действовавшая до введения в действие СанПиН 1.2.3685-21 система нормирования выбросов в силу имевшегося соотношения между ПДК_{мр} и ПДК_{сс} позволяла ограничиваться установлением для стационарных источников нормативов ПДВ расчетным путем на основе ПДК_{мр}, поскольку при этом соблюдение ПДК_{мр} автоматически влекло и соблюдение ПДК_{сс}. Это обстоятельство является следствием закономерностей атмосферной диффузии и большой изменчивости направления ветра в течение года⁶.

Введение в действие СанПиН 1.2.3685-21 (установление нормативов ПДК_{сг} и изменение смысла действовавших ранее нормативов ПДК_{сс}) привело к тому, что для многих загрязняющих веществ это существенно (для ряда ЗВ — на порядок и более) ужесточает требования к допустимому уровню долговременного (хронического) воздействия этих ЗВ на население (см. табл. 1 (Смирнова, 2024)).

Это ужесточение гигиенических требований к качеству атмосферного воздуха переносится и на источники выбросов (в т. ч. в части определения размеров санитарно-защитных зон⁷),

⁵ Такая формулировка СанПиН 1.2.3685-21 вводит неопределенность, формально позволяя выполнять оценку уровня загрязнения атмосферного воздуха сопоставлением с ПДК_{сс} измеренных концентраций с периодом осреднения от 24 ч до недели, месяца, квартала.

⁶ Эта закономерность менее очевидна для городов с преобладанием выбросов автомобильного транспорта.

⁷ Уместно отметить, что правовое понятие «санитарно-защитная зона» (СЗЗ) представляется правовым анахронизмом. Фактически придание некоторому земельному участку статуса СЗЗ означает предоставление собственнику предприятия права распоряжаться не принадлежащим ему земельным участком, поскольку легализует право предприятия не соблюдать на территории СЗЗ нормативы качества воздуха. Если при этом население имеет неограниченное право пребывания на территории СЗЗ, то это входит в прямое противоречие с законодательным определением ПДК (ст. 1 Федерального закона «Об охране атмосферного воздуха»), которое распространяется на атмосферный воздух «за пределами жилых,

поскольку согласно требованиям п. 1 ст. 22 Федерального закона «Об охране окружающей среды» «нормативы допустимых выбросов <...> определяются <...> на основе нормативов предельно допустимых концентраций...» Аналогичное требование содержится в п. 2 ст. 12 Федерального закона «Об охране атмосферного воздуха». Не исключено, что для отдельных загрязняющих веществ ПДКсг или ПДКсс станут вместо ПДКмр основным ограничителем величины допустимых выбросов.

Необходимо, кроме того, отметить, что при подготовке гигиенической оценки состояния атмосферного воздуха по результатам государственного мониторинга следует (после введения в действие СанПиН 1.2.3685-21) сопоставлять измеренные среднегодовые концентрации с ПДКсг, что также ухудшает оценку гигиенических показателей качества атмосферного воздуха (при неизменных среднегодовых концентрациях), по сравнению с оценками, использующими ПДКсс в качестве критерия долговременного (среднего за год) загрязнения атмосферы.

Таблица 1

Значения гигиенических нормативов СанПиН 1.2.3685-21 и ГН 2.1.6.3492-17 по перечню загрязняющих веществ, включенных в программы наблюдений государственной наблюдательной сети

Загрязняющее вещество	ПДК, мг/м ³				
	ГН 2.1.6.3492-17		СанПиН 1.2.3685-21		
	ПДКмр	ПДКсс	ПДКмр	ПДКсс	ПДКсг
Аминобензол (анилин)	0,05	0,03	0,05	0,03	0,001
Бензол	0,3	0,1	0,3	0,06	0,005
Серная кислота / по молекуле H ₂ SO ₄ /	0,3	0,1	0,3	0,1	0,001

производственных и иных помещений». По своей сути СЗЗ — законодательно закрепленный источник своеобразной экологической ренты за счет эксплуатации чужой собственности (земельного участка СЗЗ).

Загрязняющее вещество	ПДК, мг/м ³				
	ГН 2.1.6.3492-17		СанПиН 1.2.3685-21		
	ПДК _{мр}	ПДК _{сс}	ПДК _{мр}	ПДК _{сс}	ПДК _{сг}
Тетрахлорметан (углерод четырехлористый)	4,0	0,7	4,0	0,04	0,017
Хлор	0,1	0,03	0,1	0,03	0,0002
Хром / в пересчете на хрома (VI) оксид/	—	0,0015	—	0,0015	0,000008
Ртуть	—	0,0003	—	0,0003	0,00003
Марганец и его соединения / в пересчете на марганец (IV) оксид/	0,01	0,001	0,01	0,001	0,00005
Медь оксид/в пересчете на медь / (медь окись; тенорит)	—	0,002	—	0,002	0,00002
Никель и его соединения	—	0,001	—	0,001	0,00005

Примечание. Прочерки в столбцах «Значение ПДК, мг/м³» означают отсутствие установленного норматива.

ГН 2.1.6.3492-17 — Гигиенические нормативы «Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений».

Правовые аспекты нормирования качества атмосферного воздуха — «два в одном»

Законодательное нормирование качества воздуха в Российской Федерации по гигиеническим критериям (и на этой основе — нормирование выбросов) имеет фундаментальный правовой недостаток: основной гигиенический норматив «**предельно допустимая концентрация**» применяется для осуществления двух

фактически совершенно разнородных функций — гигиенической и регуляторной. Одна из них — установление гигиенического порога по критерию «вредно – не вредно» (или, на более современном языке, по критерию приемлемого риска). Естественно, что эта гигиеническая функция и ее нормативные количественные показатели определяются органами здравоохранения. Вторая функция ПДК — регуляторная — устанавливает законодательный запрет на превышение ПДК, предъявляя на основе ПДК требования к выбросам⁹. Использование ПДК в качестве единственной регуляторной функции нерационально в условиях, когда по целому ряду вредных веществ во многих городах РФ из года в год наблюдаются многократные превышения ПДК (Ежегодник, 2023) и нет оснований надеяться, что повсеместное соблюдение нормативов ПДК во всех населенных пунктах РФ будет достигнуто в обозримом будущем.

Сам факт хронического многократного превышения ПДК в десятках городов страны говорит о том, что **этот показатель фактически так и не стал основанием для постановки и рационального решения управленческой задачи улучшения качества воздуха на конкретной территории, т. е. фактически не выполняет регуляторную функцию в отношении разрешенных выбросов.** Такая управленческая задача может быть поставлена, если для нее установлен четкий измеримый и, главное, достижимый целевой показатель качества воздуха и срок повсеместного достижения этого целевого показателя на управляемой территории.

Именно так, шаг за шагом, поэтапно приближая **целевые регуляторные показатели качества воздуха**¹⁰ к уровню гигиенического норматива ПДК, можно выработать маршрут поэтапного улучшения качества воздуха в регионах и в стране в целом. В этой связи уместно привести цитату из лекции одного

⁹ Отметим, что эти требования относятся к объектам негативного воздействия. О неполноте этих правовых требований речь пойдет ниже.

¹⁰ Такие целевые регуляторные показатели не являются гигиеническим показателем качества воздуха. Они лишь обозначают управленческий «промежуточный финиш» на пути к финальной цели — достижению ПДК.

из руководителей Администрации Президента Российской Федерации в 2013 г. на семинаре для губернаторов «Основы эффективного менеджмента в XXI веке»: «Основные принципы современного стратегического управления — умение устанавливать границы, т. е. отделять реально достижимое в определенном пространстве и времени от чисто теоретических, гипотетических целей» (цит. по Семинар, 2013).

К сожалению, до настоящего времени на государственном уровне управленческая задача повсеместного поэтапного улучшения качества воздуха в городах страны так и не сформулирована¹¹.

Роспотребнадзор разослал в свои территориальные органы письмо от 21.12.2021 г. № 02/26481-2021-32 «Об использовании в работе среднегодовых предельно допустимых концентраций». С одной стороны, это письмо не является нормативным правовым документом и поэтому не имеет правовых последствий в сфере ответственности Минприроды России и исполнительных органов субъектов федерации. С другой стороны, содержащиеся в этом письме ограничения (не применять ПДКсг «при расчетах размеров санитарно-защитных зон и при обосновании нормативов допустимых выбросов в атмосферный воздух») **следует рассматривать, как первый шаг в разграничении функций гигиенических нормативов качества воздуха и регуляторных функций нормативов качества воздуха, которые должны действовать в области нормирования выбросов.**

Регуляторные функции могли бы быть приданы целевым / контрольным показателям качества воздуха, например при установлении нормативов временно разрешенных выбросов (ВРВ). Такие целевые показатели могли бы быть приняты на межведомственной основе либо решением Правительства Российской Федерации для каждого загрязняющего вещества единым числовым значением и сроком его повсеместного достижения для всей территории страны.

¹¹ Проводимый в рамках федерального проекта «Чистый воздух» эксперимент не оперирует количественными целями поэтапного снижения концентраций загрязняющих веществ с указанием сроков выполнения для каждого этапа.

Международный опыт (ВОЗ, ЕЭК ООН)

По оценкам ВОЗ, «в 2019 г. 99 % мирового населения проживало в районах, в которых уровень загрязнения воздуха превышал значения, установленные в рекомендациях ВОЗ по качеству воздуха <...>, загрязнение атмосферного воздуха (воздуха вне помещений) стало причиной преждевременной смерти 4,2 миллиона человек во всем мире» (ВОЗ, 2022).

В 2021 г. ВОЗ опубликовала обновленные рекомендации по качеству воздуха для основных загрязняющих веществ МРП (WHO, 2021)¹². По некоторым показателям рекомендации 2021 г. заметно отличаются от рекомендаций 2005 г. (см. табл. 2), ужесточая рекомендуемые критерии как для острого (кратковременного), так и для хронического (долговременного) загрязнения воздуха. Важно отметить, что некоторые ранее рекомендованные ВОЗ показатели качества воздуха остались без изменения (см. табл. 3).

Учитывая, что огромное большинство населения планеты проживает в условиях, в которых качество воздуха значительно хуже, чем рекомендовано ВОЗ, и понимая, что рекомендованные ВОЗ критерии качества воздуха во многих странах могут быть достигнуты только в относительно отдаленном будущем, в этом документе ВОЗ уделяет особое внимание двум аспектам.

Во-первых, каждая страна, опираясь на рекомендованные ВОЗ критерии и принимая во внимание всё разнообразие факторов, отражающих национальные особенности, разрабатывает и вводит в действие обязательные к исполнению нормативы качества воздуха. В документе ВОЗ есть специальный раздел, который подробно описывает для руководства стран путь, следуя которому страны на основе рекомендованных ВОЗ критериев могут разработать обязательные к исполнению нормативы.

¹² В оригинале этой публикации ВОЗ, в ее глоссарии указывается, что это «необязывающие рекомендации с доказательной базой» (в оригинале: “evidence-informed, non-binding recommendations”).

**Рекомендованные ВОЗ в 2021 г. критерии качества воздуха
и их сопоставление с критериями, рекомендованными
ВОЗ в 2005 г.¹³ (Ежегодник, 2023).**

Table 3.26. Recommended 2021 AQG levels and 2005 air quality guidelines

Pollutant	Averaging time	2005 air quality guideline	2021 AQG level
PM _{2.5} , µg/m ³	Annual	10	5
	24-hour ^a	25	15
PM ₁₀ , µg/m ³	Annual	20	15
	24-hour ^a	50	45
O ₃ , µg/m ³	Peak season ^b	–	60
	8-hour ^a	100	100
NO ₂ , µg/m ³	Annual	40	10
	24-hour ^a	–	25
SO ₂ , µg/m ³	24-hour ^a	20	40
CO, mg/m ³	24-hour ^a	–	4

^a 99th percentile (i.e. 3–4 exceedance days per year).

^b Average of daily maximum 8-hour mean O₃ concentration in the six consecutive months with the highest six-month running-average O₃ concentration.

¹³ Сопоставление рекомендованных ВОЗ в 2021 г. критериев качества воздуха с действующими в РФ нормативами ПДК приводится в Ежегоднике «Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2022 г.» (Ежегодник, 2023).

Рекомендованные ранее ВОЗ (2005 г.) показатели качества воздуха для NO₂, SO₂ и CO (для коротких периодов осреднения), которые не были пересмотрены в 2021 г. и остаются в силе

Table 0.2. Air quality guidelines for nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide (short averaging times) that were not re-evaluated and remain valid

Pollutant	Averaging time	Air quality guidelines that remain valid
NO ₂ , µg/m ³	1-hour	200
SO ₂ , µg/m ³	10-minute	500
CO, mg/m ³	8-hour	10
	1-hour	35
	15-minute	100

В документе ВОЗ детально рассматриваются различные факторы, которые следует учитывать при разработке стандартов качества воздуха. В лаконичной форме эти факторы перечислены в пресс-релизе Глобальной кампании за чистый воздух «Что такое рекомендации ВОЗ по качеству воздуха?» (ВОЗ и др., 2021): **«Правительства во всем мире используют рекомендации ВОЗ по-разному в зависимости от своих технических возможностей, экономических возможностей, политики управления качеством воздуха и других политических и социальных факторов. Прежде чем принять рекомендованные ВОЗ критерии в качестве юридических стандартов, правительства должны учитывать свои уникальные местные условия».** Отметим, что применительно к реалиям Российской Федерации было бы абсолютно оправданным устанавливать на межведомственной основе, а не решением Роспотребнадзора, более мягкие, но обязательные к исполнению промежуточные целевые нормативы качества воздуха (в дополнение к ПДК).

Во-вторых, ВОЗ рекомендует правительствам стран подход поэтапного достижения рекомендованных критериев качества воздуха. Для этого в документе ВОЗ приводится сводка рекомендованных критериев качества воздуха с промежуточными целевыми показателями (см. табл. 4). Естественно, что для каждого промежуточного целевого показателя должен быть установлен и срок его повсеместного достижения на всей территории страны.

Таблица 4

Рекомендованные ВОЗ критерии качества воздуха и целевые промежуточные показатели для их поэтапного достижения

Table 3.24. Summary of recommended long- and short-term AQG levels and interim targets

Pollutant	Averaging time	Interim target				AQG level
		1	2	3	4	
PM _{2.5} , µg/m ³	Annual	35	25	15	10	5
	24-hour ^a	75	50	37.5	25	15
PM ₁₀ , µg/m ³	Annual	70	50	30	20	15
	24-hour ^a	150	100	75	50	45
O ₃ , µg/m ³	Peak season ^b	100	70	–	–	60
	8-hour ^a	160	120	–	–	100
NO ₂ , µg/m ³	Annual	40	30	20	–	10
	24-hour ^a	120	50	–	–	25
SO ₂ , µg/m ³	24-hour ^a	125	50	–	–	40
CO, mg/m ³	24-hour ^a	7	–	–	–	4

^a 99th percentile (i.e. 3–4 exceedance days per year).

^b Average of daily maximum 8-hour mean O₃ concentration in the six consecutive months with the highest six-month running-average O₃ concentration.

Вопросу повсеместного достижения приемлемого качества воздуха, т. е. обеспечения справедливости, уделяется отдельное место в упомянутых Рекомендациях ВОЗ-2021. В разделе 1.3.4 указывается на проблему преодоления неравенства и шире — несправедливости в обеспечении хорошего качества воздуха для всех жителей страны, где бы они ни проживали. В правовом отношении это означает переход от принципа равноправия, не гарантирующего равенства в реализации прав на чистый воздух, к осуществлению принципа равенства, что символизирует отнесение права каждого на чистый воздух к категории основных прав человека. Разумеется, такой переход должен быть подкреплён соответствующими правовыми гарантиями.

Вопросу методологии государственного управления качеством атмосферного воздуха уделено специальное внимание в документе ЕЭК ООН (ЕЭК, 2012), в котором рекомендуется при постановке и решении задач улучшения качества воздуха пользоваться методологией С.М.А.Р.Т.¹⁴ (конкретные, измеримые, достижимые, реальные и имеющие временные рамки цели). В этом документе, адресованном странам ВЕКЦА (Восточная Европа, Кавказ, Центральная Азия), рекомендуется устанавливать промежуточные целевые регуляторные показатели качества воздуха и сроки их достижения¹⁵ (Чичерин, 2007). **Особо подчеркивается, что «если не будет установлено сроков их соблюдения, то эти целевые показатели будут оставаться на уровне заявлений, не имеющих какой-либо реальной силы».**

¹⁴ В оригинале — S.M.A.R.T.: Specific, Measurable, Achievable, Realistic, Time-bounded.

¹⁵ Предложения по установлению в Российской Федерации промежуточных целевых показателей качества воздуха были по поручению Росгидромета изложены в докладе автора настоящей статьи на совещании Рабочей группы ЕЭК ООН 11 июня 2007 г.

Международный опыт (ЕС, США)

Основными законодательными актами Европейского союза (далее - ЕС), регулирующими охрану атмосферного воздуха населенных мест, являются директивы ЕС 2008/50ЕС (Directive, 2008) и 2004/107/ЕС (Directive, 2004), а также поправки к ним (EU) 2015/1480 (Directive, 2015).

В параграфе 2 Директивы ЕС 2008/50ЕС утверждается: «Для того чтобы защитить здоровье человека и окружающую среду в целом, <...> необходимо <...> установить целевые параметры качества окружающего воздуха, учитывая стандарты, рекомендации и программы Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ)». Подчеркнем, что отсылка в приведенной цитате к стандартам и рекомендациям ВОЗ означает, что в правовом поле ЕС вообще отсутствуют гигиенические нормативы качества воздуха, а принятые в ЕС целевые параметры имеют статус регуляторных, а не гигиенических критериев, на основе которых и выстраивается политика улучшения качества воздуха в странах ЕС.

В обязательном приложении к указанным директивам (с поправками из директивы 2015/1480) приводятся предельные значения уровней загрязнения воздуха для конкретных загрязняющих веществ и конкретные сроки их достижения, которые обязательны для исполнения всеми странами-членами ЕС.

Время показывает, что для целого ряда стран достижение амбициозных целевых показателей качества воздуха оказалось трудновыполнимой задачей (о связанных с этим правовых проблемах см. ниже).

В таблице 5 показана доля городского населения в ЕС-28¹⁶, подвергавшегося воздействию концентраций, превышавших регуляторные критерии ЕС и ВОЗ за период 2013–2015 гг. (ЕЕА Report, 2017) (как можно увидеть из этой таблицы, регуляторные

¹⁶ В оригинале таблицы 5 (см. ссылку на источник) используется обозначение EU-28, которое фиксирует, что в этой таблице приводятся сведения по ЕС в целом, когда в его составе было 28 стран.

критерии ЕС мягче, чем гигиенические критерии ВОЗ¹⁷). Эта таблица наглядно показывает более благополучную картину оценки качества воздуха по регуляторным критериям ЕС, что, кроме прочего, отражает политику ЕС по поэтапному движению к достижению качества воздуха, соответствующего критериям ВОЗ.

Таблица 5

**Доля (%) городского населения в ЕС-28,
подвергавшегося воздействию концентраций,
превышавших критерии ЕС и ВОЗ за период 2013–2015 гг.
(в оценках указаны наименьшее и наибольшее
значения показателя за указанный период)**

Table ES.1 Percentage of the urban population in the EU-28 exposed to air pollutant concentrations above certain EU and WHO reference concentrations (minimum and maximum observed between 2013 and 2015)

Pollutant	EU reference value (*)	Exposure estimate (%)	WHO AQG (*)	Exposure estimate (%)
PM _{2.5}	Year (25)	7-8	Year (10)	82-85
PM ₁₀	Day (50)	16-20	Year (20)	50-62
O ₃	8-hour (120)	7-30	8-hour (100)	95-98
NO ₂	Year (40)	7-9	Year (40)	7-9
BaP	Year (1)	20-25	Year (0.12) RL	85-91
SO ₂	Day (125)	< 1	Day (20)	20-38

Key	< 5 %	5-50 %	50-75 %	> 75 %
-----	-------	--------	---------	--------

Весьма показательно наглядное сопоставление оценок качества воздуха в ЕС в 2021 г., выполненных по регуляторным критериям Директивы ЕС и по рекомендациям ВОЗ-2021 (см. рис. 1).

¹⁷ В этой связи уместно отметить беспочвенность критических высказываний о различиях регуляторных нормативов качества воздуха, принятых в разных странах. На самом деле, это лишь отражает различия в практической политике стран в охране атмосферного воздуха и не дискредитирует понятия гигиенических нормативов ПДК.

Figure 1. Share of the EU urban population exposed to air pollutant concentrations above certain EU standards and WHO guidelines in 2021

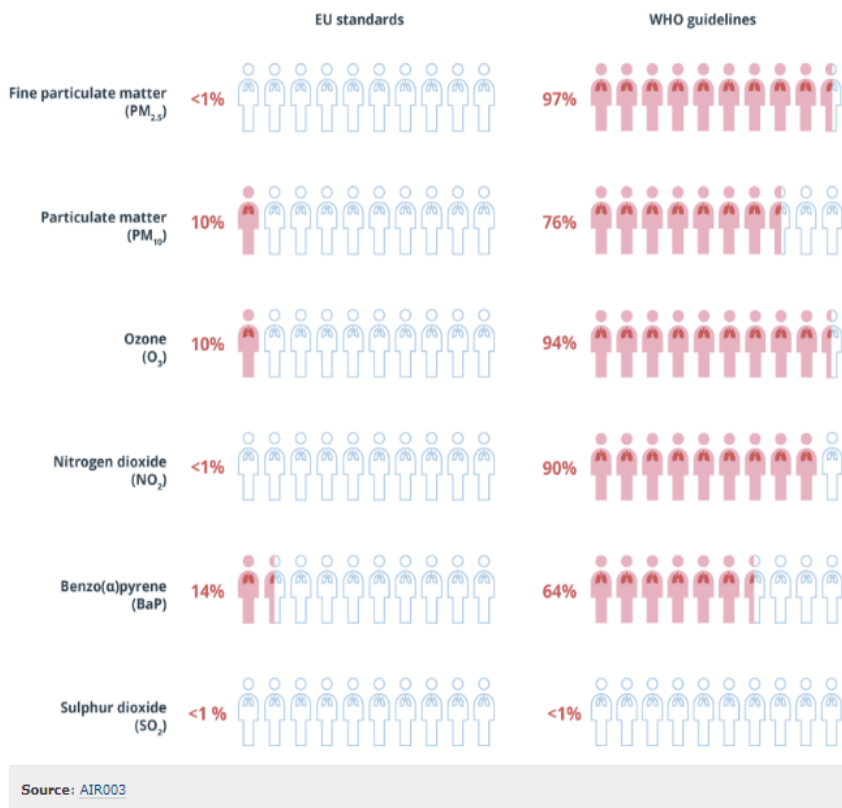


Рис. 1. Доля городского населения стран ЕС, подверженных воздействию концентраций, превышающих регуляторные критерии ЕС и рекомендации ВОЗ-2021 (EEA Briefing, 2023)

Сопоставление показателей на рисунке 1 и в таблице 5 показывает, что, несмотря на улучшение этих показателей по отношению к регуляторным критериям ЕС, картина далека от благополучия, если обратиться к оценкам по гигиеническим критериям ВОЗ.

Это сопоставление убедительно демонстрирует тот факт, что критерии, установленные директивами ЕС, являются не гигиеническими показателями, а регуляторными правовыми рычагами, которые ставят перед правительствами стран-членов ЕС задачу поэтапного улучшения качества атмосферного воздуха.

Учитывая обновленные рекомендации ВОЗ-2021 по качеству воздуха, Еврокомиссия в октябре 2022 г. (т. е. через год с небольшим после публикации обновленных рекомендаций ВОЗ) выдвинула предложения по пересмотру целевых критериев ЕС (предельных значений концентраций ЗВ), в которых ставится задача поставить ЕС на путь достижения нулевого уровня загрязнения к 2050 г. (Directives Revision, 2022).

В США, согласно Закону о чистом воздухе (US Act, 2022), нормативы качества воздуха, подлежащие соблюдению каждым штатом¹⁸, устанавливает Агентство по окружающей среде (US EPA). Эти нормативы более мягкие, чем рекомендации ВОЗ. Так, среднегодовой норматив США для мелких частиц PM_{2.5} составляет 9 мкг/м³, а ВОЗ рекомендует для этого критерия значение 5 мкг/м³. Для NO₂ среднегодовой норматив США равен 101 мкг/м³, а соответствующий показатель ВОЗ — 10 мкг/м³.

Для некоторых территорий США, на которых не соблюдаются установленные US EPA нормативы, в каждом штате должны быть составлены планы по достижению показателями качества воздуха установленных нормативных значений. После утверждения US EPA такого плана штат обязан в течение 18 месяцев обеспечить его выполнение (для SO₂, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5} и Pb). Для озона и CO на выполнение плана дается 24 месяца (US Implementation, 2023).

Международный опыт показывает, что в развитых странах обязательные к соблюдению целевые нормативы качества воздуха устанавливаются на более мягком уровне,

¹⁸ Федеральный Закон США о чистом воздухе прямо возлагает на штаты ответственность за соблюдение установленных федеральных нормативов качества воздуха.

чем рекомендованные ВОЗ гигиенические показатели, но эти обязательные нормативы должны быть достигнуты повсеместно и к определенному сроку. Очевидно, что эти целевые нормативы являются не гигиеническими, а регуляторными.

**От правовой ответственности предприятий —
к правовой ответственности органов исполнительной власти,
или: «от объекта – к территории»**

Законодательная основа правового регулирования в области охраны атмосферного воздуха с самого раннего этапа ее создания и вплоть до настоящего времени имеет существенные пробелы. В законах СССР (1980 г.) и Российской Федерации (1999 г. с изменениями) об охране атмосферного воздуха основные обязательные требования выдвигаются в отношении деятельности отдельных предприятий, имеющих источники выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Именно для отдельных предприятий устанавливаются нормативы предельно допустимых выбросов. При этом органы исполнительной власти всех уровней законодательно наделены определенными полномочиями в сфере охраны атмосферного воздуха, но ответственность за ненадлежащее использование этих полномочий законами не предусматривалась. Поэтому органы исполнительной власти субъектов федерации не нацелены законодательством на достижение показателями качества атмосферного воздуха установленных нормативов ПДК на управляемых ими территориях. Как следствие, так и не были созданы «работоспособные» правовые механизмы улучшения качества атмосферного воздуха в целом на территориях населенных пунктов до установленных гигиенических нормативов, которые были бы обязательны для соответствующих органов исполнительной власти.

Вместе с тем, Конституция Российской Федерации, гарантируя каждому право на благоприятную окружающую среду (ст. 42), обязывает каждого сохранять природу и окружающую среду (ст. 58).

Отметим важную особенность ст. 58 Конституции РФ, на которую почему-то не принято обращать внимание: в ст. 58 под термином «каждый» следует понимать не только физические и юридические лица, но и государственные органы. Именно такую трактовку ст. 58 устанавливает Конституционный Суд Российской Федерации в своем Определении от 15.07.2010 г. № 931-О-О: «Как указал Конституционный Суд Российской Федерации в Постановлении от 14 мая 2009 года № 8-П, конституционная обязанность сохранять окружающую среду, распространяющаяся и на государственные органы, является частью обеспечительного механизма реализации конституционного права каждого на благоприятную окружающую среду» (Конституционный Суд РФ, 2010).

Важным шагом в устранении указанного выше правового пробела в законодательстве явилось принятие в 2019 г. Федерального закона «О проведении эксперимента по квотированию выбросов загрязняющих веществ...» и федерального проекта «Чистый воздух», которыми предусмотрена ключевая роль органов исполнительной власти субъектов федерации в организации и осуществлении мер по улучшению качества атмосферного воздуха на территории 12 городов-участников эксперимента по квотированию выбросов.

В правовой инструментарий эксперимента по квотированию выбросов не были введены целевые промежуточные показатели качества воздуха с указанием сроков их достижения. А это могло бы поставить всю деятельность сторон эксперимента на более рациональную и понятную основу, позволило бы обоснованно оценить потенциал и объективные пределы осуществимости необходимых мер по достижению конкретных промежуточных уровней качества воздуха по приоритетным загрязняющим веществам в городах-участниках эксперимента.

Законом о квотировании выбросов не установлена ответственность субъектов федерации в лице высших должностных лиц органов исполнительной власти за результаты проведения эксперимента, но соответствующие оценки проводятся Правительством РФ.

Возложение ответственности за выполнение законодательных требований по улучшению качества атмосферного воздуха на органы

исполнительной власти является давно сложившейся практикой правоприменения в государствах-членах Европейского союза. Так, например, Верховный Суд Великобритании своим распоряжением от 19.11.2014 г. (UK Supreme Court, 2014) потребовал от министра окружающей среды, продовольствия и сельского хозяйства подготовить государственный план по повсеместному достижению уровня качества атмосферного воздуха по диоксиду азота в соответствии с Директивой ЕС 2008/50. Этот пример относится к ситуациям внутригосударственной юрисдикции. Но, как было отмечено выше, Директивы Евросоюза имеют надгосударственный статус, и поэтому упомянутая Директива ЕС 2008/50 о качестве воздуха обязательна для исполнения всеми государствами-членами Евросоюза.

Установленные в ЕС нормативы качества воздуха оказались трудновыполнимыми для ряда стран ЕС, но остаются обязательными для всех стран ЕС. О том, что достижение принятых директивами ЕС целевых нормативов качества воздуха (более мягких, чем рекомендации ВОЗ) является непростой задачей, можно судить по правовой претензии Высшего Европейского суда к Великобритании. Вот что об этом сообщало информационное агентство Рейтер: «Высший суд Европейского союза постановил в четверг, что Британия годами нарушала установленные блоком нормативы качества воздуха, и обязал ее соблюдать правила, повысив вероятность того, что страна может быть оштрафована, даже несмотря на то, что она вышла из ЕС. Британия покинула ЕС, включая орбиту Европейского суда (ЕСJ), в конце прошлого года¹⁹. Однако она согласилась применять решения Европейского суда по правам человека в любых делах, возбужденных пока она еще была членом ЕС» (EU Court, 2021).

И еще один пример привлечения государственных органов к ответственности за несоблюдение требований директивы ЕС

¹⁹ Имеется в виду конец 2020 года, когда закончился переходный период брекзит - выхода Великобритании из Европейского союза.

по качеству воздуха: «Сегодняшние действия — специальные дополнительные письма с официальным уведомлением — против Болгарии, Латвии и Словении соответствуют аналогичным шагам, предпринятым против Бельгии в ноябре 2012 года, и предстоящим судебным искам против всех других государств-членов, которые постоянно нарушают нормативы качества воздуха для частиц PM10» (EU Commission, 2013).

Право на благоприятную окружающую среду и проблема неравенства

Еще одна проблема связана с реализацией конституционного права каждого на благоприятную окружающую среду. Как можно увидеть в опубликованных официальных материалах об уровне загрязнения атмосферного воздуха в городах России (Ежегодник, 2023), далеко не преодолено очень существенное неравенство в реализации прав граждан разных городов на благоприятное качество атмосферного воздуха. Учитывая многолетний, хронический характер этого неравенства, его можно рассматривать, с одной стороны, как дискриминацию граждан по признаку ущемления прав на благоприятную окружающую среду и, с другой стороны, как извлечение предприятиями, выбросы которых приводят к сверхнормативному загрязнению воздуха, своеобразной экологической ренты за счет несоблюдения законодательства об охране атмосферного воздуха. Такое неравенство в значительной мере сформировалось как следствие взрывного характера индустриализации страны во второй трети прошлого века и крайне медленных темпов технологического обновления промышленности и городского хозяйства с учетом потребностей охраны окружающей среды.

Особое внимание проблеме преодоления этого неравенства, как упоминалось выше, уделяется в Рекомендациях ВОЗ-21. В этом документе отмечается, что качество воздуха в странах с низким уровнем душевых доходов значительно хуже, чем в странах с высокими доходами населения. Однако и в богатых странах

существует связь между социоэкономическим статусом определенных групп населения и качеством воздуха в местностях их проживания. Так, в объемном (более 700 стр.) документе US EPA о пересмотре нормативного критерия качества воздуха для мелких частиц (PM_{2.5}) отмечается такое обстоятельство: «Например, в Комплексной научной оценке (КНО) и дополнении к КНО за 2019 г. делается вывод о наличии убедительных доказательств того, что чернокожее и испаноязычное население в среднем подвергается более высокому воздействию PM_{2.5} и связанным с PM_{2.5} рискам для здоровья, чем неиспаноязычное белое население. Кроме того, исследования, оцененные в КНО и дополнении к КНО 2019 г., также предоставляют доказательства, указывающие на то, что сообщества с более низким социально-экономическим статусом (СЭС), как оценивалось в эпидемиологических исследованиях с использованием показателей СЭС, включая доход и уровень образования, в среднем подвергаются воздействию более высоких концентраций PM_{2.5} по сравнению с сообществами с более высоким уровнем СЭС» (Reconsideration, 2024).

Выводы

Законодательством установлено, что нормативы качества атмосферного воздуха — предельно допустимые концентрации — одновременно выполняют две разнородные функции: гигиеническую (для оценки качества воздуха) и регуляторную (для разработки нормативов выбросов и иных мер по улучшению качества воздуха). Многолетнее значительное превышение ПДК во многих городах России по ряду загрязняющих веществ означает, что нормативы ПДК не в полной мере выполняют предписанную им законодательством регуляторную функцию.

Значительные различия уровней загрязнения атмосферного воздуха в городах России означают ощутимое неравенство в обеспечении конституционных прав жителей этих городов на благоприятную окружающую среду, что в определенной мере

свидетельствует о различной степени озабоченности государства качеством воздуха в разных городах Российской Федерации.

Одной из важных причин неблагоприятной ситуации с качеством воздуха во многих городах России является совмещение в нормативах качества воздуха гигиенической (оценочной) и регуляторной функций. Эти функции целесообразно разделить.

Официальные документы ВОЗ содержат рекомендации по установлению странами промежуточных целевых нормативов качества воздуха для организации его поэтапного улучшения. Эти нормативы рекомендуется принимать с учетом их достижимости в обусловленные сроки, фактического уровня загрязнения воздуха, запроса общества на улучшение качества воздуха, наличия необходимых ресурсов и других факторов. Этот подход одобрен и Европейской экономической комиссией ООН.

Международный опыт (ЕС, США) показывает, что в развитых странах принят рекомендуемый ВОЗ подход поэтапного уменьшения уровня загрязнения воздуха на основе целевых (промежуточных) регуляторных показателей качества воздуха, более мягких, чем рекомендации ВОЗ. При этом конечной целью признается достижение рекомендуемых ВОЗ показателей качества воздуха. Такие целевые регуляторные нормативы, будучи более мягкими, чем гигиенические, дополняют последние и могут служить эффективным инструментом для формирования на государственном уровне поэтапных синхронизированных планов по улучшению качества воздуха в городах России с четкими количественными ориентирами в виде целевых значений концентраций загрязняющих веществ и сроков повсеместного достижения этих целевых нормативов.

При оценке качества воздуха по промежуточным целевым показателям можно определить, соответствуют ли достигнутые фактические показатели намеченным промежуточным целям, а оценка качества воздуха по гигиеническим показателям (ПДК) покажет, насколько удалось приблизиться к конечным целям по качеству воздуха.

РЕКОМЕНДАЦИИ

Учитывая позицию Роспотребнадзора в отношении фактического отказа от применения ПДКсг для целей нормирования выбросов и определения размеров санитарно-защитных зон, целесообразно издать нормативный правовой акт, в котором закрепить это положение.

Учитывая рекомендации ВОЗ и ЕЭК ООН и многолетнюю широкую международную практику нормирования качества атмосферного воздуха на основе целевых показателей, признать, что нормативные критерии качества атмосферного воздуха должны быть разделены на два вида:

– **нормативные гигиенические показатели** — предельно допустимые концентрации, утверждаемые Роспотребнадзором и применяемые для целей гигиенической оценки качества атмосферного воздуха по результатам государственного мониторинга атмосферного воздуха и не применяемые для целей нормирования выбросов;

– **нормативные регуляторные показатели** (применяемые для целей охраны атмосферного воздуха) — целевые (промежуточные) показатели качества атмосферного воздуха с указанием сроков их повсеместного достижения на всей территории Российской Федерации, которые разрабатываются на межведомственной основе с привлечением представителей исполнительных органов субъектов федерации, организаций науки, бизнеса и гражданского общества с учетом таких факторов, как фактические уровни загрязнения воздуха в городах РФ и тенденция их изменения, наличие технических, технологических, экономических, финансовых возможностей, приемлемость устанавливаемых количественных регуляторных целевых показателей для бизнеса и общества и, наконец, достижимость установленных целевых показателей повсеместно к установленному сроку. До введения в действие нормативных целевых регуляторных

показателей качества воздуха издать нормативный правовой акт Минприроды России, которым установить для подлежащих государственному регулированию загрязняющих веществ временные нормативы целевых показателей качества воздуха (ЦПКВ), численно равные соответствующим гигиеническим нормативам ПДКсс, действовавшим до введения в действие СанПиН 1.2.3685-21.

В качестве правового эксперимента (аналогично эксперименту по квотированию выбросов (ФЗ-95)) целесообразно разработать и провести пилотный проект по разработке нормативных регуляторных целевых показателей качества воздуха с различными периодами осреднения для нескольких городов с преобладанием выбросов стационарных источников и установить для стационарных источников в этих городах нормативы временно разрешенных выбросов (ВРВ) на основе регуляторных целевых (промежуточных) показателей качества атмосферного воздуха (ЦПКВ) в целом для города с датами поэтапного приближения к нормативам ПДВ и гигиеническим нормативам качества воздуха. По итогам осуществления пилотного правового эксперимента подготовить предложения по внесению поправок в законодательство по охране атмосферного воздуха и соответствующих подзаконных актов.

При обобщении данных государственного мониторинга атмосферного воздуха осуществлять оценку качества атмосферного воздуха как по гигиеническим, так и по регуляторным нормативам. При этом оценки качества воздуха по регуляторным нормативам покажут степень успешности/неуспешности намеченных мер по охране атмосферного воздуха на территории населенных пунктов и в целом по стране.

Откорректировать Методы расчета рассеивания выбросов вредных веществ в атмосферном воздухе (МРР), включив в них наряду с гигиеническими нормативами качества воздуха (ПДК) регуляторные целевые показатели (ЦПКВ).

Признать, что вопросы установления размеров СЗЗ относятся к ведению Роспотребнадзора и исключить пункт 12.13 из Методов расчета рассеивания выбросов вредных веществ в атмосферном воздухе, а также предложить Роспотребнадзору разработать

нормативный правовой акт по определению размеров санитарно-защитных зон с использованием методов расчета, содержащихся в МРР.

Переработать Методику разработки (расчета) и установления нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, заменив в ней гигиенические нормативы качества воздуха (ПДК) на ЦПКВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беспмятников Г. П., Кротов Ю. А. (1985). Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде. Справочник. — Л.: Химия. 528 с.

ВОЗ (2022). Загрязнение атмосферного воздуха (воздуха вне помещений) / Всемирная организация здравоохранения. Информационный бюллетень от 19 декабря 2022 г. URL: [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).

ВОЗ и др. (2021). Что такое рекомендации ВОЗ по качеству воздуха? Глобальная кампания ВОЗ и других международных организаций «За чистый воздух». URL: <https://breathelife2030.org/ru/news/w-h-o-air-quality-guidelines/>.

Ежегодник (2023). Ежегодник «Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2022 г.». — СПб: ООО «Амирит». 254 с. URL: http://www.voeikovmgo.ru/images/stories/publications/2023/Ежегодник_Состояние_загрязнения_атмосферы_в_городах_на_территории_России_за_2022_г..pdf.

ЕЭК (2012). Руководящие принципы разработки национальных стратегий использования мониторинга качества воздуха и воды как средства экологической политики для стран Восточной Европы, Кавказа, Центральной Азии и Юго-Восточной Европы (ECE/CEP/168) / Европейская экономическая комиссия ООН. — Нью-Йорк–Женева. 60 с. URL: https://unece.org/sites/default/files/2021-12/1221798_ECE_CEP_168-light_0.pdf.

Закон СССР «Об охране атмосферного воздуха» (1980) (не действует). URL: <https://docs.cntd.ru/document/9003794>.

Конституционный Суд РФ (2010). Пункт 4 Определения Конституционного Суда Российской Федерации от 15.07.2010 г. № 931-О-О. URL: <https://legalacts.ru/doc/opredelenie-konstitutsionnogo-suda-rf-ot-15072010-n-931-o-o-po/>.

Конференция ООН (1972). Декларация Конференции Организации Объединенных Наций по проблемам окружающей человека среды (Стокгольм, 1972 г.). URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/declarations/declarathenv.shtml.

Кротов Ю. А. (2002). К установлению гигиенических критериев качества атмосферного воздуха и его влияния на другие природные среды / в кн.: Проблемы физики пограничного слоя атмосферы и загрязнения воздуха. — СПб: Гидрометеиздат. С. 303–309.

Методические указания (1989). Временные методические указания по обоснованию предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест / утв. Минздравом СССР 15.06.88 г. № 4681-88. — М.: Минздрав СССР; Главное санитарно-эпидемиологическое управление. 110 с.

Постановление (1972). Постановление ЦК КПСС и Совета министров СССР от 29.12.1972 г. № 898. URL: https://www.libussr.ru/doc_ussr/usr_7960.htm.

РД 52.04.186-89. (1989). Руководство по контролю загрязнения атмосферы. — М.: Гидрометеиздат. 694 с.

Рязанов В. А. (1954). Санитарная охрана атмосферного воздуха. — М.: Медгиз. 236 с.

СанПиН (2021). СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» / утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. № 2.

Семинар (2013). Основы эффективного менеджмента в XXI веке / Семинар при Администрации Президента Российской Федерации. Архив публикаций ИД «Коммерсант». 14.06.2013. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/2210903>.

Смирнова И. В. (2024). Частное сообщение.

Чичерин С. С. (2007). О состоянии и проблемах мониторинга загрязнения атмосферы и подходах к их решению / Материалы совещания Рабочей группы ЕЭК ООН 11 июня 2007 г., Дворец Наций, Женева (текст: <https://unece.org/fileadmin/DAM/env/europe/monitoring/workshops/wksp%207.06.07.Geneva/Russia.pdf>, 10 с.; презентация: https://docs.yandex.ru/docs/view?url=yabrowser%3A%2F%2F4DT1uXEPrrJRxiUFoewruBKKlh8CU8fbTEZuU2PO82l-K---QPIG2sZbdLcnjiKQ0X7uBLdtoKaqaEbvCUPaQHnzf-63hp6xAxtKuVMTd5-k1q3wUtS5ledziVAs-rUtA_QWv82RuiCp6iPeYF8w%3D%3D%3Fsign%3D6ZhVC-Oy56aKllshsdMPNgHjCD4DgwiecdQp7kJH4Q%3D&name=Russia.ppt&nosw=1).

Шур П. З., Хасанова А. А. (2021). Аналитический обзор подходов к обеспечению безопасности при обосновании гигиенических нормативов содержания химических веществ в атмосферном воздухе // Анализ риска здоровью. № 2. С. 156–167.

Directive (2004). Directive 2004/107/EC relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32004L0107>.

Directive (2008). Directive 2008/50/EC on ambient air quality and cleaner air for Europe. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0050>.

Directive (2015). Commission Directive (EU) 2015/1480 amending several annexes to Directives 2004/107/EC and 2008/50/EC. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32015L1480>.

Directives Revision (2022). Revision of the Ambient Air Quality Directives. COM (2022). Brussels, 26/10/2022. URL: https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality/revision-ambient-air-quality-directives_en.

EEA Briefing (2023). Europe's air quality status. 31 May 2023. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/europes-air-quality-status-2023>.

EEA Report (2017). Air quality in Europe – 2017 / EEA report № 13/2017, Luxembourg. 74 p. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2017>.

EU Commission (2013). Environment: a fresh legal approach to improving air quality in Member States / European Commission. Press release Brussels, 24 January 2013. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_13_47.

EU Court (2021). EU court orders Britain to fix air pollution, in first post-Brexit ruling / BRUSSELS (Reuters), 4 March 2021. URL: <https://www.reuters.com/article/us-eu-britain-court-pollution-idUSKBN2AW182/>.

Reconsideration (2024). Reconsideration of the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter / US EPA, 5 Feb 2024. URL: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-02/pm-naaqs-final-frn-pre-publication.pdf>.

US Act (2022). US Clean Air Act as Amended (Enacted 27.12.2022). URL: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/COMPS-8160/pdf/COMPS-8160.pdf>.

US Implementation (2023). Process of Working with Areas to Attain and Maintain NAAQS (Implementation Process) / Last updated on November 30, 2023. URL: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/process-working-areas-attain-and-maintain-naaqs-implementation-process>.

UK Supreme Court (2014). Judgment of the Court (Second Chamber) of 19 November 2014. OJ C 274, 21.9.2013. URL: <http://curia.europa.eu/juris/document/document.jsf?jsessionid=9ea7d2dc30d5cd1519743d0044a9b338b832a1750026.e34KaxiLc3qMb40Rch0SaxuSbNr0?text=&docid=161268&pageIndex=0&doclang=EN&mode=req&dir=&occ=first&part=1&cid=31017>.

WHO (2021). WHO global air quality guidelines. Particular matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide / Geneva, World Health Organization. 298 p. URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf>.

**СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКОЙ И СТОХАСТИЧЕСКОЙ
МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ
ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА ГОРОДОВ**

*Е. Л. Генихович, В. И. Кириллова, Д. Ю. Румянцев,
Е. А. Яковлева, И. Н. Павлов, Е. В. Булавина*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Voeikov Main Geophysical Observatory
St. Petersburg, Karbysheva st., 7

E-mail: dmap@main.mgo.rssi.ru

Поступила в редакцию 02.03.2024
Поступила после доработки 12.04.2024

Введение

Наряду с установлением нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу (НДВ), прогноз повышенного загрязнения воздушного бассейна городов и соответствующих неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) занимает важное место в функционирующей в нашей стране системе управления качеством атмосферного воздуха. В соответствии с положениями ст. 19 Закона об охране атмосферного воздуха (ФЗ-96, 1999), ведомством, ответственным за прогнозирование НМУ, является Росгидромет. Анализ информации, которая на регулярной основе поступает в ФГБУ «ГГО» как методический центр Росгидромета по прогнозированию НМУ, показывает, что по состоянию на 1 января 2023 г. территориальные органы Росгидромета в 2022 г. обеспечивали прогнозирование НМУ для 1133 городов и поселений нашей страны.

Основанные на результатах прогнозирования предупреждения о НМУ передавались на 3330 предприятий, из которых около 3089 получали такие предупреждения в рамках адресного обслуживания, предусматривающего при прогнозировании учет технических параметров источников выбросов.

Согласно определению, приведенному в ФЗ-96, неблагоприятными метеорологическими условиями называются метеорологические условия, «способствующие накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферного воздуха». В основу методологии прогнозирования НМУ, применяемой в нашей стране уже около 50 лет, положены результаты экспериментальных и теоретических (как аналитических, так и численных) исследований закономерностей распространения в атмосфере загрязняющих веществ (ЗВ) от источников различного типа, которые проводились в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО) с конца 1960-х гг. Полученные при этом выводы были суммированы в монографиях М. Е. Берлянда (1985) и Л. Р. Сонькина (1991) (см. также публикацию Genikhovich et al., 2004). Их можно сформулировать следующим образом.

Уровни загрязнения воздуха, которые создаются выбросами ЗВ, поступающими в атмосферу от определенного источника, зависят от физических и физико-химических свойств этого ЗВ, технических характеристик источника или источников выброса (включающих как мощность выброса, так и, например, высоту и диаметр дымовых труб, объемный расход и перегрев выбрасываемой в воздух газовой смеси для каждого источника, их расположение и взаимную ориентацию и др.), метеорологических параметров, определяющих закономерности переноса и рассеивания атмосферных примесей, и ряда других факторов. Для каждого источника выбросов ЗВ и, соответственно, для выбрасываемых ЗВ можно установить такие неблагоприятные метеорологические условия, которые приводят, по сравнению с прочими метеоусловиями, к увеличенному загрязнению приземного слоя атмосферы и зависят от ряда факторов, в частности, если речь идет о загрязнении воздуха в масштабах

города, от технических характеристик источников и их взаимного расположения. Так, например, если в качестве характеристики метеорологических условий использовать скорость ветра, то к повышенному загрязнению воздуха выхлопными газами автотранспорта обычно приводят так называемые застойные ситуации (малые скорости ветра, ослабленный турбулентный обмен), для выбросов из дымовых труб мощных ТЭЦ к повышенному загрязнению приводят скорости ветра порядка 5–8 м/с, а в случае ветровой эрозии угольной пыли, поступающей в атмосферу от штабелей на портовых терминалах, к НМУ, как правило, относятся скорости ветра порядка 15 м/с и более. Другим источникам также соответствуют НМУ, зависящие от характеристик этих источников. Поскольку суммарное загрязнение атмосферы города формируется в результате «суперпозиции вкладов» совокупности отдельных источников выброса ЗВ, то применительно к воздушному бассейну этого города неблагоприятные метеорологические условия по каждому ЗВ определяются набором технических параметров выброса и пространственным распределением всех городских источников этого ЗВ. Такой вывод следует не только из формальной теории, но и из анализа накопленных эмпирических данных мониторинга загрязнения воздуха, который, в частности, подтверждает, что НМУ могут существенно различаться даже для двух сравнительно близко расположенных городов. К сожалению, в определении, которое дано в ФЗ-96, это обстоятельство не отражено.

Действующее законодательство (ФЗ-96, ст. 19) требует прогнозировать НМУ и обязывает предприятия при получении прогнозов НМУ проводить мероприятия по уменьшению (регулированию) выбросов ЗВ в зависимости от прогнозируемой степени опасности. Согласно действующему Порядку (2011), прогнозы НМУ второй и третьей степени опасности соответствуют возможности достижения наиболее высокого загрязнения воздуха с уровнем доверительной вероятности 98 %, т. е. относятся к суммарной продолжительности 7–8 суток. Тем самым обеспечивается согласие с уровнем доверительной вероятности,

которому соответствуют нормативы допустимых выбросов, устанавливаемые для ограничения значений максимальных концентраций. Используемые при этом расчетные формулы из документа (Методы, 2017), равно как и формулы из более ранних нормативных документов по расчету загрязнения воздуха, основаны на методологии, которая разработана в ГГО. Как показало сравнение с результатами натурных экспериментов, в рамках этой методологии расчетная максимальная концентрация соответствует уровню доверительной вероятности 98–99 % (см. многочисленные публикации, включая монографию (Берлянд, 1975), а также статьи в сборниках «Труды ГГО», вышедших с начала 1960-х до середины 1980-х гг. с подзаголовком «Атмосферная диффузия и загрязнения воздуха»). С учетом прогнозов НМУ первой степени опасности, которые соответствуют возможности менее значительного увеличения загрязнения воздуха, в целом для НМУ в Порядке (2011) предусмотрен уровень доверительной вероятности 10 %, что позволяет гарантированно не пропустить повышения загрязнения воздуха даже «в пограничных с НМУ ситуациях».

Следует подчеркнуть, что, в соответствии с действующим атмосфероохранным законодательством, на основе прогноза НМУ включается механизм регулирования (сокращения) выбросов (только промышленных), который направлен на предотвращение роста загрязнения воздуха при наступлении НМУ. Иначе говоря, прогноз НМУ запускает систему организационно-технических мероприятий, направленных на противодействие реализации возможных негативных последствий НМУ. Следовательно, этот прогноз имеет такой же смысл, как и прогноз прочих активных воздействий на окружающую среду, направленный на то, чтобы воспрепятствовать реализации возможных негативных погодных последствий за счет принятия людьми соответствующих активных мер (например, воздействие различными химикатами на облака определенной формы и вида, в т. ч. на градовые облака). Вместе с тем, следует отметить, что в настоящее время на законодательном уровне обсуждается вопрос о принятии новой редакции Закона об охране атмосферного воздуха

(ФЗ-96, 1999), в котором, по-видимому, прогноз НМУ будет трактоваться исходя из тех же принципов, как и прочие прогнозы метеорологических условий, предназначенные для информирования населения.

Оперативное прогнозирование НМУ осуществляется в России на основе действующего нормативного документа РД (1993), а также Порядка (2011). Рекомендованная этими документами методология в значительной степени основана на разработках, выполненных ГГО. В настоящее время запланирована актуализация этих двух документов. Тем не менее, применяемая на практике «нормативная методология» прогнозирования НМУ излагается в том виде, в котором она существует на момент подготовки данной статьи.

Практическое построение схем прогноза НМУ для конкретных городов и населенных пунктов в настоящее время базируется главным образом на разработке стохастических (физико-статистических) моделей загрязнения воздуха, построенных с использованием массивов исторических данных инструментального мониторинга загрязнения воздуха, а также сопутствующих метеорологических параметров, аэрологической и синоптической информации. Для описания такого подхода в современной литературе используется термин *big data*, который на момент разработки РД (1993) еще не был введен в широкое обращение.

Краткое описание представленного в РД (1993) и Порядке (2011) формального аппарата разработки прогностических схем будет приведено ниже. В настоящем разделе следует отметить только, что его достоинством, помимо высокой оправданности прогностических схем, является возможность его применения в отсутствие баз данных инвентаризации выбросов или в ситуациях, когда такие данные не являются достаточно полными и/или достоверными. Однако для разработки прогностических схем указанный подход требует наличия данных инструментального мониторинга загрязнения воздуха, который в Российской Федерации в основном ведется только в сравнительно крупных городах и населенных пунктах.

Хотя для случаев отсутствия рядов измеренных концентраций в РД (1993) уже предусмотрены определенные возможности разработки схем прогноза НМУ с учетом технических параметров источников выброса ЗВ основных промышленных предприятий, эти работы нуждаются в дополнительном развитии.

Последняя четверть XX и начало XXI столетий были отмечены активной разработкой поколения численных моделей распространения ЗВ в атмосфере, которые получили название «химические транспортные модели» (ХТМ). По сравнению с предшествующими моделями атмосферной диффузии ХТМ отличаются более детальным описанием трансформации атмосферных примесей, в т. ч. за счет их химического и физического взаимодействия, а также за счет более реалистичного моделирования характеристик воздушного потока, переносящего (транспортирующего) примеси (WMO, 2016; Theobald et al., 2016; Kukkonen et al., 2012). Для этого используется численное решение системы уравнений прогноза погоды (в литературе соответствующая часть вычислительного процесса иногда упоминается как «метеорологический драйвер»). При компьютерной реализации ХТМ программные модули, обеспечивающие численное решение уравнений прогноза погоды и уравнений переноса примеси, могут последовательно работать на каждом временном шаге, т. е. в режиме *online* (такие модели в зарубежных публикациях иногда упоминаются, как “integrated”, т. е. «объединенные, комплексные»). Расчеты могут проводиться также в режиме *offline*, когда сначала на всем рассматриваемом интервале времени решается система уравнений прогноза погоды, а затем полученные характеристики воздушного потока используются при численном решении системы уравнений переноса и трансформации атмосферных примесей для определения коэффициентов этих уравнений. Далее в настоящей статье термин ХТМ будет относиться только к эйлеровым моделям, численная реализация которых связана с применением метода сеток, хотя ряд приводимых ниже соображений сохраняют силу и при обсуждении возможностей моделей и/или численных методов других типов.

Активная разработка и внедрение ХТМ обусловлены прогрессом в области параметризации атмосферных процессов, а также развитием методов вычислительной математики и бурным ростом доступных вычислительных мощностей. Тем не менее, при использовании ХТМ проблема пространственного разрешения определяющих масштабов рассматриваемых процессов сохраняется по-прежнему. Как видно, например, из обзора работ по ХТМ, приведенного в статье Е. Л. Гениховича с соавторами (2016), в этих работах в течение ряда лет рассматривались в основном процессы регионального, глобального и мезо- масштабов. Как правило, в таких масштабах поля метеоэлементов и концентрации атмосферных примесей являются сравнительно гладкими, и, соответственно, при их численной аппроксимации нет необходимости добиваться очень высокого пространственного разрешения получаемых численных решений.

В последнее десятилетие, однако, стали появляться публикации, посвященные применению ХТМ при моделировании и прогнозировании загрязнения воздуха в городском масштабе. Соответствующие работы ведутся как за рубежом, так и в России (см., например, Thunis et al., 2016; Кузнецова и др., 2019). При этом зарубежные исследователи довольно быстро обнаружили, что полученные результаты расчетов плохо согласуются с данными натурных измерений и что одной из основных причин такого расхождения является несоответствие реальных городских масштабов пространственной изменчивости характеристик загрязнения воздуха пространственному разрешению модельных расчетов на крупной по сравнению с указанными городскими масштабами сетке. В свою очередь, пространственное разрешение модельных расчетов загрязнения воздуха в городах, проводимых с применением ХТМ, зависит от трех факторов:

- пространственного разрешения городских полей метеоэлементов, генерируемых с помощью метеорологического драйвера;
- пространственного разрешения полей концентрации рассматриваемых ЗВ, получаемых на основе моделирования процессов атмосферного переноса примесей;

– пространственного разрешения используемых в расчетах данных об источниках выбросов ЗВ в атмосферу.

Для уменьшения влияния второго и третьего из указанных факторов разработчики известной химической транспортной модели ЕМЕР, применяющейся в Европе в оперативной практике для оценки трансграничного переноса загрязняющих веществ на большие расстояния (в зависимости от пространственного разрешения данных инвентаризации выбросов в настоящее время обычно используются сетки с шагами по горизонтали от 2,5 до 25 км), модифицировали свою модель (см., например, Denby et al., 2020), обеспечив при этом возможность проведения расчетов для Норвегии с использованием квадратных сеток с шагом 50 или 250 м, а также моделирования распространения примесей от точечных источников в «подсеточном масштабе». К сожалению, опубликованные результаты не позволяют сделать вывод об эффективности применения предложенного подхода для оперативного прогнозирования загрязнения воздуха в городах и населенных пунктах.

Более перспективным представляется подход к моделированию климатических характеристик воздушного бассейна городов, включая загрязнение воздуха, описанный, например, в статье Esau et al. (2021). Указанный подход основан на применении (как и в расчетах по ХТМ) вложенных сеток. При этом, однако, на конечном этапе используется пространственное разрешение порядка нескольких метров, а численное решение соответствующих сеточных уравнений осуществляется с применением технологии «моделирования больших вихрей» (LES). В работах ряда европейских исследователей такие расчеты проводятся с помощью различных версий модели PALM (Maronga et al., 2015). Имеется информация об использовании этой модели применительно к решению соответствующих задач для Берлина, Праги и Гамбурга (с пространственным разрешением 1 м), Хельсинки (с пространственным разрешением 8 м) и ряда других городов. При всей перспективности описанного подхода верификация получаемых результатов вызывает определенные сложности. Существенным препятствием для его массового практического

использования является очень большой объем вычислительных работ, который, вплоть до настоящего времени, могут обеспечить только крупные суперкомпьютерные вычислительные центры.

Анализируя два указанных подхода к прогнозированию загрязнения атмосферного воздуха в городском масштабе, можно прийти к выводу, что они оба обладают определенными достоинствами и недостатками. Статистические численные модели по сравнению с детерминистическими обладают огромным преимуществом: для их разработки и использования не требуется располагать полными и достоверными данными инвентаризации выбросов рассматриваемых ЗВ (получение таких данных может быть сопряжено с определенными трудностями). Поскольку статистическая модель «обучается» на реальных данных инструментального мониторинга, от генерируемых на ее основе прогнозов трудно ожидать значительных расхождений с фактическими результатами измерений. Вместе с тем, легко понять, что эти измерения, будучи локальными, подвержены влиянию местных условий размещения пунктов мониторинга и, как следствие, влиянию турбулентности, генерируемой на городских зданиях, особенностей городской застройки, конфигурации улично-дорожной сети и локальных вариаций характеристик транспортных потоков, а также влиянию ряда других факторов, которые содержат значительную случайную составляющую, т. е. являются «сильно зашумленными». Характеристики загрязнения воздуха в районе размещения пункта мониторинга определяются не только (и даже не столько) характеристиками воздушного потока в точке размещения пункта мониторинга, сколько всеми «сечениями» городских (т. е. содержащих сильную случайную составляющую) метеополей вдоль траекторий переноса ЗВ от их источников к постам мониторинга. При этом разработка и применение статистических моделей прогноза в основном возможны в городах (населенных пунктах), где организован инструментальный мониторинг загрязнения атмосферного воздуха и накоплены ряды данных наблюдений

за загрязнением воздуха и сопутствующими метеорологическими параметрами, характеристиками синоптических условий и др.

Что же касается детерминистических эйлеровых численных ХТМ (достоинства и недостатки лагранжевых моделей в данной статье не обсуждаются), то возможность их разработки и применения не лимитируется требованием организации в городе систематического инструментального мониторинга загрязнения атмосферного воздуха. Такие модели обычно обеспечивают приемлемый учет пространственно-временной изменчивости мезомасштабной или региональной составляющей метеорологических и синоптических полей, в т. ч. соответствующих прогностических значений. Вместе с тем, определенные сомнения вызывает достоверность результатов расчетов с использованием детерминистических ХТМ для городских условий. В связи с обсуждавшейся ранее проблемой недостаточного пространственного разрешения этих моделей следует упомянуть, что осредненным по крупным ячейкам сетки (размер которых велик, например, по сравнению с высотой источников, шириной улиц и пр.) значениям концентрации ЗВ соответствуют такие НМУ, которые могут значительно отличаться от НМУ для локальных (не осредненных по крупным ячейкам) концентраций. При этом формальное повышение пространственного разрешения используемых сеток не обязательно приводит к улучшению согласия между данными инструментального мониторинга в городах и результатами модельных расчетов, поскольку пункты мониторинга размещены внутри городского слоя шероховатости, воздушные течения в котором характеризуются «повышенной зашумленностью».

Даже этого ограниченного перечня проблем, которые должны преодолеваться при решении задачи прогноза загрязнения воздушного бассейна городов, достаточно для того, чтобы прийти к выводу о необходимости повышения эффективности используемой методологии. В настоящей статье излагается новый метод разработки и реализации схем оперативного прогноза загрязнения воздушного бассейна городов, основанный на совместном применении математического аппарата детерминистического и стохастического

моделирования, или, соответственно, совместного использования при прогнозировании данных инструментального мониторинга и данных модельных расчетов, проведенных с применением химических транспортных моделей. В отличие от традиционных способов усвоения данных наблюдений в численных моделях, предлагаемый подход основан на равноправном использовании данных обоих типов, причем «синтез данных» или их «смешение» (в англоязычных публикациях для соответствующей процедуры совместного использования разных типов данных часто применяются термины “data fusion”, “blending”) осуществляется на базе стандартной стохастической (физико-статистической) модели прогноза, широко применяемой в России. В настоящее время соответствующие методы гибридного моделирования активно используются при решении широкого круга задач, в т. ч. связанных с охраной воздушного бассейна от загрязнения (Huang et al., 2018; Senthilkumar et al., 2019; Carnevale et al., 2020; Crooks, Isakov, 2013; Arunachalam et al., 2014). В предлагаемой статье представлен новый метод синтеза данных, предназначенный для использования при прогнозировании НМУ и уровней загрязнения атмосферного воздуха в городах. Приводимая здесь информация о состоянии и структуре сети инструментального мониторинга атмосферного воздуха в городах, для которых разрабатывались прогностические схемы, соответствует периоду разработки этих схем.

Статистическая и детерминистическая модели для прогноза НМУ и новый метод синтеза полученных данных при прогнозе

1. Статистическая модель для прогноза НМУ и характеристик загрязнения воздуха

В соответствии с РД (1993) и Порядком (2011) в качестве первичной информации, необходимой при разработке статистической модели для прогноза НМУ или суточных максимумов концентрации C используются следующие архивные массивы данных:

– синоптические карты с фронтальным анализом (дважды в сутки);

– репрезентативная для рассматриваемой территории аэрологическая информация (дважды в сутки, обычно используются данные на карте барической топографии АТ-925);

– метеоданные по ближайшей репрезентативной метеостанции (скорость и направление ветра на уровне флюгера, температура воздуха, атмосферное давление, атмосферные явления и др. за сроки 6:00 и 12:00 местного времени);

– концентрации рассматриваемых ЗВ (*c*), которые измерены на постах городского мониторинга загрязнения атмосферы.

При этом предполагается, что данные инструментальных наблюдений получены с соблюдением положений действующего нормативного документа Требования (2020).

Для учета инерционности метеорологических процессов и процессов загрязнения воздуха в набор предикторов обычно включаются и их предыдущие значения. Данные дистанционного зондирования, если они доступны, также могут быть использованы в качестве предикторов.

При разработке статистической модели, в отличие от необходимого для климатических обобщений классического 30-летнего периода, анализируются данные за последние 2–5 лет, в течение которых структура выбросов загрязняющих веществ в городе остается постоянной. Более детальные сведения о требованиях, предъявляемых к объему первичной информации, приведены в Порядке (2011).

Для уменьшения уровня шумов, «загрязняющих» измеренные в городе концентрации, а также (по возможности) упрощения связей между предикторами и предиктантом по всем измеренным за сутки значениям концентраций ЗВ определяется соответствующее указанным суткам значение так называемого параметра *P*:

$$P = \text{Prob}\{c > s\bar{c}\}, \quad (1)$$

где Prob — вероятность события, указанного в фигурных скобках; c — значение концентрации, измеренной во всех пунктах мониторинга каждого из рассматриваемых ЗВ; \bar{c} — долгопериодное среднее (обычно среднее сезонное) значение концентрации этого же ЗВ в соответствующем пункте; s — константа. Следует подчеркнуть, что значения \bar{c} различаются для разных пунктов мониторинга и для разных ЗВ.

Таким образом, P в формуле (1) представляет собой вероятность того, что за рассматриваемые сутки в целом по всем ЗВ и по всем пунктам мониторинга отношение c/\bar{c} превышает постоянное значение s . В практических приложениях для выборочной оценки значения вероятности используется соответствующая частота, так что расчет P проводится по формуле (2):

$$P = \frac{m}{n}, \quad (2)$$

где n — общее количество измеренных в городе за сутки концентраций во всех пунктах мониторинга, а m — количество случаев, когда измеренные концентрации превышали соответствующее среднее сезонное значение более чем в s раз. Согласно РД (1993) и Порядку (2011), n не должно быть меньше 20, а s при обработке данных инструментального мониторинга следует принимать равным 1,5.

При достаточном объеме суточных данных значение P может определяться отдельно для каждого из ЗВ. Вместо параметра P для фильтрации шумов можно также воспользоваться суточным максимумом C концентраций c , измеренных для каждого из ЗВ и каждого из пунктов мониторинга. При этом как P , так и C могут фигурировать в прогностической схеме и как предиктант, и как предиктор, в зависимости от того, к какому моменту времени они относятся (к тому, на который дается прогноз, или к предшествующему).

Одним из существенных предикторов, который оказался эффективным при прогнозировании загрязнения воздуха, является синоптический предиктор S . Для заданной синоптической ситуации или определенного класса синоптических ситуаций SN этот предиктор $S(SN)$ оценивается по формуле (3):

$$S(SN) = E\{P | SN\}, \quad (3)$$

где символ $E\{P | SN\}$ означает условное математическое ожидание P . Иначе говоря, синоптический предиктор — это математическое ожидание параметра P по каждой из рассматриваемых синоптических ситуаций или классу этих ситуаций SN . Необходимая классификация синоптических ситуаций, которая должна быть разработана заранее, основывается на перегруппировке исторического архива синоптических ситуаций, объединяемых в один класс с учетом близости значений P для разных ситуаций, а также их синоптического сходства.

Каждый из остальных предикторов X , используемых при разработке прогностической схемы, трансформируется в свое преобразованное значение $[X]$, которое вычисляется по аналогичной (3) формуле:

$$[X_i] = E\{Pd | X\}. \quad (4)$$

$E\{a|b\}$ означает условное математическое ожидание предиктора $Pd = a$, где через Pd обозначается либо P , либо суточный максимум концентраций C (в случае разработки схемы прогноза концентраций) при заданном значении предиктора $X = b$. При практической реализации диапазон изменения предиктора X разбивается на набор градаций dX_i , покрывающих область изменения X , а условное математическое ожидание в (3) оценивается как среднее значение предиктора Pd при попадании предиктора X в градацию dX_i . Аналогичное преобразование осуществляется для нечисловых предикторов X , которые задаются определенными категориями

или классами, причем результатом такого преобразования являются числовые значения преобразованных предикторов. Преобразование $X \rightarrow [X]$ может быть нелинейным, при этом все преобразованные предикторы являются числовыми и имеют одну и ту же размерность, что и Pd .

В целом, разработка статистической прогностической модели как для P , так и для C , осуществляется в два этапа: (i) — формулировка и обучение модели и (ii) — прогнозирование с использованием модели. При этом в рамках первого этапа могут предусматриваться следующие шаги:

- выбор предикторов;
- цензурирование выборки;
- нормализация предикторов (преобразование к нормальному распределению);
- линеаризация (преобразование нелинейных связей в линейные).

Применительно к настоящей работе, результирующая стохастическая модель строится как линейная регрессия:

$$Pd^{j+1} = a_i[X_i^j], i = \overline{(1, N)}, \tag{5}$$

где j и $j+1$ соответствуют двум последовательным моментам времени. При записи выражения (5), как и ряда последующих формул, в данной статье используется правило суммирования Эйнштейна, в соответствии с которым при наличии в формуле повторяющихся индексов подразумевается, что по ним производится суммирование по всему диапазону их изменения. Это означает, что соотношение (5) может быть представлено более стандартным образом:

$$Pd^{j+1} = \sum_{i=1}^N a_i[X_i^j]. \tag{5}$$

Предполагается также, что первый из предикторов, включенных в (5), т. е. X_1 , всегда равен 1, так что первый коэффициент a_1 является свободным членом регрессии.

Статистические модели, представленные в настоящей статье, были разработаны с использованием метода пошаговой регрессии, причем значимые предикторы отбирались с помощью критериев Фишера и Стьюдента (см., например, Пугачев, 2002; Schuenmeyer, Drew, 2011). При таком подходе на расширение или сокращение списка предикторов нет никаких ограничений, поскольку «излишние» предикторы будут удалены в результате пошаговой регрессии. Описанный математический аппарат не только применяется при прогнозировании НМУ, но и имеет ряд других приложений (см., например, Ritenberga et al., 2016).

2. Детерминистическая (численная) модель загрязнения воздуха

Численная модель загрязнения воздуха, использованная в настоящей работе, включает две работающие в режиме *offline* компоненты: собственно химическую транспортную модель и ее метеорологический драйвер.

2.1 Метеорологический драйвер WRF

В качестве метеорологического драйвера в работе была использована мезомасштабная / региональная численная модель прогноза погоды WRF (Chen et al., 2011), с помощью которой для рассматриваемых расчетных областей восстанавливалась динамика метеополей, определяющих загрязнение воздуха (вопросы эффективности других метеодрайверов в настоящей работе не рассматриваются). С учетом большого объема вычислительной работы такое «восстановление» осуществлялось для одного, обычно центрального, года той пятилетки, данные которой использовались при разработке стохастической схемы прогноза. Требуемые при работе метеодрайвера на срок 1 год в режиме хиндкастинга (т. е. в режиме использования модели для восстановления данных за прошедший период времени) начальные и граничные значения метеополей для рассматриваемых областей были получены из материалов реанализа NCEP FNL с пространственным разрешением по широте и долготе 1° (NCEP, 2000).

В таблицах 1 и 2 приведено описание параметризаций и расчетных опций WRF, использовавшихся в расчетах (формулировки согласно Skamarock et al., 2019).

Таблица 1

Конфигурация параметризации физических процессов в WRF

Физический процесс	Схема параметризации
Облачная микрофизика	Схема Томпсона («крупя»)
Атмосферные потоки коротковолновой и инфракрасной радиации и скорости нагрева	Модель быстрого переноса излучения (RRTM)
Параметризация коротковолновой радиации	Схема Дудхия
Параметризация физики приземного слоя	Схема Мони́на—Обухова
Взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью	Унифицированная модель процессов на поверхности и в почве (Noah)
Физика пограничного слоя	ТКЕ схема Меллора—Ямады (Eta)
Параметризация кучевых облаков	Схема Кейна—Фрича (new Eta)

Таблица 2

Динамические опции WRF

Опция	Схема/статус
Схема интегрирования по времени	Схема Рунге—Кутта 3-го порядка
Коэффициент вихревой диффузии	Схема Смагоринского 1-го порядка замыкания по горизонтали
Турбулентность и перемешивание	Диффузионный член 2-го порядка на координатных поверхностях
Численная диффузия 6-го порядка	Включена
Демпфирование на верхнем уровне	С диффузным демпфированием; коэффициент демпфирования 0,01

Остальные опции были выбраны либо по умолчанию, либо на основании рекомендаций (Skamarock et al., 2019). В расчетах по WRF горизонтальное разрешение и шаг по времени соответственно принимались 2×2 км² и 3 секунды. Количество использованных сигма-уровней равнялось 61, причем 38 нижних уровней были распределены по вертикали таким образом, чтобы обеспечить детальное разрешение метеополей в нижнем 1500-метровом слое, в т. ч. вблизи подстилающей поверхности.

2.2 Химическая транспортная модель XTM_ГГО

Представленные в данной работе результаты численного моделирования загрязнения воздуха получены с использованием эйлеровой сеточной модели XTM_ГГО, разработанной в ГГО (Генихович и др., 2016). Модель прошла валидацию на данных природных трассерных экспериментов. Описанная в статье методология может быть использована и применительно к другим успешно валидированным XTM.

По ряду характеристик модель XTM_ГГО близка к модели SILAM, описание которой представлено в (Sofiev et al., 2008, 2015; Galperin et al., 2010). Авторы этих моделей работали над ними в тесном контакте и обмениваясь идеями. В частности, в обеих моделях используются метод расщепления, предложенный Г. И. Марчуком, полулагранжева схема адвекции М. В. Гальперина, аппроксимация вертикальных турбулентных потоков примеси по М. Е. Берлянду и А. А. Самарскому, химический механизм CBM-IV и т. д. Следует отметить, однако, что в XTM_ГГО не реализован ряд опций, предусмотренных в модели SILAM (например, параллелизация вычислительного процесса, расчеты в глобальном масштабе с заменой краевых условий на условия периодичности, расчеты распространения аллергенной пыльцы и продуктов природных пожаров и др.).

Данные инвентаризации выбросов в атмосферу, использовавшиеся при проведении расчетов, были предоставлены администрациями рассматриваемых населенных пунктов или промышленными предприятиями. Первоначально эти данные были подготовлены для проведения расчетов рассеивания на основе действующей

методики расчетов (Методы, 2017), утвержденной на государственном уровне в установленном порядке. В инвентаризацию выбросов включалась подробная информация о местоположении, технических параметрах, а также показателях выбросов различных загрязняющих веществ от точечных, линейных и площадных источников.

В расчетах по ХТМ принимались те же размеры ячеек сетки, которые были использованы при проведении расчетов по WRF, но шаг интегрирования по времени составлял 300 с. При этом перенос примесей по вертикали рассматривался только внутри нижнего 1500-метрового слоя, что соответствовало 38 шагам по вертикали.

Источники, попадающие в одну ячейку сетки, в ходе препроцессинга агрегировались. К сожалению, номенклатура загрязняющих веществ была сравнительно ограниченной и очень редко включала, например, информацию о выбросах углеводородов, что воспрепятствовало использованию химического блока в расчетах с ХТМ.

В процессе расчетов по модели ХТМ_ГГО (так же, как и при расчетах по WRF, проводившихся в режиме хиндкастинга на срок 1 год) каждый час в узлах расчетной сетки выдавались поля приземных концентраций загрязняющих веществ.

3. Новый метод синтеза данных с использованием стохастической и детерминистической моделей

Идея предлагаемого метода заключается в повышении эффективности описанных выше стохастической и детерминистической моделей путем совместного усвоения полученных с их помощью данных. В задачах прогноза погоды чаще всего используется усвоение данных наблюдений, которое осуществляется в рамках корректировки расчетов по детерминистической модели (см., например, Kalnay, 2003; Vannitsem, 2008). В предлагаемом методе результаты расчетов по стохастической модели, основанной на анализе данных наблюдений, и расчетов по детерминистической численной модели рассматриваются как равноправные, а их синтез осуществляется на базе расширенной стохастической модели. При этом в качестве предикторов используются не только данные

инструментального мониторинга, но расчетные концентрации, полученные в результате интегрирования ХТМ и прошедшие статистический постпроцессинг. Полученная в результате такого синтеза модель прогноза НМУ и максимальных концентраций загрязняющих веществ далее в статье упоминается как модель синтеза данных ГГО (МСД_ГГО).

Статистический постпроцессинг модельных расчетов позволяет, в частности, определить за каждые сутки хиндкастинга расчетные значения параметра P . Они вычисляются по ежедневным наборам значений концентрации в узлах расчетной сетки, охватывающей интересующую нас область, на основе формул (1)–(2), причем в (1) принимается $s = 1$. Такие расчетные значения P включаются в набор предикторов, используемых при разработке прогностической схемы в соответствии с положениями раздела 1 «Статистическая модель для прогноза НМУ и характеристик загрязнения воздуха» настоящей статьи.

При построении прогностической схемы для суточных максимумов приземных концентраций, полученных в результате модельных расчетов (для них мы используем то же обозначение C), количество узлов сетки слишком велико, чтобы включать в схему все рассчитанные концентрации. Для сжатия соответствующей информации применяется метод главных компонент (Jolliffe, 2002), связанный с разложением рассматриваемых полей по естественным ортогональным функциям (е.о.ф.), которые определяются как собственные векторы φ_k пространственной ковариационной матрицы расчетного поля концентрации, где $k = \overline{1, K}$, а K — количество рассматриваемых узлов сетки. Е.о.ф. предполагаются перенумерованными в порядке убывания соответствующих собственных значений λ_k . Известно, что эти собственные значения неотрицательны, а собственные векторы ортогональны друг другу и нормированы на единицу.

Используя первые K' собственных векторов, можно аппроксимировать K -мерный вектор C^j суточных максимумов расчетных концентраций в день с номером j с помощью выражения:

$$C^j \approx \beta_p^j \varphi_p; \quad p = \overline{(1, K')} , \quad (6)$$

где коэффициенты разложения β_p^j статистически независимы.

Когда число слагаемых K' в (6) равно K , соотношение (6) становится точным равенством. Однако если $K' < K$, то формула (6) задает аппроксимацию C^j , которая учитывает долю полной дисперсии, равную значению параметра *fract*, где:

$$fract = \sum_{k=1}^{K'} \lambda_k / \sum_{k=1}^K \lambda_k . \quad (7)$$

При известных φ_p значения коэффициентов разложения формально могут быть найдены как скалярные произведения векторов C^j и φ_p :

$$\beta_p^j = C_k^j \varphi_{pk}; \quad k = \overline{(1, K)} , \quad (8)$$

где C_k^j и φ_{pk} — компоненты соответствующих векторов. При этом, согласно (7), для случая $K' < K$ подстановка коэффициентов разложения β_p^j , рассчитанных по (8), в правую часть (6) обеспечивает наилучшую среднюю квадратичную погрешность (т. е. наименьшую «остаточную дисперсию») восстановления вектора C^j суточных максимумов с использованием формулы (6) по коэффициентам разложения β_p^j при известных векторах φ_p . Иначе говоря, при известном наборе е.о.ф. коэффициенты разложения β_p^j в принципе могут восстанавливаться по результатам измерений составляющих вектора C^j суточных максимумов как решение соотношений (6), рассматриваемых как система линейных уравнений

относительно этих коэффициентов. Если заменить в (6) смоделированные максимальные суточные концентрации C^j на измеренные, то это же самое уравнение (6) можно решить методом наименьших квадратов (МНК) для нахождения коэффициентов β_p^j .

Для простоты используем здесь одинаковые обозначения для двух разных типов коэффициентов разложения, определяемых либо через скалярное произведение векторов C_j и φ_p , либо с помощью МНК. Однако далее излагается в основном прогностическая методология, работающая со вторым типом этих коэффициентов разложения — эмпирическим. По набору ранее измеренных концентраций, соответствующих суточным максимумам на постах мониторинга, можно восстановить архив эмпирических коэффициентов разложения и разработать для них статистические прогностические схемы с использованием технологии, описанной выше (см. раздел «Статистическая модель для прогноза НМУ и характеристик загрязнения воздуха»).

При практической реализации для определения коэффициентов β_p^j из (6) выбирается подмножество уравнений, соответствующих тем узлам, которые соответствуют размещению постов мониторинга (если местоположение поста мониторинга не совпадает ни с одним узлом расчетной сетки, то правые части уравнения (6) могут быть проинтерполированы в соответствующую точку). В качестве эмпирического правила мы обычно полагаем, что K' должно быть примерно в 2 раза меньше, чем число постов мониторинга, на которых получены данные измерений.

Для характеристики успешности прогностических схем далее используются следующие количественные показатели:

- r — коэффициент линейной корреляции между результатами прогноза (p) и наблюдения (o) соответствующих характеристик;
- a и b — коэффициенты (угловой коэффициент и свободный член), фигурирующие в уравнении линейной регрессии (9) спрогнозированных характеристик (Prediction) на наблюдаемые (Observation):

$$\text{Prediction} = a \cdot \text{Observation} + b; \quad (9)$$

– FB — относительное смещение:

$$FB = \frac{2(\bar{o} - \bar{p})}{\bar{o} + \bar{p}}; \quad (10)$$

– NMSE — нормализованный средний квадрат ошибки:

$$NMSE = \frac{\overline{(o - p)^2}}{\bar{o} \cdot \bar{p}}. \quad (11)$$

Коэффициенты линейной корреляции Пирсона, а также показатели, определяемые по формулам (9)–(11), в данной работе оценивались как для параметров P , так и для максимальных концентраций C . При расчете показателя NMSE для максимальных концентраций учитывались только случаи с наблюдаемыми концентрациями C выше 0,5 ПДК, поскольку нас больше всего интересуют прогнозы высоких уровней загрязнения. Критерии приемлемости для FB и NMSE, в соответствии с (Theobald et al., 2016; Denby et al., 2020), были установлены следующим образом: $|FB| < 0,3$ и $NMSE < 1,5$. Идеальному согласию прогностических значений с наблюдаемыми в уравнении регрессии (9) соответствуют значения коэффициентов регрессии $a = 1$, $b = 0$ и коэффициент линейной корреляции $r = 1$.

Апробация схем прогноза НМУ

Эффективность описанной выше технологии прогнозирования НМУ демонстрируется на конкретных примерах прогностических схем, разработанных применительно к показанным на рисунке 1 трем промышленным центрам Республики Хакасия (Российская

Федерация) — Абакану, Черногорску и Саяногорску (далее для краткости упоминаются как «города АЧР»), городам Атырау (Республика Казахстан) и Красноярску (Российская Федерация).

Для всех рассматриваемых городов базы данных инвентаризации выбросов, ранее подготовленные местными властями и/или предприятиями, включали информацию об источниках крупных предприятий, электростанций и дорог, а также бытового отопления. Для всех представленных в данной работе схем прогнозирования заблаговременность прогноза равна одному дню. При разработке схем прогнозирования для конкретных загрязняющих веществ по каждому региону учитывались те ЗВ, максимальные концентрации которых были не слишком малы по сравнению с соответствующими ПДК и, следовательно, прогноз которых был важен для местных властей.

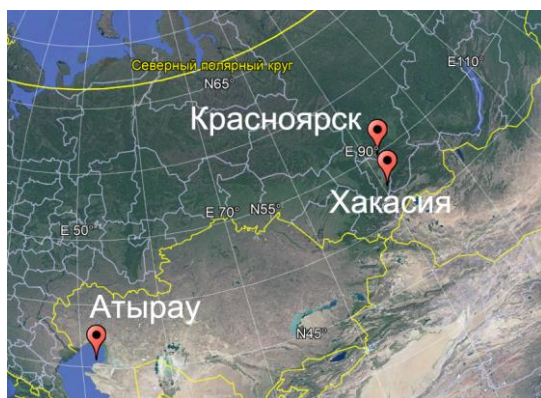


Рис. 1. Населенные пункты, для которых выполнена оценка успешности разработанных прогностических схем

Информация о расположении городов АЧР и взаимном расположении постов инструментального мониторинга загрязнения атмосферного воздуха в Атырау и Красноярске представлена на рисунке 2 (сведения о размещении постов мониторинга внутри городов АЧР не приводятся, поскольку в Саяногорске и Черногорске имелось всего по 1 посту мониторинга, а в Абакане — 2).



Рис. 2. Города АЧР и схемы размещения постов мониторинга в Атырау и Красноярске (верхняя, средняя и нижняя панели соответственно). Расположение городов на верхней панели обозначено точками, размещение станций мониторинга на двух нижних панелях — точками с номерами

Города АЧР расположены в Минусинской котловине в окружении гор Кузнецкого Алатау и Абаканского хребта. Основу экономики этих городов, как и экономики республики Хакасии в целом, составляют гидроэнергетика, цветная металлургия и добыча полезных ископаемых открытым способом. Абакан (население около 190 тыс. человек) является столицей республики. Это важный транспортный узел и центр строительной индустрии. В Саяногорске (население 46 тыс. человек) расположены два алюминиевых завода

и ряд других предприятий. Экономика Черногорска (население более 75 тыс. человек) сосредоточена на добыче угля открытым способом и строительной индустрии. Местное отделение Росгидромета эксплуатирует здесь 4 станции мониторинга загрязнения воздуха с ручным отбором проб: 2 — в Абакане, 1 — в Саяногорске и 1 — в Черногорске.

Казахстанский город Атырау (население более 290 тыс. человек) расположен на северо-восточном побережье Каспийского моря в дельте р. Урал рядом с нефтегазовыми месторождениями Кашаган и Тенгиз. Основные предприятия — нефтеперерабатывающий завод и электростанция. В окрестностях Атырау находится Установка комплексной подготовки нефти и газа (УКПНиГ), выбросы от источников которой могут вносить вклад в загрязнение воздушного бассейна города. Сеть мониторинга загрязнения воздуха, осуществляемого УКПНиГ, включает 9 автоматических станций, расположенных в Атырау, измерения которых использовались в данной работе. Около десяти других автоматических станций мониторинга рассредоточены вокруг УКПНиГ и между УКПНиГ и Атырау; поступающая с этих станций информация в данной работе не рассматривалась.

Красноярск (население более 1 млн человек) расположен в долине р. Енисей в окружении лесистых гор. Это важный транспортный узел Сибири и крупный промышленный центр с алюминиевыми и химическими заводами, космической промышленностью, электростанциями и т. д.

В каждом из городов АЧР количество станций мониторинга не удовлетворяло требованиям РД (1993) по минимальному (не менее 3) количеству постов мониторинга, наблюдения на которых могут быть использованы для разработки схемы прогноза. Поэтому для этих трех городов была разработана совместная схема. Прямоугольная расчетная область 140×140 км² с пространственными шагами 2×2 км была выбрана вокруг точки с координатами примерно $53,48^\circ$ с. ш., $91,44^\circ$ в. д. Количество агрегированных источников выбросов, каждый из которых соответствовал определенной ячейке

сетки, было равно 716. В качестве исходных данных для разработки прогностической модели использовались суточные максимумы концентраций C четырех загрязняющих веществ: NO_2 (диоксид азота), CO (оксид углерода), пыли (взвешенные вещества) и HF (гидрофторид).

С помощью модели ХТМ_ГГО для 2017 г. были рассчитаны средние за каждые 20 мин концентрации указанных загрязняющих веществ, причем для последующей обработки эти значения сохранялись с дискретностью 1 ч. Количество узлов сетки, относящихся к Абакану, Саяногорску и Черногорску составило 30, 8 и 15 соответственно. Все концентрации в этих узлах использовались для оценки суточных значений моделируемого суммарного для трех городов параметра P , а также индивидуальных значений этого параметра P_A , P_C и $P_{\text{ч}}$ (Абакан, Саяногорск и Черногорск). Чтобы избежать необходимости продолжить расчеты по ХТМ_ГГО в прогностическом режиме, была разработана стохастическая модель, позволяющая предсказывать суммарное (по трем городам) и индивидуальные (отдельно для каждого города) значения P с использованием предикторов, перечисленных выше в данной работе. Этот же подход используется для прогнозирования максимальных суточных концентраций отдельных атмосферных загрязнителей. При разработке схемы прогноза использовались метеорологические, аэрологические и синоптические данные за 2015–2019 гг.

Показатели эффективности схемы прогнозирования параметра P с использованием МСД_ГГО для всех городов АЧР вместе и для каждого из них по отдельности представлены в таблице 3.

При построении индивидуальных прогностических схем для отдельных городов в качестве предикторов использовались следующие параметры: прогностическое значение P для городов АЧР в целом и два других значения P , одно из которых наблюдалось в предыдущий день, а другое было построено для рассматриваемого города при использовании данных детерминистического моделирования с ХТМ.

Показатели эффективности прогнозов по параметру P (города АЧР)

Город	Коэффициент корреляции (r)	Угловой коэффициент (a)	Свободный член (b)	FB	NMSE
АЧР	0,85	0,954	0,012	0,0141	0,087
Абакан	0,96	0,928	0,016	-0,0148	0,023
Черногорск	0,72	0,768	0,052	0,0317	0,183
Саяногорск	0,75	0,586	0,189	-0,1345	0,063

Корреляционный график прогнозируемых и наблюдаемых максимальных концентраций СО (соответственно CO_{pred} и CO_{obs}) на постах наблюдения в городах АЧР приведен на рисунке 3. Он соответствует $r = 0,80$ для линии тренда $a = 0,946$, $b = 0,160$.

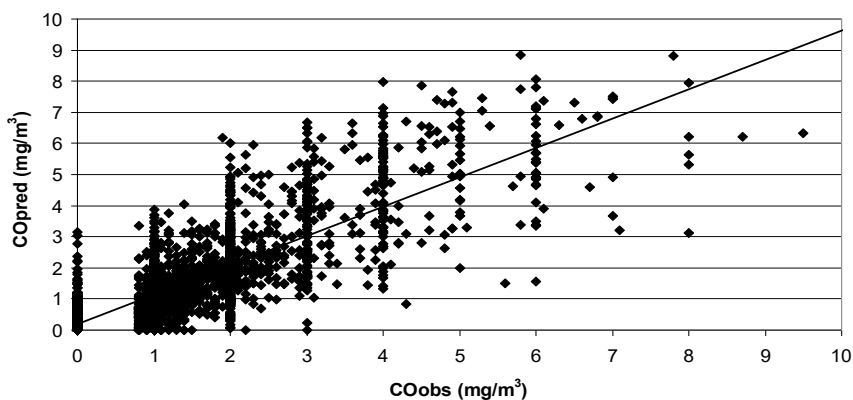


Рис. 3. Фактические и прогностические значения максимальных ежесуточных концентраций СО на постах наблюдения в городах АЧР (прямая — линия тренда)

Для г. Атырау расчетная область, покрытая сеткой 2×2 км, была выбрана размером 100×100 км², при этом 49 точек сетки относилось к самому городу, а остальные покрывали окружающую территорию.

Это позволило в расчетах учесть источники выбросов не только самого города, но и УКПНиГ. Границы расчетного прямоугольника были ориентированы в широтном и долготном направлениях, а его центр располагался в точке с координатами $47,2^\circ$ с. ш. и $52,15^\circ$ в. д. Количество вертикальных слоев в сигма-координатах составляло 69 для модели WRF и 38 для модели XTM ГГО. Расчеты по XTM охватывали период времени с 00 ч 1 января 2017 г. до 00 ч 1 января 2018 г. Для определения суточных максимумов значения концентрации выдавались ежечасно в каждом узле расчетной сетки. Использовались данные о выбросах четырех загрязняющих веществ (CO , SO_2 , H_2S и NO_2), которые были объединены в 1872 источника.

Массив данных включал концентрации CO , SO_2 , H_2S и NO_2 на 9 станциях мониторинга, измеренные 72 раза в сутки (время осреднения 20 мин) в 2013–2018 гг.

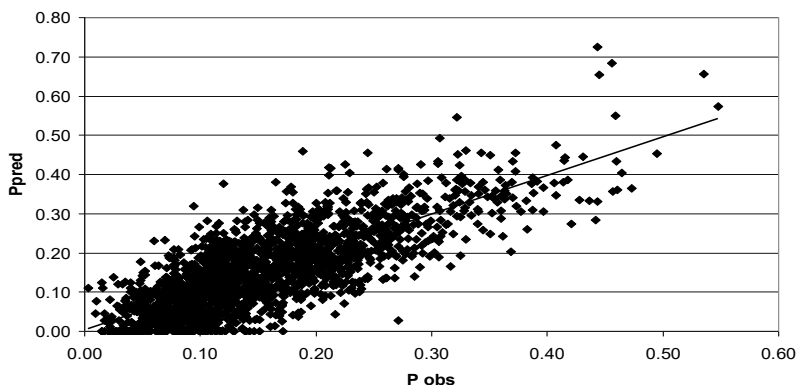


Рис. 4. Фактические и прогностические значения параметра P для г. Атырау, Казахстан (прямая — линия тренда)

На рисунке 4 представлен корреляционный график прогнозируемых и наблюдаемых значений параметра P , рассчитанного совместно по всем загрязняющим веществам. Линия тренда на этом рисунке соответствует $r = 0,78$ и значениям коэффициентов $a = 0,983$, $b = 0,004$.

Аналогичные графики были построены для сравнения наблюдаемых и прогнозируемых значений параметров P_{NO_2} , P_{SO_2} , P_{CO} , $P_{\text{H}_2\text{S}}$, относящихся, соответственно, к значениям P для NO_2 , SO_2 , CO и H_2S . Характеристики успешности соответствующих схем прогнозирования приведены в таблице 4.

Таблица 4

Сравнительная эффективность прогнозов (стохастического и МСД_ГГО) параметра P по отдельным загрязняющим веществам в Атырау, Казахстан

ЗВ	Стохастическая модель					МСД_ГГО				
	r	a	b	FB	NMSE	r	a	b	FB	NMSE
NO_2	0,77	0,954	0,010	0,046	0,247	0,83	0,981	0,006	-0,009	0,115
SO_2	0,73	0,868	0,026	0,037	0,339	0,77	1,000	0,000	0,010	0,156
CO	0,74	1,030	0,008	0,040	0,457	0,78	0,987	0,003	0,002	0,234
H_2S	0,64	0,877	0,002	-0,004	0,359	0,65	0,877	0,008	-0,017	0,345

Корреляционный график суточных максимальных концентраций NO_2 , наблюдаемых и прогнозируемых на различных станциях мониторинга в Атырау, представлен на рисунке 5. Он соответствует $r = 0,77$, $a = 0,593$ и $b = 0,014$. Аналогичные характеристики для H_2S составляют $r = 0,84$, $a = 0,680$, $b = 0,010$. К результату для H_2S необходимо относиться с определенной осторожностью, так как соответствующее значение NMSE, приведенное в таблице 5, в 1,5–2 раза превышает значения этой характеристики для прочих рассматриваемых загрязняющих веществ. Причиной является наличие очень значительного, но не включенного в инвентаризацию выбросов, источника H_2S , который расположен вблизи станции мониторинга № 8 (см. рис. 2). Это хранилище промышленных и коммунальных сточных вод (поля испарения), которое местные жители называют Тухлой балкой. В связи с отсутствием соответствующей информации в исходных данных этот источник не был учтен при проведении

модельных расчетов по ХТМ, так что мы смогли обнаружить его существование только после разработки прогностической модели. Известно, что в соответствии с действующей в Атырау программой этот источник выбросов H_2S должен быть ликвидирован, поля испарения осушены, а Тухлая балка рекультивирована.

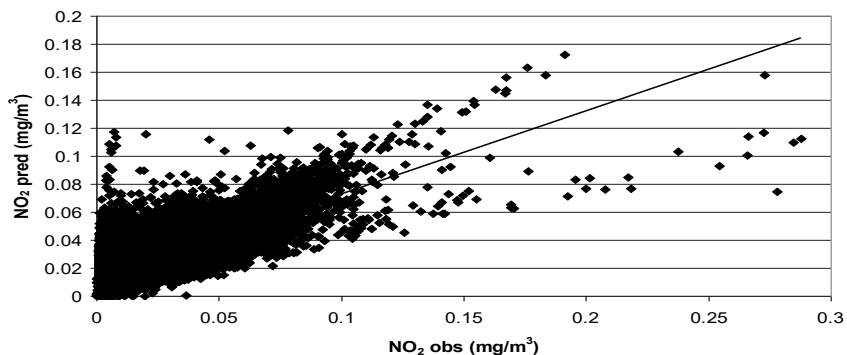


Рис 5. Фактические и прогностические значения максимальных за сутки концентраций NO_2 для Атырау (прямая — линия тренда)

В Красноярске мониторинг загрязнения атмосферного воздуха на восьми постах осуществляется специалистами Среднесибирского УГМС. Анализы проб атмосферного воздуха, отбираемых вручную 4 раза в сутки, позволяют получить концентрации в воздухе 15-ти загрязняющих веществ. Существует также несколько автоматических станций мониторинга, эксплуатируемых администрацией города, но на момент разработки прогностических схем соответствующие массивы данных были слишком короткими, чтобы объединить их с данными ручного отбора проб. Используемые нами данные мониторинга охватывают период 2008–2016 гг. Данные за 2008–2012 гг. ранее уже использовались для разработки схемы стохастического прогноза для P , которая была внедрена в практику работы УГМС с 2013 г. Таким образом, с 2013 г. на источниках выбросов в Красноярске предусмотрены меры по регулированию (сокращению) выбросов в периоды, соответствующие

неблагоприятным метеорологическим условиям. Это может приводить к некоторой неоднородности рядов данных. Для исключения негативного влияния указанного эффекта при разработке прогностических схем была предусмотрена предварительная трансформация значений параметров P , обеспечивающая сохранение функции распределения вероятностей P после 2013 г. неизменной по сравнению с 2008–2012 гг.

В настоящей статье мы ограничились описанием результатов, полученных применительно к прогнозированию параметров P и максимальных за сутки концентраций двух загрязняющих веществ: СО — как индикатора влияния выбросов от совокупности многочисленных источников, распределенных по территории города, и HF, который главным образом выбрасывается от источников алюминиевого завода, локализованного на сравнительно ограниченной территории (нельзя исключить возможность того, что в городе существуют и другие источники этого загрязнителя, не включенные в инвентаризацию выбросов). Прямоугольная расчетная область $118 \times 98 \text{ км}^2$ была покрыта сеткой с шагом $2 \times 2 \text{ км}$. Общее количество агрегированных источников составило 1760, а расчеты охватывали весь 2016 г.

Корреляционный график параметра P_{HF} , рассчитанного по наблюдаемым и прогнозируемым концентрациям HF на различных станциях мониторинга в Красноярске, представлен на рисунке 6. Линия тренда соответствует $r = 0,70$, $a = 0,509$, $b = 0,125$. Аналогичные характеристики для P_{CO} (см. рис. 7) составляют $r = 0,91$, $a = 0,901$, $b = 0,028$.

Корреляционный график прогнозируемых и наблюдаемых в Красноярске суточных максимальных концентраций СО представлен на рисунке 8. Он соответствует $r = 0,85$, $a = 0,744$, $b = 0,460$ для линии тренда. Аналогичные характеристики для HF составляют $r = 0,78$, $a = 0,605$, $b = 0,029$.

Показатели успешности предлагаемого метода для случая прогнозирования суточных максимумов концентраций суммированы в таблице 5.

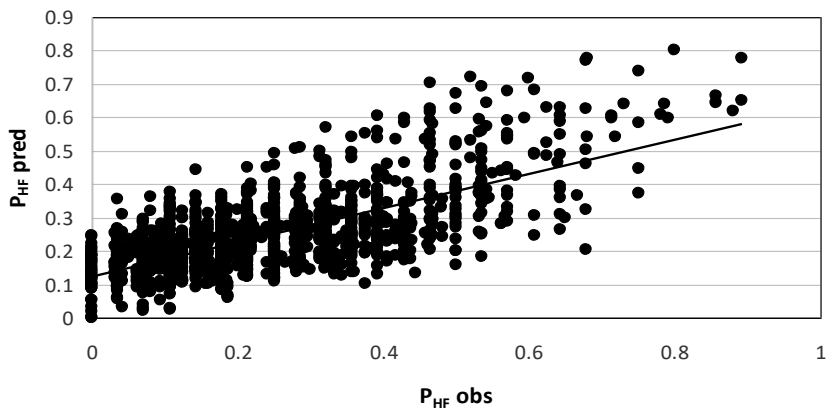


Рис. 6. Фактические и прогностические значения параметра P_{HF} для Красноярска (прямая — линия тренда)

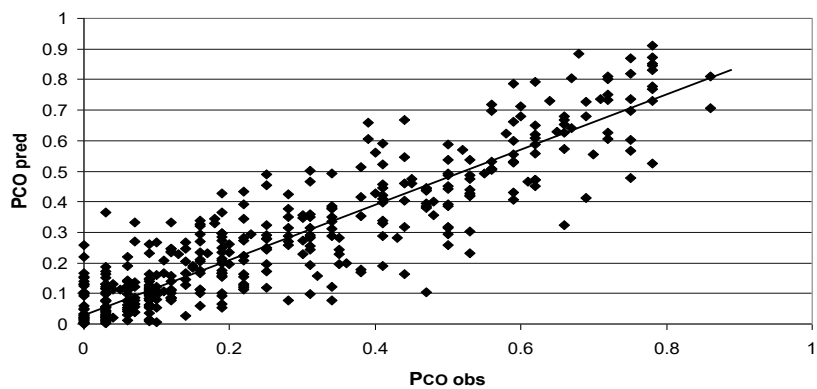


Рис. 7. Фактические и прогностические значения параметра P_{CO} для Красноярска (прямая — линия тренда)

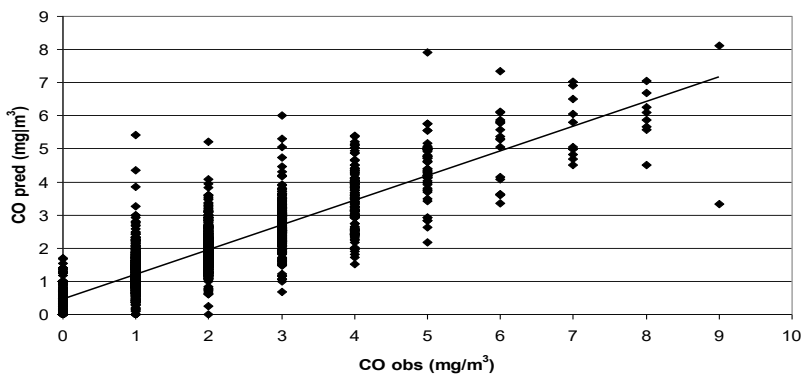


Рис. 8. Фактические и прогностические значения максимальных за сутки концентраций CO для Красноярска (прямая — линия тренда)

Таблица 5

Показатели успешности прогноза суточных максимумов концентраций

Пункт	ЗВ	Кол-во постов	r	a	b	FB	NMSE
Города АЧР	CO	4	0,80	0,946	0,160	-0,030	0,155
	NO ₂	9	0,77	0,593	0,014	0,001	0,352
Атырау	H ₂ S	9	0,84	0,680	0,013	0,069	1,928
	HF	6	0,78	0,605	0,029	-0,037	0,223
Красноярск	CO	8	0,85	0,744	0,460	-0,049	0,181

Как следует из таблицы 5, во всех рассмотренных случаях разработанные схемы обеспечивали удовлетворительное качество прогнозирования по указанным в данной статье критериям. Единственное исключение, когда значение NMSE превышало допустимый уровень погрешности (это значение в таблице 5 выделено жирным шрифтом), соответствует прогнозу максимальных концентраций сероводорода для Атырау, причем причины такого расхождения выявлены.

Как уже было отмечено выше, целью регулирования (сокращения) выбросов в периоды НМУ является снижение наибольших концентраций загрязняющих веществ, относящихся к эпизодам с неблагоприятными метеорологическими условиями, что может привести к неоднородности рядов этих концентраций. Для того чтобы охарактеризовать возможное влияние такой неоднородности данных на качество прогноза загрязнения воздуха, мы оценили эффективность схемы прогнозирования, разработанной на основе набора данных мониторинга 2013–2016 гг., при ее применении к прогнозированию концентраций для периода 2008–2012 гг. и сравнили получившиеся результаты с данными мониторинга за этот же период. На рисунке 9 представлен корреляционный график прогнозируемых таким образом и наблюдаемых концентраций HF. Он соответствует $r = 0,70$, $a = 0,482$, $b = 0,004$.

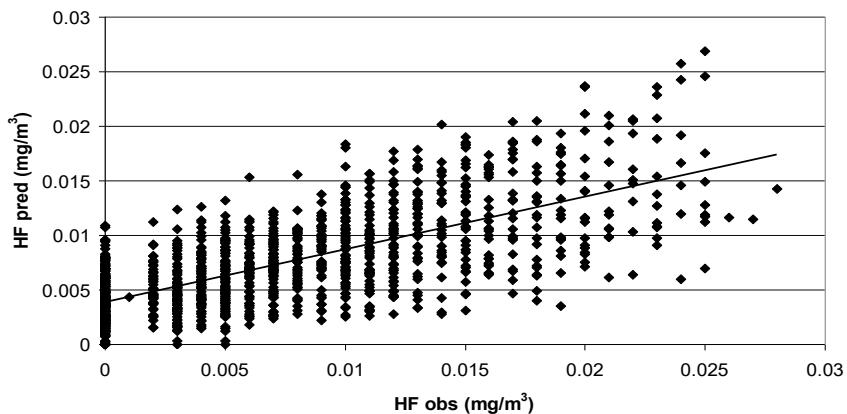


Рис. 9. Фактические и прогностические значения максимальных за сутки концентраций HF для Красноярска (прямая — линия тренда)

Сопоставление с приведенными выше характеристиками согласия при прогнозировании концентраций HF ($r = 0,78$, $a = 0,605$, $b = 0,029$) показывает, что при сдвиге на 5 лет качество прогнозов суточного максимума концентраций ухудшилось, но все же осталось

приемлемым. Тем не менее, представляется целесообразным переоценивать эффективность прогностической схемы примерно раз в 5 лет, чтобы при необходимости учесть неоднородность, связанную с возможными изменениями в структуре источников выбросов, влияние регулирования выбросов во время спрогнозированных НМУ и т. д.

В отличие от традиционных стохастических моделей, позволяющих прогнозировать только концентрации в точках, соответствующих расположению станций мониторинга, представленный в работе формальный аппарат МСД_ГГО может быть использован для реконструкции и прогнозирования значений приземных концентраций в любой из точек сетки, используемой в расчетах по ХТМ, в т. ч. и в тех, где измерения не проводились. Для оценки возможных ошибок такой реконструкции была применена статистическая процедура, которую иногда называют «методом прополки». В рассматриваемом случае эта процедура сводится к удалению из общей выборки набора данных, соответствующего выбранному посту мониторинга, последующей реконструкции удаленного набора данных с использованием наборов данных, соответствующих другим станциям, и, наконец, оценке характеристик согласия между удаленным набором данных и его реконструкцией.

Такая процедура «прополки» была применена к набору значений максимальных суточных концентраций NO_2 , измеренных в Атырау в 2014–2018 гг. При использовании определенных по этим данным пяти первых е.о.ф. угловые коэффициенты в уравнениях линейной регрессии аппроксимированных концентраций на измеренные изменялись от 0,72 (пост № 7) до практически 1 (посты № 1, 2, 6, 8 и 9), свободный член в регрессии был практически равен 0, а коэффициент корреляции r изменялся от 0,86 до 1. При этом относительно части города, внутри которой сосредоточены все рассматривавшиеся посты мониторинга (см. рис. 2, средняя панель), посты № 1, 6, 8 и 9 могут рассматриваться как внешние (расположенные на границах указанной части города), а посты № 2, 3, 4, 5 и 7 — как внутренние. Соответствующие характеристики после

«прополки» представлены в таблице 6. При этом худшие значения показателей эффективности выделены жирным шрифтом. Так, наихудшие коэффициенты корреляции r получены для постов № 1, 6 и 8, а критерии приемлемости FB и NMSE не выполнялись для постов № 6, 8 и 9.

Разница между результатами реконструкции концентраций во внешних и внутренних точках может быть интерпретирована как разница в успешности математических процедур интерполяции и экстраполяции. В целом, результаты, представленные в таблице 6, можно также рассматривать как свидетельство того, что описанная в данной работе методика позволяет сравнительно эффективно реконструировать концентрации в произвольных точках внутри территории, покрытой постами мониторинга, даже если в непосредственной близости от этих точек таких постов нет.

Таблица 6

Показатели успешности реконструкции концентраций NO₂ на станциях мониторинга в Атырау, Казахстан

Параметр	Номер поста								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
r	0,37	0,87	0,87	0,87	0,83	0,41	0,79	0,22	0,62
a	0,390	0,817	0,746	0,684	0,769	0,026	0,592	0,456	0,921
b	0,036	0,015	0,014	0,005	0,018	0,034	0,014	0,085	0,026
FB	-0,217	-0,170	-0,120	0,242	-0,245	-0,024	0,088	-1,137	-0,634
NMSE	1,166	0,793	0,678	0,586	0,069	2,556	0,624	0,427	0,963

Однако результаты аналогичной реконструкции за пределами этой территории выглядят неубедительно. Это также означает, что при планировании развития сети мониторинга загрязнения воздуха следует уделять больше внимания размещению постов мониторинга на окраинах городов.

Полученные результаты «прополки» можно также рассматривать как дополнительное подтверждение того, что без привлечения данных

инструментального мониторинга расчеты по ХТМ с шагами порядка 1 км не обеспечивают согласие с данными натуральных наблюдений с требуемой точностью.

Оценки оправдываемости и предупрежденности прогнозов

В соответствии с нормативным документом РД (1991), при проведении производственных (оперативных) испытаний методов прогноза используется ряд количественных характеристик, в т. ч. показатели (в %) оправдываемости прогнозов $У$ и предупрежденности прогнозируемого явления $П$. В рамках данной работы оправдываемость прогнозов группы НМУ оценивалась по формуле:

$$У = N_y / N_{\Sigma} , \quad (12)$$

где N_{Σ} — общее количество прогнозов, выданных за рассматриваемый период; N_y — количество индивидуально оправдавшихся прогнозов.

При оценке учитывались случаи НМУ всех трех степеней опасности, что в рамках прогнозирования P соответствует выполнению условия $P_{90} \leq P$, где процентиль P_{90} соответствует уровню вероятности 90 %. Оценка оправдываемости индивидуального прогноза группы НМУ осуществлялась с учетом допуска ($\delta_{\text{доп}}$) в соответствии с действующей в системе Росгидромета методологией, изложенной в РД (1993). При этом оправдавшимся прогноз НМУ принимался в случае, когда выполнялось условие $P \geq P_{90} - \delta_{\text{доп}}$, где $\delta_{\text{доп}} = 0,05$.

Предупрежденность группы НМУ оценивалась по формуле:

$$П = M / M_E , \quad (13)$$

где M — количество дней с НМУ по городу в целом, когда прогностические значения параметра P удовлетворяли неравенству

$P \geq P_{90}$ (без учета допуска), а M_E — количество дней с НМУ, наблюдавшихся в городе за тот же период.

Показатели оправдываемости и предупрежденности для рассмотренных в данной статье схем прогноза НМУ представлены в таблице 7.

Таблица 7

**Показатели оправдываемости
и предупрежденности прогнозов группы НМУ**

Город, примесь или совокупность примесей	Период	Количество случаев НМУ	Показатели успешности	
			Оправдываемость прогнозов НМУ, %	Предупрежденность случаев НМУ, %
Хакасия, совокупность	2015– 2019	124	83,6	75,0
Абакан, совокупность	2017	39	91,5	84,1
Черногорск, совокупность	2017	33	72,7	72,7
Саяногорск, совокупность	2017	45	85,7	79,4
Красноярск, HF	2013– 2016	98	60,8	70,0
Красноярск, CO	2016	41	90,9	78,0
Атырау, NO ₂	2017	29	76,2	75,9
Атырау, SO ₂	2017	31	78,5	77,4
Атырау, CO	2017	24	60,6	75,0
Атырау, H ₂ S	2017	30	56,9	55,5

С учетом сравнительно низкой повторяемости случаев НМУ, составляющей в среднем 10 % от объема выборки, полученные результаты можно полагать успешными. При этом самые низкие показатели получены для схемы прогноза сероводорода, построенной для г. Атырау. Вопрос о погрешностях данных инвентаризации выбросов в этом городе уже обсуждался выше.

Заключение и выводы

Применение метода синтеза данных МСД_ГГО при прогнозе загрязнения воздуха в городах обеспечивает повышение успешности прогнозирования по сравнению со статистическими прогнозами. Фактически, во всех рассмотренных случаях прогнозы по МСД_ГГО превосходят чисто статистические. Результаты, представленные в данной статье, подтверждают вывод о том, что разработанные схемы прогнозирования применимы для оперативного использования. Единственным исключением стал прогноз максимальных суточных концентраций H_2S в Атырау, где нам пришлось работать с недостоверными исходными данными о выбросах. Показано также, что для крупного промышленного города Красноярска, где выбросы изменяются не очень быстро, разработанные схемы прогнозирования применимы, по меньшей мере, в течение 5–10 лет.

По сравнению с чисто статистическими методами прогноза также преимуществом предлагаемого метода является то, что он может быть использован для оценки ожидаемых уровней загрязнения воздуха в точках, где отсутствуют данные инструментальных наблюдений. В силу рассмотренных выше ограничений для численных прогнозов загрязнения атмосферного воздуха в городах, качество таких оценок может быть хуже, чем в точках, где для синтеза имеются оба типа данных: измеренные и полученные с помощью ХТМ. Тем не менее, данный результат может также иметь определенные практические приложения.

При дальнейшем развитии описанной в настоящей статье технологии прогнозирования представляется естественным

добавление в общую методику синтеза в качестве дополнительных предикторов результатов оперативного расчета значений концентраций, полученных с применением ХТМ, т. е. включение в прогностическую схему результатов расчетов по ХТМ, работающей в режиме *online*. К сожалению, пока у нас не было возможности реализовать такой подход, но не исключено, что при его применении успешность схем прогнозирования может быть повышена.

Другой очевидный вариант связан с улучшением пространственного разрешения используемых численных моделей. Следует подчеркнуть, однако, что формальное использование более мелких сеток может оказаться недостаточным без улучшения физических параметризаций, которые отвечают за описание ветрового потока и характеристик турбулентности внутри городского «слоя шероховатости». С этой точки зрения весьма перспективным представляется подход, сформулированный в уже цитировавшейся работе (Esau et al., 2021). В качестве промежуточного варианта могло бы также оказаться эффективным применение метеорологических драйверов, реализующих концепцию городской пористости. Эта концепция, предложенная в 1970-е гг. (см., например, Попов, 1975, 1976), получила дальнейшее развитие в работе (Martilli et al., 2002). Уже была разработана версия модели WRF (Chen et al., 2011; Thunis et al., 2016), в которой такой подход был реализован и которую можно использовать вместе с соответствующим образом скорректированной городской ХТМ, причем эффективность такой схемы можно было бы проверить с помощью технологии МСД. Для этого, однако, потребовалась бы дополнительная и в настоящее время труднодоступная информация о трехмерной структуре городской пористости и других характеристиках городской застройки.

Авторы приносят благодарность всем организациям, оказавшим помощь в сборе исходных данных, которые были использованы при получении представленных в статье результатов. Они благодарны также профессору М. Софиеву (ФМИ) за полезные обсуждения в процессе подготовки первоначальной редакции статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Берлянд М. Е. (1975). Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеоиздат. 448 с.

Берлянд М. Е. (1985). Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеоиздат. 272 с.

Генихович Е. Л., Грачева И. Г., Зив А. Д., Румянцев Д. Ю. (2016). Разработка мезомасштабной/региональной химической транспортной модели ГГО (ХТМ_ГГО) // Труды ГГО. Вып. 580. С. 54–81.

Кузнецова И. Н., Шалыгина И. Ю., Нахаев М. И., Ткачева Ю. В., Ривин Г. С., Кирсанов А. А., Борисов Д. В., Лезин Е. А. (2019). Система прогнозирования качества воздуха на основе химических транспортных моделей // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. № 4 (374). С. 203–218.

Методы (2017). Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе / утв. приказом Минприроды России 06.06.2017 г. № 273; зарегистр. Минюстом России 10.08.2017 г. (регистрационный № 47734).

Попов А. М. (1975). О распространении примесей в атмосфере города // Метеорология и гидрология. № 11. С. 48–54.

Попов А. М. (1976). О турбулентном переносе в слое шероховатости // Изв. АН СССР. ФАО. Т. 12. № 10. С. 1095–1096.

Порядок (2011). Порядок представления информации о неблагоприятных метеорологических условиях, требования к составу и содержанию такой информации, порядок ее опубликования и предоставления заинтересованным лицам / утв. приказом Минприроды России 17.11.2011 г. № 899; зарегистр. Минюстом России 8.02.2012 г. (регистрационный № 23173).

Пугачев В. С. (2002). Теория вероятностей и математическая статистика. — М.: Физматлит. 496 с.

РД (1991). РД 52.27.284-91 «Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов». — СПб: Гидрометеоиздат. 150 с.

РД (1993). РД 52.04.306-92 «Руководство по прогнозу загрязнения воздуха». — СПб: Гидрометеоиздат. 104 с.

Сонькин Л. Р. (1991). Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеоиздат. 223 с.

Требования (2020). Требования к проведению наблюдений за состоянием окружающей среды, ее загрязнением / Утв. приказом Минприроды России 30.07.2020 г. № 524, зарегистр. Минюстом России 14.12.2020 г. (рег. № 61430).

ФЗ-96 (1999). Федеральный закон «Об охране атмосферного воздуха» от 04.05.1999 г. № 96-ФЗ.

Arunachalam S., Valencia A., Akita Y., Serre M. L., Omary M., Garcia V., Isakov V. (2014). A method for estimating urban background concentrations in support of hybrid air pollution modeling for environmental health studies // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. V. 11. P. 10518–10536. DOI: 10.3390/ijerph111010518.

Carnevale C., De Angelis E., Finzi G., Turrini E., Volta M. (2020). Application of data fusion techniques to improve air quality forecast: a case study in the Northern Italy // *Atmosphere*. V. 11. P. 244–258. DOI: 10.3390/atmos11030244.

Chen F., Kusaka H., Bornstein R., Ching J., Grimmond C. S. B., Grossman-Clarke S., Loridan T., Manning T., Martilli A., Miao S., Sailor D., Salamanca F. P., Taha H., Tewari M., Wang X., Wyszogrodzki A. A., Zhang C. (2011). The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation and applications to urban environmental problems // *Int. Journ. Climatol*. V. 31. P. 273–288.

Crooks J., Isakov V. (2013). A wavelet-based approach to blending observations with deterministic computer models to resolve the intraurban air pollution field // *Journal of the Air & Waste Management Association*. V. 63, № 12. P. 1369–1385. DOI: 10.1080/10962247.2012.758061.

Denby B. R., Gauss M., Wind P., Mu Q., Waersted E. G., Fagerli H., Valdebenito A., Klein H. (2020). Description of the uEMEP_v5 downscaling approach for the EMEP MSC-W chemistry transport model // *Geosci. Model Dev*. V. 13 (12). P. 6303–6323. DOI: 10.5194/gmd-2020-119.

Esau I., Bobylev L., Donchenko V., Gnatiuk N., Lappalainen H. K., Konstantinov P., Kulmala M., Mahura A., Makkonen R., Manvelova A., Miles V., Petaja T., Poutanen P., Fedorov R., Varentsov R., Wolfa T., Zilitinkevich S., Baklanov A. (2021). An enhanced integrated approach to knowledgeable high-resolution environmental quality assessment // *Environmental Science and Policy*. V. 122. P. 1–13. doi.org/10.1016/j.envsci.2021.03.020.

Galperin M., Genikhovich E., Sofiev M., Gracheva I., Virf J., Soares M. (2010). Meso-to-global modeling of atmospheric transport: numerical recipes, tests and applications / In: *Air Pollution Modeling and Its Application XX* / D. G. Steyn, S. T. Rao eds., Springer Sci. P. 147–150. DOI: 10.1007/978-90-481-3812-8.

Genikhovich E. L., Sonkin L. R., Kirillova V. I. (2004). A statistical prognostic model for daily maxima of concentrations of urban air pollutants / In: 9th Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. URL: http://www.harmo.org/Conferences/Proceedings/_Garmisch-Partenkirchen/published Sections/5.09.pdf.

Huang G., Lee D., Scott E. M. (2018). Multivariate space-time modelling of multiple air pollutants and their health effects accounting for exposure uncertainty // *Statistics in Medicine*. V. 37. P. 1134–1148. URL: doi.org/10.1002/sim.7570.

- Jolliffe I. T.* (2002). *Principal Component Analysis*. — Springer. 487 p.
- Kalnay E.* (2003). *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*. — Cambridge. 341 p. 9780521791793, doi.org/10.1256/00359000360683511.
- Kukkonen J., Olsson T., Schultz D. M., Baklanov A., Klein T., Miranda A. I., Monteiro A., Hirtl M., Tarvainen V., Boy M., Peuch V.-H., Poupkou A., Kioutsioukis I., Finardi S., Sofiev M., Sokhi R., Lehtinen K. E. J., Karatzas K., San Jose R., Astitha M., Kallos G., Schaap M., Reimer E., Jakobs H., Eben K.* (2012). A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe // *Atmos. Chem. Phys.* V. 12. P. 1–87. URL: www.atmos-chem-phys.net/12/1/2012/. DOI: 10.5194/acp-12-1-2012.
- Maronga B., Gryschka M., Heinze R., Hoffmann F., Kanani-Sühring F., Keck M., Ketelsen K., Letzel M. O., Sühring M., Raasch S.* (2015). The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for atmospheric and oceanic flows: model formulation, recent developments and future perspectives // *Geosci. Model. Dev.* V. 8. P. 2515–2551. URL: <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2515-2015>.
- Martilli A., Clappier A., Rotach M.* (2002). An urban surface exchange parameterization for mesoscale models // *Boundary-layer meteorology*. V. 104 (2). P. 261–304.
- NCEP (2000). National Centers for Environmental Prediction / National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, ~~continuing from July 1999~~ // Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. DOI: 10.5065/D6M043C6.
- Ritenberga O., Sofiev M., Kirillova V., Kalnina L., Genikhovich E.* (2016). Statistical modelling of non-stationary processes of atmospheric pollution from natural sources: example of birch pollen // *Agricultural and Forest Meteorology*. V. 226–227. P. 96–107. DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.05.016.
- Senthilkumar N., Gilfether M., Metcalf F., Russell A. G., Mulholland J. A., Chang H. H.* (2019). Application of a fusion method for gas and particle air pollutants between observational data and chemical transport model simulations over the contiguous United States for 2005–2014 // *Int. Journ. Envir. Res. Publ. Health*. V. 16. P. 3314–3328. DOI: 10.3390/ijerph16183314.
- Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J. G., Duda M. G., Barker D. M., Huang X.-Y.* (2019). A description of the Advanced Research WRF Model version 4 / National Center for Atmospheric Research — Tech. Note, NCAR/TN-556+STR. 145 p.
- Schuenemeyer J. H., Drew L. J.* (2011). *Statistics for earth and environmental scientists*. — Wiley. 397 p.
- Sofiev M., Galperin M., Genikhovich E.* (2008). A Construction and Evaluation of Eulerian Dynamic Core for the Air Quality and Emergency Modelling System SILAM /

In: Air Pollution Modeling and Its Application. NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security / C. Borrego, A. I. Miranda eds. — Springer, Dordrecht, Netherlands. P. 699–701. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8453-9_94.

Sofiev M., Vira J., Kouznetsov R., Prank M., Soares J., Genikhovich E. (2015). Construction of the SILAM Eulerian atmospheric dispersion model based on the advection algorithm of Michael Galperin // *Geosci. Model Dev.* V. 8. P. 3497–3522. URL: www.geosci-model-dev.net/8/3497/2015/. DOI: 10.5194/gmd-8-3497-2015.

Theobald M. R., Simpson D., Vieno M. (2016). Improving the spatial resolution of air-quality modelling at a European scale — development and evaluation of the Air Quality Re-gridder Model (AQR v1.1) // *Geosci. Model Dev.* V. 9. P. 4475–4489. URL: www.geosci-model-dev.net/9/4475/2016/. DOI: 10.5194/gmd-9-4475-2016.

Thunis P., Miranda A., Baldasano J. M., Blond N., Douros J., Graff A., Janssen S., Juda-Rezler K., Karvosenoja N., Maffei G., Martilli A., Rasoloharimahefa M., Real E., Viaen P. (2016). Overview of current regional and local scale air quality modelling practices: Assessment and planning tools in the EU // *Environmental Science & Policy*. V. 65 (C). P. 13–21.

Vannitsem S. (2008). Dynamical properties of MOS forecasts: analysis of the ECMWF operational forecasting system // *Weather and Forecasting*. V. 23, № 10. P. 1032–1043. DOI: 10.1175/2008WAF2222126.1.

WMO (2016). WMO Coupled Chemistry-Meteorology / Climate Modelling (CCMM): status and relevance for numerical weather prediction, atmospheric pollution and climate research / WMO № 1172. GAW Report № 226. 165 p. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7938.

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ КЛИМАТИЧЕСКАЯ
ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ РЕГИОНАЛЬНЫХ
ПЛАНОВ АДАПТАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЮ И ИЗМЕНЧИВОСТИ
КЛИМАТА (НА ПРИМЕРЕ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ)**

*Д. В. Фасолько, М. В. Клюева, Е. П. Самойлова, Е. Н. Федорова,
Е. Н. Разова, Е. М. Акентьева*

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Voeikov Main Geophysical Observatory
St. Petersburg, Karbysheva st., 7

E-mail: eakentyeva@mail.ru

Поступила в редакцию 28.04.2024
Поступила после доработки 14.08.2024

Введение

В Российской Федерации процесс адаптации к изменениям климата регламентирован рядом нормативных документов и проектов, основными из которых являются Национальный план мероприятий первого и второго этапа адаптации к изменениям климата на период до 2025 года и Важнейший инновационный проект государственного значения (ВИП ГЗ) «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ».

Одна из главных задач реализации Национального плана — формирование региональных планов адаптации и их актуализация, включающая оценку наблюдаемых и прогнозируемых изменений широкого набора климатических параметров, значимых для различных секторов экономики и здоровья населения. В настоящее время готовится ряд методических рекомендаций по подготовке климатической информации для актуализации

адаптационных планов на отраслевом и региональном уровнях. Представленная работа, посвященная анализу воздействия климатических факторов на отдельные отрасли экономики и социальной сферы Новосибирской области, является апробацией методических рекомендаций по учету климатической информации при формировании региональных планов адаптации к изменению климата. В 2023 г. аналогичная работа была выполнена для территории Ленинградской области (Акентьева и др., 2023)

Материалы и методы

При расчете специализированных климатических показателей для различных секторов социально-экономической сферы Новосибирской области использовались находящиеся в открытом доступе на сайте ВНИИГМИ-МЦД (<http://meteo.ru/>) данные наблюдений метеорологических станций Новосибирской области: Северное, Болотное, Татарск, Огурцово, Барабинск. Источниками информации также являлись метеорологические ежемесячники и электронный научно-прикладной справочник «Климат России». Расчеты производились в соответствии с методиками, изложенными в Руководстве по климатологической практике ВМО (Руководство, 2018) и отечественных руководствах по методам обработки специализированных климатических показателей (Кобышева, 1990; Руководство, 2008; Методические рекомендации, 2017, 2022).

Результаты и обсуждение

Транспортный сектор

Оценка воздействия климатических факторов на транспортную инфраструктуру Новосибирской области особенно актуальна из-за прохождения по ее территории крупных транспортных коридоров: Транссибирской магистрали и федеральных автодорог М-51, М-52, М-53, а также международного аэропорта «Толмачево».

Эксплуатация железнодорожного транспорта в условиях аномально низких температур воздуха сопровождается увеличением ресурсоемкости и энергоемкости перевозок, снижая их экономическую эффективность и уровень безопасности (Григорьев и др., 2014). Возрастает риск выхода из строя отопительной системы вагонов. При длительном воздействии высоких температур воздуха увеличивается вероятность деформации рельсов, вывода из строя служб сигнализации и связи на железных дорогах (Горбатенко и др., 2021). Подобным образом складывается ситуация и на автодорогах, где при длительных периодах с высокими температурами воздуха и почвы может наблюдаться размягчение асфальтового покрытия, что в итоге ведет к росту числа аварий (Якунин, 2019; Якунин, 2020). Последствиями низких температур является увеличение расхода топлива, дополнительные затраты времени на прогрев двигателя и разогрев рабочей жидкости и т. д. (Енгальчев и др., 2020). Авиатранспорт в условиях низких температур испытывает сложности с подачей масла, кристаллизацией воды в топливе, сокращением срока службы пневматиков колес, резиновых шлангов, трубопроводов из-за появления трещин и т. д. Кроме того, высокие температуры воздуха могут оказывать влияние на взлетно-посадочные характеристики воздушных судов.

Анализ наблюдаемых изменений климатических показателей по данным 35 метеостанций за период 1966–2022 гг. показал, что средняя скорость роста средней годовой температуры воздуха примерно одинакова по территории области и составляет 0,3–0,4°C/10 лет, что несколько меньше, чем в среднем по России. Статистически значимым является увеличение числа дней с температурой воздуха выше +25 °C (рис. 1). При этом доля числа дней с температурой воздуха выше +30 °C достигала 25–50 %.

Значительного повышения средних зимних температур не наблюдается. В отдельные годы отмечается близкое к экстремальному число дней с температурами ниже –25 °C, например, зимой 2009–2010 гг. был отмечен абсолютный максимум числа дней с температурой ниже –25 °C (на ряде метеостанций он составил 72–86 дней). Однако при этом значительно снизилась

повторяемость температуры воздуха ниже -40°C , которая является одним из важных специализированных показателей для транспортного, строительного и энергетического секторов.

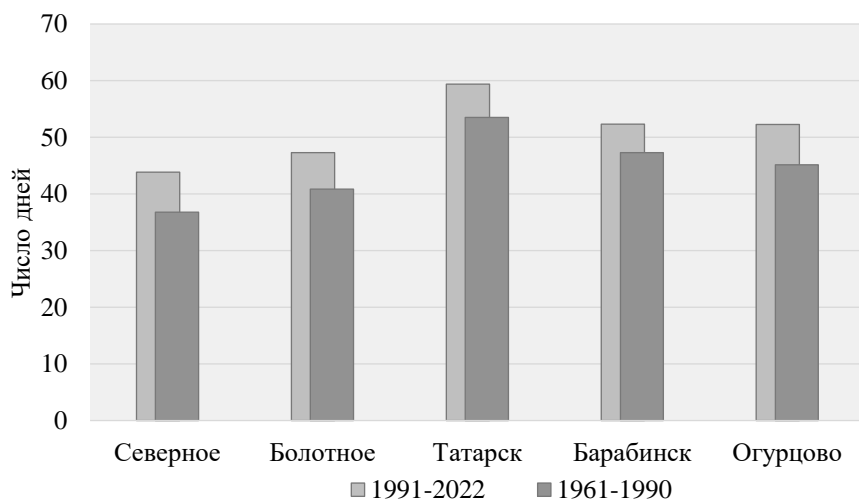


Рис. 1. Среднее число дней с температурой воздуха выше $+25^{\circ}\text{C}$ по данным метеостанций Северное, Болотное, Татарск, Барабинск, Огурцово за 1961–1990 гг. и 1991–2022 гг.

Изменения режима увлажнения, в частности рост количества осадков и их интенсивности в теплый период, а также увеличение доли жидких осадков в годовой сумме снижают безопасность дорожного движения, способствуя размыву дорожного полотна и ухудшению качества сцепления колес автомобиля с дорожным покрытием (Хлебникова и др., 2014). По данным наблюдений особенно заметно вырос суточный максимум осадков теплого периода. В ряде районов увеличение этого показателя составило почти 100 % за последние 10 лет (рис. 2).

Наибольшее увеличение сумм осадков теплого периода (на 10–16 %) характерно для востока области, прежде всего для предгорных районов. Растет и доля жидких осадков в годовой сумме в 1987–2015 гг. она составила 9–17 %, тогда как в 1958–1986 гг. не превышала 6 % (рис. 3).

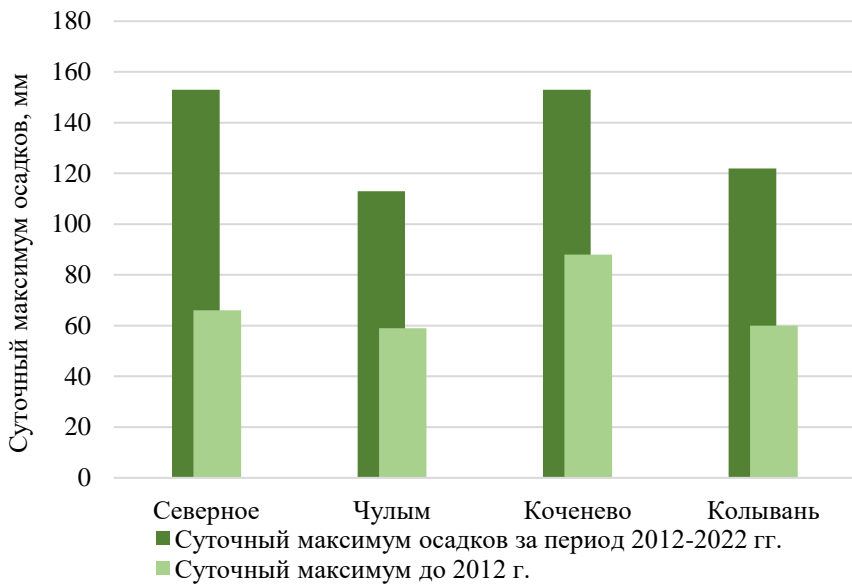


Рис. 2. Суточный максимум осадков на метеостанциях Новосибирской области

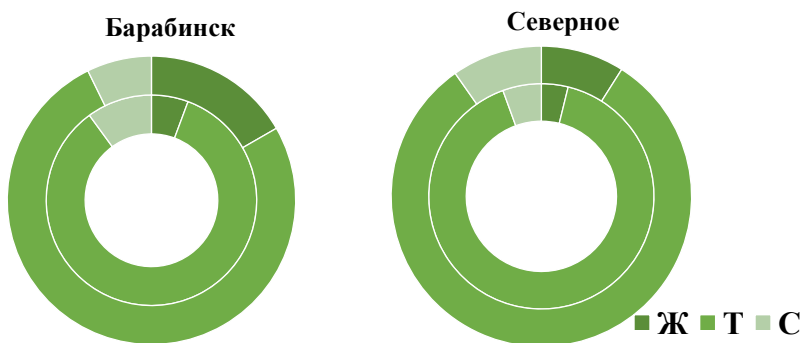


Рис. 3. Количество жидких (ж), твердых (т) и смешанных (с) осадков, мм, за 1958–1986 гг. (внутренний круг) и 1987–2015 гг. (внешний круг)

Анализ характеристик опасных гидрометеорологических явлений, способных в разной степени осложнить функционирование транспортного сектора, проводился по данным Метеорологических ежемесячников (Выпуск 20, 2 часть) за период 2000–2021 гг. Опасные явления (ОЯ) были объединены в группы для удобства дальнейшего анализа:

- экстремальные осадки: очень сильный дождь, сильный дождь, сильный ливень;
- высокие скорости ветра: очень сильный ветер, сильный ветер, шквал;
- гололедно-изморозевые отложения (ГИО): отложение мокрого снега, сложное отложение.

В указанный период в регионе зафиксировано 266 случаев ОЯ, среди которых преобладают сильный ветер (41%), морозы (23%) и осадки (20%) (рис. 4).



Рис. 4. Повторяемость опасных явлений на территории Новосибирской области, %, влияющих на функционирование транспортного хозяйства по данным метеостанций и метеопостов за период 2000–2021 гг.

На основе данных о повторяемости ОЯ и уязвимости транспортной инфраструктуры, характеризующейся плотностью дорожной сети, в каждом административном районе были получены нормированные оценки погодно-климатического риска для транспортного сектора (Кобышева и др., 2015) (рис. 5). Наиболее высокие значения данного риска характерны для Карасукского района, находящегося на юге области. Это обусловлено сочетанием значительной повторяемости различных видов ОЯ и большей плотности транспортных сетей относительно других районов Новосибирской области. Наименее подверженными данному риску оказались практически все северные и некоторые центральные районы области.

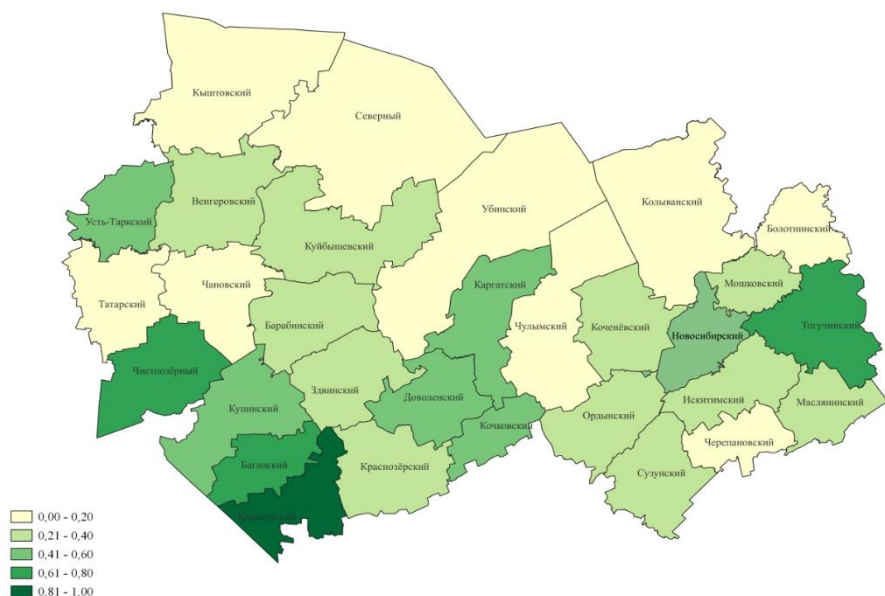


Рис. 5. Погодно-климатический риск для транспортной отрасли от ОЯ в административных районах Новосибирской области (в долях единицах)

В результате проведенного анализа изменения климатических параметров, важных для работы транспортного сектора Новосибирской

области, были определены следующие тенденции, наиболее негативно влияющие на транспортную инфраструктуру:

- рост числа дней с высокими температурами воздуха,
- увеличение суточного максимума осадков в теплый период года,
- возрастание доли жидких осадков в холодный период года,
- рост числа дней с переходом температуры воздуха через 0 °С.

Однако такие последствия климатических изменений на территории области как сокращение объемов снегопереноса и уменьшение числа дней с низкими температурами воздуха можно рассматривать как положительные для работы транспорта.

Следует отметить, что по данным РКМ ГГО к середине XXI в. ожидается рост повторяемости неблагоприятных условий для транспортного сектора (рост интенсивности и частоты ОЯ, увеличение жидких осадков в холодный и теплый периоды года, увеличение числа дней с высокой температурой воздуха и т. д.). На территории Сибирского федерального округа, в частности Новосибирской области, по сценарию RCP8.5 МГЭИК в 2050–2059 гг. по отношению к 1990–1999 гг. возможно изменение ряда специализированных климатических показателей, в числе которых продолжительность периода с отрицательной средней суточной температурой воздуха (уменьшение составит до 22 дней), число дней с суточной минимальной температурой воздуха ниже –30 °С (сокращение на период более месяца), число дней с переходом температуры воздуха через 0 °С. Режим осадков характеризуется, прежде всего, ростом суточного максимума осадков (Третий оценочный доклад, 2022). Эту информацию следует учитывать при формировании планов по строительству, капитальному ремонту и реконструкции транспортной инфраструктуры Новосибирской области.

Строительный сектор

Строительный сектор требует учета климатических параметров, а также их изменений, на всех этапах строительства, так как они имеют связь с рисками различного характера. Это обусловлено рядом черт,

отличающих строительство от других отраслей материального производства. В частности, процесс строительства отличается длительностью циклов, особенными условиями труда, технологией производства с применением специфических материалов, оборудования и техники, сезонным характером работ и зависимостью от неоднородных природно-климатических условий. Изменение климатических условий может привести к значимым последствиям, таким как изменение условий проведения строительных работ и соответствующее изменение затрат; финансовые и физические риски, обусловленные несоответствием стандартов проектирования реальным климатическим условиям и т. д. С целью наиболее полной оценки рисков на основе специальной литературы (Шамин, 2011; Шамин, 2014); Риски строительной отрасли; Кошелев, 2015) выполнен анализ всего комплекса возможных угроз и выявлены климатозависимые риски, возникающие на различных этапах строительства. В таблице 1 представлены этапы производственного цикла в жилищном строительстве и соответствующие им риски.

Таблица 1

**Климатозависимые риски строительной отрасли
на разных этапах**

ЭТАП		
1. Разработка проекта (проектирование)	2. Реализация проекта	3. Эксплуатация объекта
СОСТАВ РАБОТ		
<p>Определение источников финансирования, архитектурно-инженерные решения, утверждение проекта и сметы расходов</p>	<p>Организация и координация выполнения строительно-монтажных работ, контроль качества и затрат; исполнение строительных работ</p>	<p>Комплекс мероприятий по содержанию, обслуживанию и ремонту зданий (сооружений), обеспечивающих их безопасное функционирование и санитарное состояние в соответствии с их функциональным назначением</p>

Климатозависимые риски строительной отрасли на разных этапах

ВИД КЛИМАТОЗАВИСИМОГО РИСКА

Риски информационного потока	Риски материального потока	Форс-мажорные риски	Риски информационного потока	Риски материального потока	Форс-мажорные риски
Риск использования неполной или некачественной информации о климате в районе строительства	Риск срыва сроков работ, связанный с неблагоприятными условиями погоды (простой рабочей силы, простой строительной техники, сбой планирования поступления необходимых материалов на строительные участки в связи с погодными явлениями	Риск стихийных бедствий (разрушение, затопление объектов строительства; потери рабочей силы)	Риск использования неполной или некачественной информации о климате в период как в проектировании, так и текущей информации	Риск нарушения прочностных, физических и других свойств, устанавливаемых при проектировании и обеспечивающие нормальную эксплуатацию строения в течение расчетного срока службы в связи с неблагоприятными явлениями погоды	Риск стихийных бедствий (разрушение зданий и объектов, гибель людей)

Риски информационного потока

На этапе проектирования зданий необходимо максимально предотвратить климатические риски информационного потока. Для обеспечения надежности и долговечности зданий и сооружений, возводимых в условиях меняющегося климата, важно использовать современную климатическую информацию, актуализировать ее в нормативных документах. Исходя из этого, возникает проблема выбора длины ряда и метода расчета, в особенности вероятностных индексов. В условиях нестационарности климата оптимальный выбор нормативов по сравнению со стационарным вариантом существенно осложняется. В случае стационарного климата знание функции распределения и задание периода повторяемости являются достаточными для оценки вероятности наступления угрожающего события для любого временного интервала в будущем. В нестационарных условиях, в которых в настоящее время принимаются решения, требуется привязка к определенному периоду, представляющему интерес с точки зрения потребителя, и соответствующая климатическая информация об ожидаемых изменениях в распределении экстремумов (Третий оценочный доклад, 2022).

Новосибирская область находится в регионе, где зимой потепление было заметным лишь до конца прошлого столетия, затем последовало понижение температуры, обусловленное чередой холодных зим (Лучицкая и др., 2011; Коршунова и др., 2023). В соответствии с анализом многолетнего хода средней температуры по месяцам, на большей части рассматриваемой территории за последние 30 лет произошла смена знака тренда. Согласно ежегодным докладам об особенностях климата на территории Российской Федерации за период 2010–2021 гг. (Доклад об особенностях климата, 2011–2023) в четырех годах (30 %) отмечались отрицательные аномалии (в 2010 г. для Западной Сибири аномалия составила -6°C). Подобная ситуация характерна для температур наиболее холодных суток и пятидневок. Наличие отрицательного тренда сопровождается долгопериодной тенденцией похолодания зимних сезонов для малых значений квантилей —

усилением наиболее сильных морозов. Это объясняется не только изменением средних значений минимумов, но и в большей степени увеличением повторяемости экстремально низких температур. В Барабинске за 1991–2020 гг. температура наиболее холодной пятидневки трижды опускалась ниже нормативной периода 1971–2021 гг. (из 4-х за полный период).

Приведенные оценки позволяют сделать вывод, что предлагаемый в настоящее время период расчета за 30 лет не будет отражать будущие условия эксплуатации возводимых сооружений: смена фаз потепления на территории России зависит от режимов крупномасштабной атмосферной циркуляции. В конце 1960-х – начале 1970 годов меридиональная циркуляция сменилась зональной с возросшей ролью североатлантических центров действия атмосферы. Со второй половины 1990-х годов вновь возрастает интенсивность меридиональной циркуляции, и потепление замедляется, но в целом климат теплеет и полученные за 30-летний период расчетные минимумы на территории Новосибирской области могут оказаться заниженными. В целом, следует согласиться с выводами Третьего оценочного доклада (2022) о том, что результаты оценки прикладных климатических показателей, в том числе характеристик экстремальности, по данным наблюдений и результатам моделирования наглядно показывают, что обновление нормативных параметров, основанное только на исторических данных, не может считаться достаточной мерой для адаптации к изменениям климата, особенно если речь идет о строительстве объектов с длительным сроком эксплуатации. Необходимо тесное взаимодействие специалистов-климатологов и представителей заинтересованных отраслей с целью выработки новых подходов к определению нормативов экстремальности на основе вероятностных оценок ожидаемых изменений и с учетом интересов конкретных потребителей.

Риски материального потока

В ходе реализации проекта к рискам, ведущим к материальным потерям, относятся риски несоблюдения сроков, обусловленные неблагоприятными условиями погоды, вследствие простоев рабочей

силы и/или строительной техники, сбоев планирования поступления необходимых материалов на строительные участки. При этом простои рассматриваются как одни из наиболее важных факторов в формировании себестоимости строительной продукции, часто являясь причиной большей доли потерь. В некоторых случаях негативные последствия возникают уже при необычных, несезонных или неожиданных погодных явлениях. В связи с этим очевидна потребность в обеспечении климатической информацией для снижения данного типа рисков.

Происходящие и ожидаемые изменения термического режима Новосибирской области в целом окажут положительное влияние на условия проведения строительных работ, повысят вероятность сокращения времени на реализацию проектов. Наблюдается уменьшение числа дней с температурой воздуха ниже -2°C и увеличение продолжительности теплого сезона (по прогнозу до 20 дней к середине столетия) (Третий оценочный доклад, 2022). Также снижается число дней с угрозой обморожения (рис. 6), которое было рассчитано с использованием интегрального показателя, учитывающего скорость ветра и температуру воздуха (МР 2.2.7.2129-06).

Еще одним фактором риска для проведения работ в строительном секторе является сильный ветер, который формирует нагрузку на здания и сооружения. Несмотря на уменьшение средних скоростей ветра, на территории Новосибирской области увеличивается число дней со скоростями ветра больше 10 м/с, при которых останавливается монтаж стеновых панелей и работа башенных кранов (рис. 7). Кроме того, на территории области отмечаются климатические риски, связанные с ростом интенсивности и частоты экстремальных осадков, что может вызвать дополнительные затраты на создание временных сооружений для защиты от затоплений и управления стабилизацией откосов.

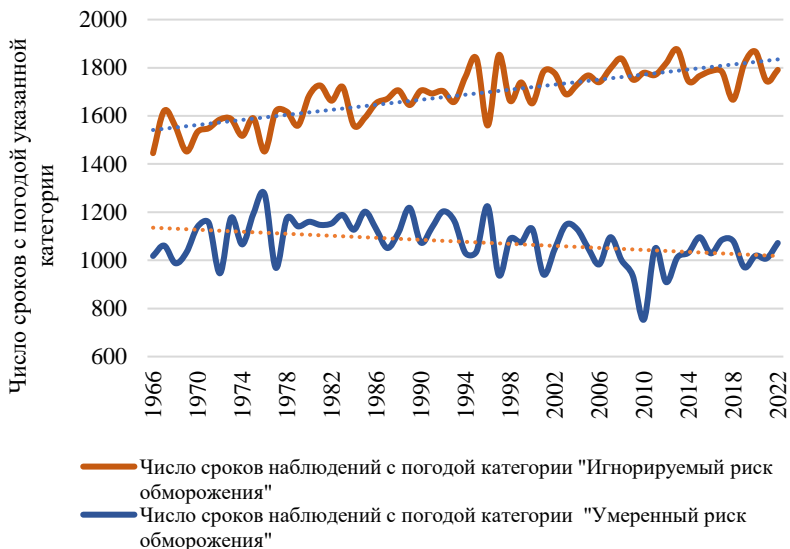


Рис. 6. Число сроков наблюдений с погодой разной категории риска обморожения

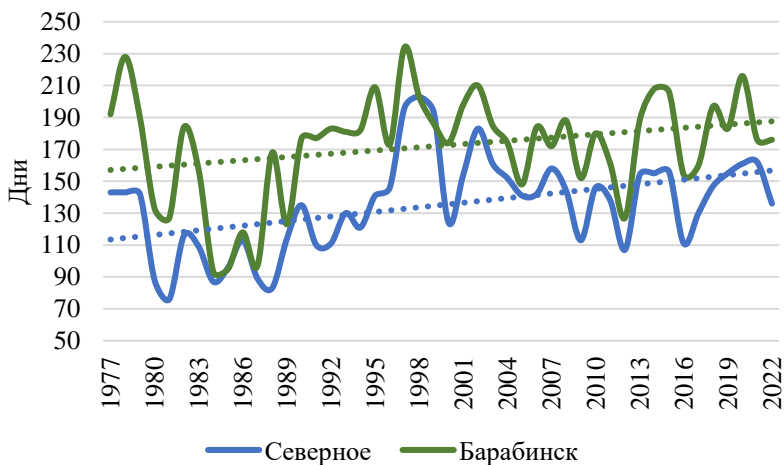


Рис. 7. Число дней со скоростью ветра более 10 м/с

На этапе эксплуатации анализ значений специализированных климатических параметров за последнее 50-летие показал, что наибольшие погодно-климатические риски материального потока для строительных конструкций на рассматриваемой территории связаны с изменением величины нагрузок на здания и сооружения. Для Новосибирской области характерно увеличение снеговых нагрузок, так как растет количество осадков зимнего периода, их интенсивности. Важным аспектом становятся кратковременные снеговые нагрузки, возникающие при сильных снегопадах (рис. 8). Ожидаемые изменения, характеризующиеся усилением этой тенденции, являются дополнительным фактором риска для зданий и сооружений. Это не только наносит материальный ущерб, но и может приводить к человеческим жертвам.

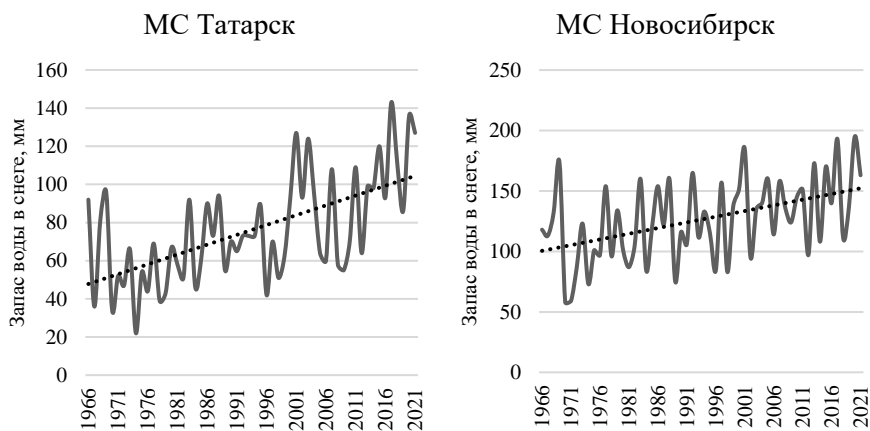


Рис. 8. Запас воды в снеге (мм) по данным метеостанций Татарск и Новосибирск

Погодно-климатические условия оказывают воздействие на такие важнейшие характеристики строений как долговечность и ремонтпригодность. В соответствии с регламентирующими документами долговечность ограждающих конструкций зданий и сооружений определяется сроком их службы без потери

эксплуатационных качеств и обеспечивается применением материалов, имеющих «надлежащую стойкость (морозостойкость, влагостойкость, биостойкость, стойкость против коррозии, высокой температуры, циклических температурных колебаний и против других разрушающих воздействий окружающей среды)». Наиболее распространенным видом разрушающего воздействия являются температурно-влажностные деформации, связанные с ростом числа дней с переходом через 0 в холодное время года (рис. 9).

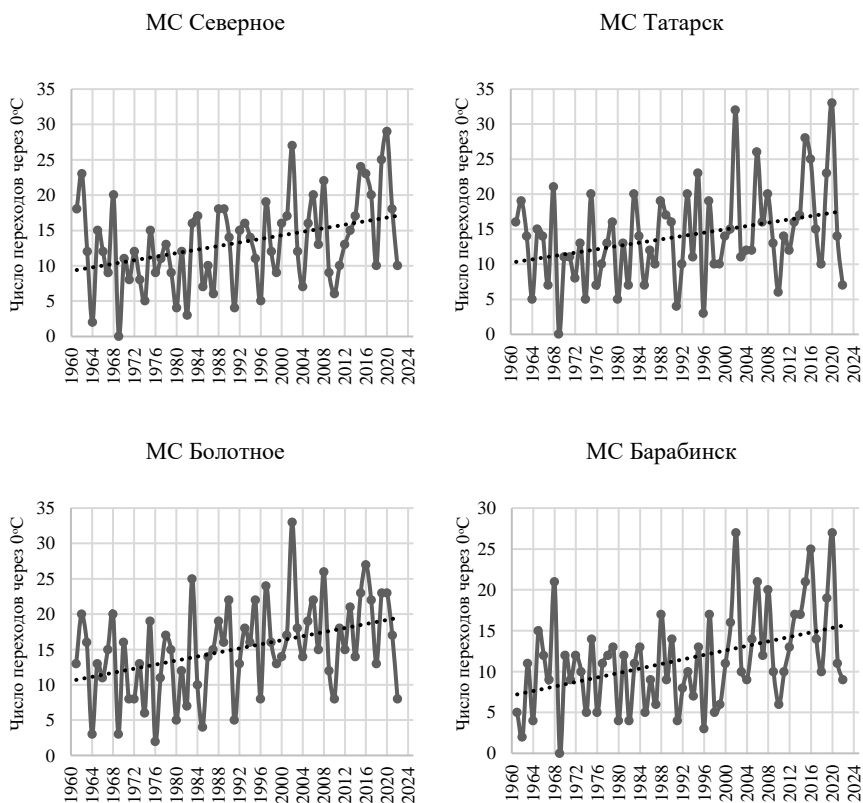


Рис. 9. Число дней с переходом через 0 °С (декабрь–март) по данным метеостанций Северное, Татарск Болотное, Барабинск

Дополнительным фактором, усиливающим процесс старения, является увеличение общего количества осадков в зимний период, в особенности, количества жидких и смешанных осадков, сопровождающих оттепели (рис. 3). В результате усиливается увлажнение стен зданий, наиболее интенсивное при сильном ветре. Последующее охлаждение приводит к замерзанию воды в порах материалов, и оказывает разрушительное воздействие на конструкции. Косые дожди, при которых происходит аккумуляция влаги в стенах, способствуют росту плесени на фасадах зданий, что в большей степени опасно для исторических объектов. Коррозия, вызванная избыточным увлажнением, при строительстве с использованием металлических конструкций и арматуры нарушает прочность и может привести к авариям и чрезвычайным ситуациям, включая человеческие жертвы. Замена нарушенных конструкций или оборудования, спровоцированная этой причиной, сопровождается весомыми материальными затратами.

Форс-мажорные риски

Этот тип рисков непосредственно связан с опасными гидрометеорологическими явлениями. В Новосибирской области большой вклад в повторяемость опасных явлений погоды вносят очень сильный ветер, шквал, очень сильный дождь, сильные морозы (рис. 4). По данным статьи Игнатъевой и др. (2020) серьезную для территории области представляют торфяные пожары и паводки, которые могут перейти в категорию ЧС. Этому способствуют такие природные условия как достаточно большая площадь заболоченных территорий, наличие понижений рельефа и крупных водоемов вблизи населенных пунктов.

Доля ЧС природного характера для региона составляет 11 % от общего числа ЧС всего Сибирского федерального округа (3 место), а вероятность перехода опасных природных явлений в состояние ЧС — 53,2 %.

Дополнительно следует учитывать классы объектов в силу особенностей влияния изменений климата различные сооружения. Классы присваиваются в зависимости от их назначения, а также

социальных, экологических и экономических последствий их повреждений и разрушений. Уровни ответственности строительства: КС-1 — «пониженный», КС-2 — «нормальный», КС-3 — «повышенный» (ГОСТ 27751-2014). В таблице 2 представлены виды негативного влияния последствий изменений климата, выявленных на территории Новосибирской области, на здания и сооружения в зависимости от класса строений, как на этапе строительства, так и на этапе эксплуатации.

Здоровье населения

Важнейшим следствием климатических изменений является их значительное влияние на здоровье и физический комфорт человека. Помимо существующих факторов воздействия, обусловленных природно-климатическими условиями различных территорий, могут возникнуть новые источники риска для здоровья. Появление новых угроз и усугубление имеющихся происходит вследствие:

- повышения уровня травматизма, заболеваемости и преждевременных смертей из-за более интенсивных волн жары, ураганов, наводнений и лесных пожаров, роста риска заболеваний;
- повышенного риска недоедания в результате уменьшения продуктов питания в засушливых регионах;
- увеличения риска заболеваний, связанных с некачественными пищевыми продуктами и водой и трансмиссивными заболеваниями;
- увеличения риска для психического здоровья, связанного с утраченной трудоспособностью и снижением производительности труда среди уязвимых групп населения (Доклад о климатических рисках, 2017).

Воздействие осуществляется напрямую, когда происходят экстремальные погодные явления, во время которых наблюдаются дополнительная смертность, высокий риск травматизма, обострения хронических заболеваний, которые могут привести к летальному исходу. Косвенное влияние проявляется посредством изменения компонентов окружающей среды и экосистем.

Таблица 2

**Виды негативных воздействий изменений климата на здания и сооружения
в зависимости от класса строений на территории Новосибирской области**

Изменение климата	Класс сооружений	Последствия
<i>Этап строительства</i>		
Увеличение повторяемости и интенсивности волн жары - продолжительных периодов с аномально высокими температурами воздуха	КС-2, КС-3	Ухудшение условий проведения строительных работ в летний период
Высокие скорости ветра	КС-1, КС-2, КС-3	Повреждение или разрушение возводимых строений Нарушение работы техники, срыв работ
<i>Этап эксплуатации</i>		
Увеличение температуры летнего сезона и продолжительности периодов с аномально-высокими значениями температуры воздуха	КС-2, КС-3	Увеличение числа отказов и рисков аварий в технических системах жизнеобеспечения
Рост числа переходов температуры воздуха через 0°С	КС-2, КС-3	Уменьшение долговечности зданий и сооружений
Рост количества «косых дождей», т.е. количества жидких осадков, попадающих на вертикальные поверхности зданий и сооружений	КС-2, КС-3	Уменьшение долговечности зданий и сооружений
Аномальные гололедные и гололедно-ветровые нагрузки	КС-1, КС-2, КС-3	Повреждение или разрушение зданий и сооружений
Аномальные снеговые нагрузки	КС-1, КС-2, КС-3	Повреждение или разрушение кровель

Изменение климата	Класс сооружений	Последствия
<i>Этап эксплуатации</i>		
Снижение несущей способности многолетнемерзлых грунтов	КС-2, КС-3	Повреждение или разрушение фундаментов и конструкций зданий и сооружений
Опасные гидрологические явления (наводнение, паводок), опасные явления в литосфере (лавины, оползни и др.), и криосфере (пучение, солифлюкция и др.) возникающие под влиянием изменения и изменчивости климата.	КС-1, КС-2, КС-3	Повреждение или разрушение зданий и сооружений Загропление территорий, угроза жизни людей и причинения вреда имуществу

Рост уровня смертности и заболеваемости может быть вызван формированием климатических условий, благоприятных для распространения инфекционных заболеваний комарами и клещами, а также заболеваний, передающихся через воду. К тому же, различные явления в социальной сфере — экономические потери, стрессы при повышенной аномальности погоды — являются причинами недоедания, нервных срывов и психических расстройств.

Прямой риск, представленный как оценка повторяемости опасных и аномальных явлений, связан с наличием на территории Новосибирской области наиболее частых ЧС — паводков и лесных пожаров (Игнатьева и др., 2020). Паводки, наводнения воздействуют всеми вышеуказанными способами: непосредственно угрожают жизни людей, нарушают эпидемиологическую безопасность, вызывают психические заболевания, в том числе, связанные с потерей имущества. Лесные пожары также оказывают значительное влияние на здоровье населения. Для, страдающих бронхолегочными заболеваниями (аллергией, астмой или эмфиземой), они могут стать причиной летального исхода. Среди опасных явлений погоды наиболее выраженные негативные последствия наблюдаются от волн жары. В зависимости от их интенсивности и продолжительности происходит увеличение числа смертей, цереброваскулярных заболеваний, заболеваний системы кровообращения, органов дыхания и эндокринной системы. Наиболее подверженными группами населения являются лица старше 65 лет и/или имеющие хронические заболевания сердечно-сосудистой системы и органов дыхания. Новосибирская область, в целом, характеризуется небольшой повторяемостью волн жары, по данным за период 1960–2022 гг. их количество составляет 1–2 случаев в год (рис. 10). Среднесуточная температура в волне имеет относительно невысокие значения (от 23,1 на севере до 25,2 °С на юге области). При этом на станции Огурцово, расположенной в окрестностях Новосибирска, (рис. 11), явление становится более продолжительным, что можно воспринимать как проявление городского острова тепла.

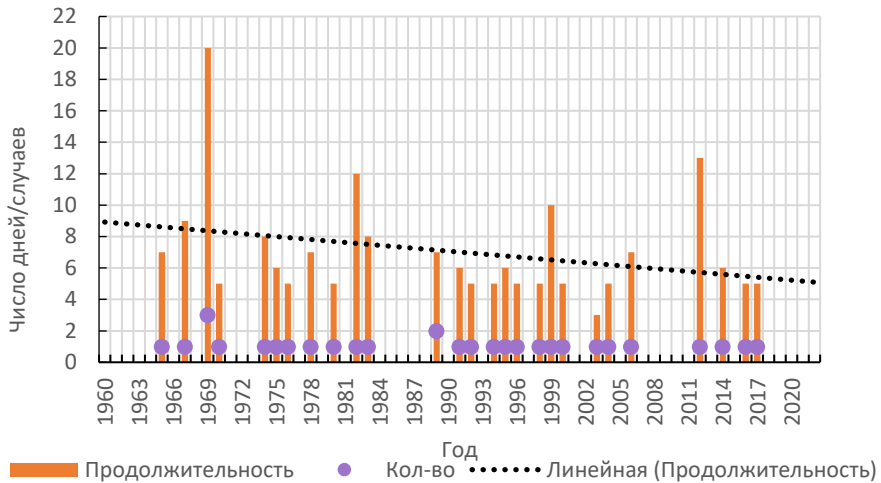


Рис. 10. Количество и продолжительность волн жары на станции Барабинск

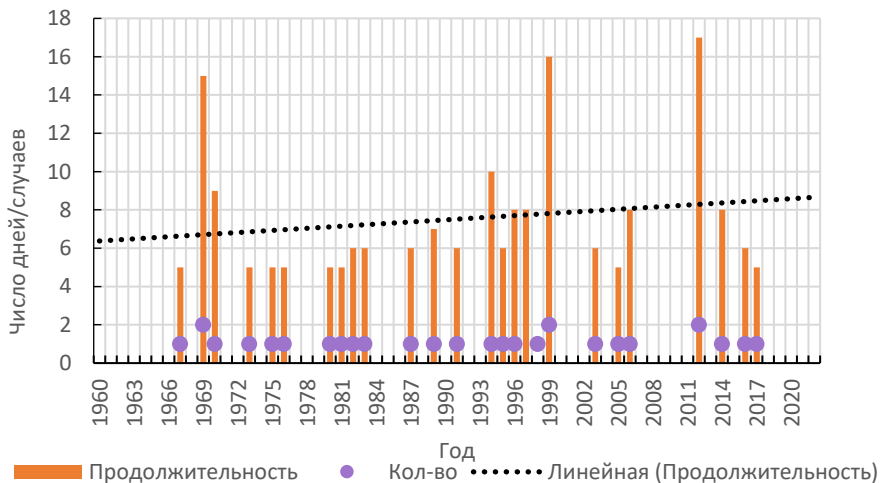


Рис. 11. Количество волн жары и их продолжительность на станции Огурцово

С учетом характеристик волн жары и литературных данных (Ревич и др., 2019), к которым говорится о большей значимости волн холода для здоровья населения в городах с холодным климатом, отдельного внимания заслуживают параметры и явления зимнего периода. В регионе степень дискомфорта в холодный период, определяемая величиной эквивалентно-эффективной температуры, становится больше по расчетам за период 1966–2022 гг. Однако показатель варьируется в небольшом диапазоне. При определении различных категорий биотропности было обнаружено, что около полугода область находится в резких и чрезвычайно резких условиях (категории биотропности 4 и 5) в отношении комплексного комплексного воздействия температуры воздуха, скорости ветра и относительной влажности воздуха (42–47 % дней). Повторяемость лет с аномально холодной погодой в Новосибирской области составляет 21,4 % (Чередыко, 2019). Районы, расположенные на севере и востоке (Маслянинский, Тогучинский, Искитимский, Кыштовский, Колыванский, Убинский), за счет высокой повторяемости «сильных морозов» имеют бóльший риск относительно других районов.

Влияние изменений климата на здоровье выходит далеко за пределы очевидного прямого воздействия во время стихийных бедствий. Повышение температуры приводит к расширению ареалов переносчиков инфекционных болезней человека. В Новосибирской области эндемичными по клещевому вирусному энцефалиту являются Барабинский, Болотнинский, Венгеровский, Искитимский, Каргатский, Колыванский, Коченевский, Краснозёрский, Кыштовский, Маслянинский, Мошковский, Новосибирский, Ордынский, Северный, Сузунский, Тогучинский, Усть-Тарский, Чановский, Черепановский, Чулымский районы, а также города Бердск, Обь и Новосибирск (Новосибирск онлайн).

Проблема безопасности пищевых продуктов и качества питьевой воды становится острее в условиях повышения температур, которые благоприятствуют развитию бактериальной флоры в продуктах питания и воде. При температуре окружающего воздуха свыше 5°C каждое повышение средней недельной температуры на один градус обуславливает повышение уровня заболеваемости сальмонеллезами

на 5–10 %. Соответственно, риск заболеваемости паразитозами, бактериальными и вирусными инфекциями (шистоматоз, сальмонеллез, ротавирусы), энтеровирусными инфекциями в Новосибирской области может вырасти, так как увеличивается количество дней с температурами воздуха выше 5 °С.

Заключение

Для территории Новосибирской области получены оценки изменений и их статистической значимости базовых и специализированных климатических показателей для отраслей экономики (транспорт и строительство) и здоровья населения. На уровне муниципальных образований определены районы, где эти изменения наиболее значительны.

Анализ наблюдаемых изменений климатических характеристик по данным 35 метеостанций за период 1966–2022 гг. показал, что средняя скорость роста средней годовой температуры воздуха примерно одинакова на территории области и составляет 0,3–0,4 °С /10 лет, что несколько меньше, чем в среднем по России. Статистически значимым является увеличение числа дней с температурой воздуха выше +25 °С. Значительного повышения средних зимних температур не наблюдается. В отдельные годы по-прежнему возможно экстремально большое число дней с температурами ниже –25 °С, например, зимой 2009–2010 г. был отмечен абсолютный максимум числа дней с температурой ниже –25 °С (на ряде метеостанций он изменялся в пределах 72–86 дней). Однако при этом значительно снизилась повторяемость температуры воздуха ниже –40 °С, которая является одним из основных специализированных показателей как для строительного, так и для транспортного секторов. Изменения в режиме осадков выражаются в основном в увеличении суточного максимума осадков теплого периода. В ряде районов увеличение этого показателя составило почти 100 % за последние 10 лет. Наибольшее увеличение сумм осадков теплого периода (на 10–16 %) характерно для востока области, прежде всего в предгорных районах. Значимых изменений в характеристиках

ветрового режима на территории Новосибирской области не наблюдается. Благоприятными факторами для функционирования и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры является статистически значимое уменьшение повторяемости туманов, метелей и объемов снеготранспорта. Прогнозные значения изменений климатических показателей к середине XXI в. по отношению к базовому периоду 1990–1999 гг. были получены по данным региональной климатической модели ГГО. По данным модельных оценок средняя температура зимнего периода на территории области повышается на 3–5 °С, средняя температура летнего периода на 1–3 °С. Средняя температура отопительного периода возрастет примерно на 1–2 °С, градусо-сутки отопительного периода уменьшатся на 10–15 %, температура наиболее жаркого месяца, вероятно, увеличится на 1–1,5 °С. К середине XXI в. прогнозируется рост числа дней с переходом температуры воздуха через 0 °С (на 5–10 дн.), что является негативным фактором для устойчивого функционирования транспортной и строительной отраслей, а также для здоровья населения. Изменения в режиме увлажнения коснутся, прежде всего, суточного максимума осадков, величина которого вероятно возрастет на 10–15 %.

Исследование выполнено при поддержке Росгидромета (направление 3.1 плана НИТР «Развитие методов и технологий климатического обслуживания, включая совершенствование моделей прогнозирования климата, методов оценки последствий изменения климата, климатического обоснования национальных адаптационных планов и мониторинга эффективности адаптаций»)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агентьева Е. М., Клюева М. В., Фасолько Д. В., Самойлова Е. П., Разова Е. Н. (2023). Специализированная климатическая информация для подготовки региональных планов адаптации к изменению и изменчивости климата (на примере Ленинградской области) // Труды ГГО. Вып. 209. С. 8–29.

ВНИИГМИ_МЦД. Электронный ресурс. URL: <http://meteo.ru/> (дата обращения 28.06.2023)

Горбатенко В. П., Волкова М. А., Носырева О. В., Кужевская И. В. (2021). Современные тенденции климатических характеристик, влияющих на развитие транспортной системы Томской области // *Фундаментальная и прикладная климатология*. Т. 7. № 4. С. 71–95.

ГОСТ 27751-2014 «Межгосударственный стандарт надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения». 2015.

Григорьев А. В., Лено В. В. (2014). Влияние низких климатических температур на ресурс материала железнодорожных колес // *Фундаментальные исследования*. № 5 (часть 1). С. 18–22.

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

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2010–2022 годы (2011–2023). – Москва: Росгидромет. 2011–2023 гг.

Енгальчев Р. Н., Фахруллин И. Р., Кулаков А. Т. (2020). Исследование влияния низкой температуры окружающей среды на эффективность автотранспортного процесса // *Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация*. № 1(84). С. 20–27.

Игнатьева А. В., Кнауф Р. В. (2020). Природные условия развития чрезвычайных ситуаций на территории Сибирского федерального округа // *Геоэкология*. № 1. С. 66–77.

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

Коршунова Н. Н. Швец Н. В. (2023). Изменение норм основных климатических параметров на территории России // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. № 1. С. 131–147.

Косилов В. А. (2015). Методология управления рисками в логистических системах жилищного строительства / *Диссертация на соискание ученой степени доктора экономических наук*. — Самара. 312 с.

Луцкая И. О., Белая Н. И., Арбузов С. А. (2011). Климат Новосибирска и его изменения. — Новосибирск: Издательство СО РАН. 224 с.

МР 2.2.7.2129-06 (2007). Режимы труда и отдыха для работающих в холодное время на открытой территории или в неотапливаемых помещениях. Методические рекомендации. — М.: Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 22 с.

Новосибирск онлайн. Электронный ресурс.
URL: <https://ngs.ru/text/health/2021/03/11/69790991/> (дата обращения 26.06.2023)

РД 52.04.563–2013. (2013). Инструкция по подготовке и передаче штормовых сообщений наблюдательными подразделениями — СПб: Гидрометеоиздат. 53 с.

Ревич Б. А., Малеев В. В., Смирнова М. Д. (2019). Изменение климата и здоровье: оценки, индикаторы, прогнозы. — Москва: ИПП РАН. 196 с.

Риски строительной отрасли. Электронный ресурс. URL: <http://www.riskovik.com/journal/stat/n11/riski-stroj-otrasli> (дата обращения 12.09.2023)

Стерин А. М., Лавров А. С. (2022). Использование квантильной регрессии для оценки пространственных особенностей характеристик трендов приземной температуры на территории России // *Фундаментальная и прикладная климатология*. Т. 8. № 2. С. 238–257.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2022) – СПб: Научное издание. 676 с.

Хлебникова Е. И., Дацюк Т. А., Салль И. А. (2014). Воздействие изменений климата на строительство, наземный транспорт, топливно-энергетический комплекс // *Труды ГГО*. Вып. 574. С. 125–178.

Чередыко Н. Н. (2019). Показатели экстремальности температурного режима холодного периода на юге Западной Сибири // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: XXV Международный симпозиум. Тезисы докладов*. — Новосибирск. С. 134.

Шамин Д. В. (2011). Оценка и управление рисками ИП при освоении месторождений и строительстве газопроводов на этапе проектирования. Электронный ресурс. URL: <https://delovoyimir.biz/ocenka-i-upravlenie-riskami-ip-pri-osvoenii-mestorozhdeniy-i-stroitelstve-gazoprovodov-na-etape-proektirovaniya.html> (дата обращения 06.09.2023).

Шамин Д. В. (2014). Анализ и оценка рисков проекта «Южный поток» СС по территории Республики Сербия // *Стратегические решения и риск-менеджмент*. № 3 (84). С. 66–74.

Якунин И. Н. (2019). Исследование влияния высокой температуры окружающей среды на безопасность автотранспортного процесса // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. № 7. С. 138–145.

Якунин И. Н. (2020). Влияние высоких температур и солнечной радиации на аварийность на автомобильном транспорте в летнее время // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. Т. 17, № 6 (76). С. 704–713.

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ МОЛНИЕВОЙ АКТИВНОСТЬЮ ГРОЗОВОГО ОБЛАКА И ОБРАЗОВАНИЕМ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ГРАДА И КРУПЫ

*Н. Е. Веремей, М. Л. Торопова, А. Б. Куров,
Ю. А. Довгалоук, Ю. П. Михайловский, А. А. Синькевич*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Voeikov Main Geophysical Observatory
St. Petersburg, Karbysheva st., 7

E-mail: veremey@gmail.com, marina-toropova@mail.ru,
sinkevich51@mail.ru

Поступила в редакцию 22.06.2024
Поступила после доработки 28.08.2024

Введение

Грозы и град являются опасными явлениями погоды, наносящими значительный ущерб людям, их имуществу и хозяйственным объектам. Существуют предположения, что они способствуют возникновению и других опасных явлений, связанных с конвективными облаками (смерчи, порывы и др.) (Попов и др., 2020; Синькевич и др., 2020a; Qie Xiushu et al., 2014, 2015). В связи с этим исследование указанных явлений не только сохраняет актуальность, но и становится особенно востребованным в условиях изменений климата (Горбатенко и др., 2020; Синькевич и др., 2020b; Sin'kevich et al., 2021).

На сегодняшний день остаются недостаточно изученными механизмы формирования электрической и микрофизической структуры конвективного облака на разных стадиях его эволюции

(Ашабоков и др., 2013; Михайловский и др., 2021; Синькевич и др., 2019, 2021; Futyan, Del Genio, 2007; Norville et al., 1991; Stolzenburg, Marshall, 2008). Большинство исследователей в России и за рубежом полагают, что основную роль в формировании электрической структуры конвективных облаков играют крупы и град (Попов и др., 2020; Пустовалов, Нагорский, 2016; Синькевич и др., 2020а; Qie Xiushu et al., 2015; Takahashi, 1984). Использование современных радиолокаторов с двойной поляризацией позволяет повысить определенность наших представлений о микрофизической структуре грозовых облаков и ее трансформации во времени и пространстве (Синькевич и др., 2020а, 2020б; Степаненко, Гальперин, 1983; Dolan et al., 2013; Pessi, Businger, 2009).

В (Fehr et al., 2005) получена тесная корреляционная связь между массой частиц крупы и града и частотой молний. Эта связь наблюдалась при анализе частоты молний в мультячейковых и суперячейковых кучево-дождевых облаках. Исследовалась также зависимость электрических параметров облаков от концентрации и размеров ледяных частиц, а также характеристик кристаллических осадков (MacGorman, Rust, 1998; Pessi, Businger, 2009; Petersen, Rutledge, 2001).

Эксперименты показали, что частота молний связана с осадками в виде ледяной фракции (Deierling, Petersen, 2008; Gungle, Krider, 2006; MacGorman, Rust, 1998; Pessi, Businger, 2009; Petersen et al., 2005). В большинстве случаев осадки предшествуют разрядам молний (Синькевич и др., 2020в). Во всех работах указывается, что получаемые закономерности существенно зависят от района и сезона, когда проводились исследования.

Мощным инструментом изучения процессов в конвективных облаках является численное моделирование (Ашабоков и др., 2013; Веремей и др., 2006, 2016; Довгалюк и др., 2020; Синькевич и др., 2017; Шаповалов, 2018; Altaratz et al., 2005; Varthe et al., 2005). Трехмерные нестационарные численные модели, учитывающие полный набор микрофизических процессов в трехфазном облаке, позволяют моделировать формирование микрофизической

и электрической структур облака в целом и исследовать вопросы микроэлектризации и осадкообразования (Веремей и др., 2006, 2016; Rawling, 1982; Scavuzzo et al., 1998; Ziegler et al., 1991).

Метод трехмерного численного моделирования применен нами для анализа случая 9 июня 2020 г., когда в Санкт-Петербурге и Ленинградской области развивались грозо-градовые конвективные облака. Днем наблюдалось интенсивное развитие Сб, сопровождающееся ливнями, грозами, градом и шквалом. Диаметр выпадающих градин достигал 5 см. Столь сильный и крупный град нехарактерен для данного региона.

Статья посвящена моделированию образования и развития конвективных облаков и связанных с ними опасных явлений погоды на примере указанного случая. При этом особое внимание уделялось процессам электризации, а также взаимосвязи между распределением ледяных частиц осадков и молниевой активностью.

Данные натуральных наблюдений и измерений

Атмосферная ситуация 9 июня 2020 г. характеризовалась прохождением локальных ложбин давления в условиях конвективно-неустойчивой стратификации атмосферы. В качестве входных данных для дальнейшего численного моделирования использовались вертикальные профили температуры и влажности, полученные из результатов радиозондирования по станции Воейково (26075) за 9 июня 2020 г. (12 ч ВСВ). При рассмотрении указанных данных была изменена точка росы у подстилающей поверхности: вместо значения, полученного из результатов радиозондирования (15,8 °С), использовалось максимальное значение, наблюдавшееся в течение дня (17,2 °С).

Анализ профилей температуры и влажности показал, что в атмосфере достаточно велик дефицит точки росы (суммарное значение дефицита на уровнях 850, 700 и 500 ГПа составляет 34 °С), что должно ослаблять конвекцию. Однако значительный слой атмосферы обладает конвективной неустойчивостью благодаря

резкому падению температуры с высотой. Уровень конденсации располагается на высоте 1,5 км, изотерма 0 °С — 3,5 км. О существовании неустойчивости, при которой возможно возникновение сильных гроз и ливней, свидетельствуют следующие оценки конвективной устойчивости атмосферы, основанные на методе всплывающей частицы: энергия неустойчивости (CAPE) в слое 0–3 км — 140 Дж/кг, индекс Шуолтера — -0,4, индекс Томпсона — 31, индекс Total Totals — 50,0 и др. Общее значение CAPE составляет 2926 Дж/кг, что указывает на сильную неустойчивость и возможность развития очень сильных гроз, шквалов, выпадение града. Об этом же свидетельствуют и значения показателей Lifted index (-6,8), а также расположение уровня свободной конвекции (842 гПа). Таким образом, атмосфера, несмотря на относительно небольшое содержание водяного пара, конвективно неустойчива; возможны грозы, град, шквалы.

По результатам измерений доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С, находящегося в пос. Воейково, 9 июня в Санкт-Петербурге и Ленинградской области наблюдалось активное развитие облачности, сопровождавшееся выпадением ливневых осадков, града и появлением признаков грозовой активности, что подтверждается данными грозопеленгационных систем (ГПС), а также многочисленными наблюдениями очевидцев.

Формирование одной из грозо-градовых ячеек в рассматриваемый день началось к востоку от Гатчины (к югу от Санкт-Петербурга). Далее она смещалась в северо-восточном направлении, что привело в 14:40 ВСВ к ее слиянию с соседними ячейками.

Измерения с использованием доплеровского радиолокатора ДМРЛ-С позволяют наряду с отражаемостью фиксировать и другие параметры, с помощью которых может быть выполнена оценка наличия в облаке различных видов гидрометеоров, в частности крупы и града. Анализ поляризационных характеристик, полученных в результате радиолокационных наблюдений, указывает на наличие внутри ячейки большой по объему зоны с крупой.

Наличие молниевых разрядов определялось по данным грозопеленгационной системы Blitzortung, которая регистрирует электромагнитные импульсы (атмосферерики), возникающие при разрядах, с помощью распределенной сети грозопеленгаторов, что позволяет ей рассчитывать координаты отдельных разрядов. Было показано, что началу молниевой активности предшествует появление в облаке значительных объемов, содержащих ледяные частицы осадков. Наличие таких частиц в облаке является необходимым условием интенсивной упорядоченной электризации. Эта закономерность подтверждается многочисленными экспериментальными исследованиями, выполненными авторами (Михайловский и др., 2021; Попов и др., 2020; Синькевич и др., 2019, 2020 а, б, в, 2021; Sin'kevich et al., 2021). При слиянии ячеек наблюдалось увеличение объема зоны с градом, рост частоты молниевых разрядов и других параметров.

Результаты численного моделирования

Для расчетов использовалась численная нестационарная трехмерная модель конвективного облака, разработанная в ГГО при участии ЦАО (Веремей и др., 2016).

В качестве начальных условий при расчетах использовались данные радиозондирования по станции Воейково (26075) за 9 июня 2020 г. (12 ч ВСВ). Шаги по горизонтальным координатам были выбраны равными 200 м, по вертикальной координате — 100 м, по времени — 0,1 с.

Основные результаты расчетов представлены в таблице 1. В нее включены значения абсолютных максимумов основных характеристик облака и выпадающих из него осадков, высота и время их достижения, а также время, когда значение той или иной характеристики становится отличным от нуля. Из таблицы видно, что все характеристики (высота верхней границы, водность, ледность и др.) соответствуют хорошо развитому грозо-градовому облаку.

Таблица 1

Характеристики облака и осадков по данным численного моделирования

Характеристика	Максимум по пространству и времени	Высота максимума, км	Время максимума, мин	Время достижения ненулевого значения, мин
Высота верхней границы, км	12,8	—	57,8	19,5
Скорость вертикального потока, м/с	28,1	9,8	58,9	0,0
Водность облачных капель, г/м ³	2,3	3,1	50,4	19,4
Водность дождевых капель, г/м ³	6,7	0,3	47,4	29,6
Ледность облачных ледяных кристаллов, г/м ³	1,3	7,3	45,4	39,5
Ледность градин, г/м ³	6,9	3,4	50,6	39,5
Интенсивность дождя у подстилающей поверхности, мм/ч	183	—	47,6	43,4
Интенсивность града у подстилающей поверхности, мм/ч	11	—	49,3	46,0
Суммарная интенсивность осадков, мм/ч	185	—	47,6	43,4
Радиолокационная отражаемость, дБZ	57,5	3,4	50,6	30,4

Рассматриваемая в качестве примера по данным натуральных наблюдений грозо-градовая ячейка имеет более высокую верхнюю границу (15,5 км по сравнению с 12,8 км по данным моделирования)

и большую максимальную интенсивность осадков. Видимо, значение высоты верхней границы по радиолокационным измерениям является завышенным, что обусловлено влиянием боковых лепестков диаграммы направленности антенны. Этот вывод подтверждается также анализом данных радиозондирования, который показал, что уровень конвекции совпадает с нижней границей тропопаузы и составляет для данного дня 11,3 км. Максимальная радиолокационная отражаемость по данным моделирования оказалась меньше, чем по данным наблюдений (57,5 и 61,5 дБZ соответственно).

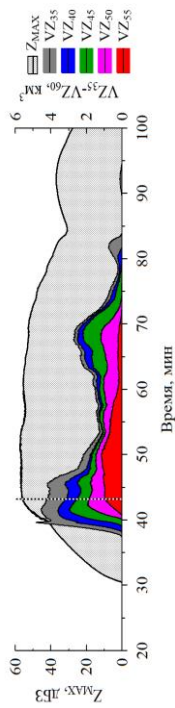
Интенсивное образование осадков (особенно градин) обусловило упорядоченную электризацию облака и разделение зарядов. Первый молниевый разряд произошел в момент $t = 43,2$ мин. Таким образом, начало разрядов по данным моделирования предшествует достижению максимума интенсивности жидких (47,6 мин) и твердых (49,3 мин) осадков, а также вертикальной скорости в облаке (58,9 мин). В работе (Sun et al., 2020), посвященной исследованию при помощи трехмерной модели конвективного облака (IAP-CSM3D) влияния напряженности электрического поля и процессов электризации на характеристики грозовых облаков, получен обратный результат: достижение максимумов вертикальной скорости и осадков предшествует началу разрядов. Такое различие, помимо других факторов, может быть вызвано различиями учитываемых физических процессов: так, в указанной модели используется стохастическая параметризация молниевых разрядов.

На рисунке 1 приведен временной ход максимального по пространственным координатам значения вертикальной составляющей напряженности электрического поля (E_z). Дополнительно на графике приведены интенсивности двух наиболее мощных механизмов электризации, т. е. изменения объемной плотности электрического заряда (τ):

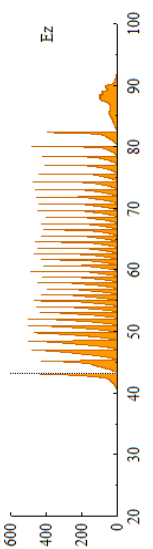
1) поляризационный механизм — разделение зарядов при упругих столкновениях облачных капель с дождевыми каплями и тающими градинами соответственно (во внешнем электрическом поле);

2) электризация при столкновениях и последующем отскоке градин с облачными ледяными кристаллами.

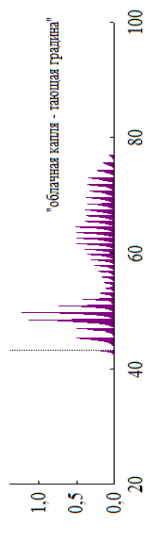
а)



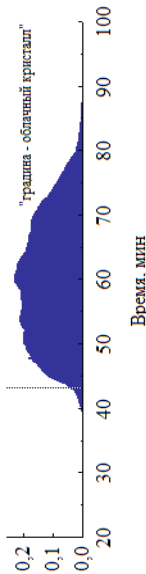
б)



в)



г)



д)

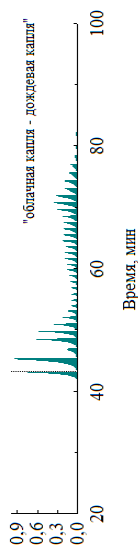


Рис. 1. Временной ход максимального по координатам:

а) — значения радиолокационной отражаемости и объема переохлажденной части облака ($VZ_{35} - VZ_{55}$, km^3) с отражаемостью, превышающей $35, 40, 45, 50, 55$ дБZ;

б) — значения вертикальной составляющей напряженности электрического поля (E_z , kV/m), интенсивности электризации: при упругих соударениях «облачная капля – дождевая капля» (в), «облачная капля – тающая градина» (г), при столкновениях «градина – облачный кристалл» ($\text{нКл/м}^2/\text{с}$) (д). Вертикальной линией обозначено начало разрядов (43,2 мин)

Из рисунка видно, что максимальная интенсивность второго процесса изменяется плавно, так как она не зависит от E_z (данный механизм не является индукционным). Она зависит только от наличия в облаке ледяных частиц. Напротив, интенсивность поляризационного механизма сильно зависит от E_z и связана с ней положительной обратной связью (максимумы интенсивности близки к максимумам E_z , которые соответствуют молниевым разрядам). Действие всех указанных механизмов начинается близко к моменту возникновения в облаке крупных ледяных частиц, которые, в том числе, во многом ответственны и за появление дождевых капель. Однако поляризационный механизм срабатывает с некоторым запозданием (около 3 мин), так как для образования дождевых капель и тающих градин требуется некоторое время, необходимое для выпадения градин в область положительных температур.

Электрическая структура облака, полученная по данным численного моделирования в выделенные моменты времени, показана на рисунке 2: начало электрических разрядов (рис. 2а), максимальное значение интенсивности осадков у подстилающей поверхности (жидких и твердых — рис. 2б) и максимальное значение частоты молниевых разрядов (рис. 2в). Рисунки 2 а, б иллюстрируют моменты времени, находящиеся в непосредственной близости к электрическому разряду, в то время как на рисунке 2в отражена стадия накопления заряда. На стадии максимального развития в облаке присутствуют 5 слоев заряда, чередующихся по знаку (рис. 2 а, б), при дальнейшем развитии облака количество слоев уменьшается. Отрицательный суммарный заряд оказывается наибольшим по абсолютной величине. В процессе развития облака экстремумы суммарного заряда располагаются вблизи уровня 5,0 км, E_z — вблизи уровня 4,5 км. Самый большой вклад в электризацию в момент максимальных значений заряда (4805 с, что соответствует стадии диссипации) обеспечивает механизм «лед — лед» или, в терминах используемой модели, «градина – облачный кристалл» (рис. 1г). В этот период также наблюдается локальный максимум объема переохлажденной части облака с отражаемостью более 35 дБZ (рис. 1а).

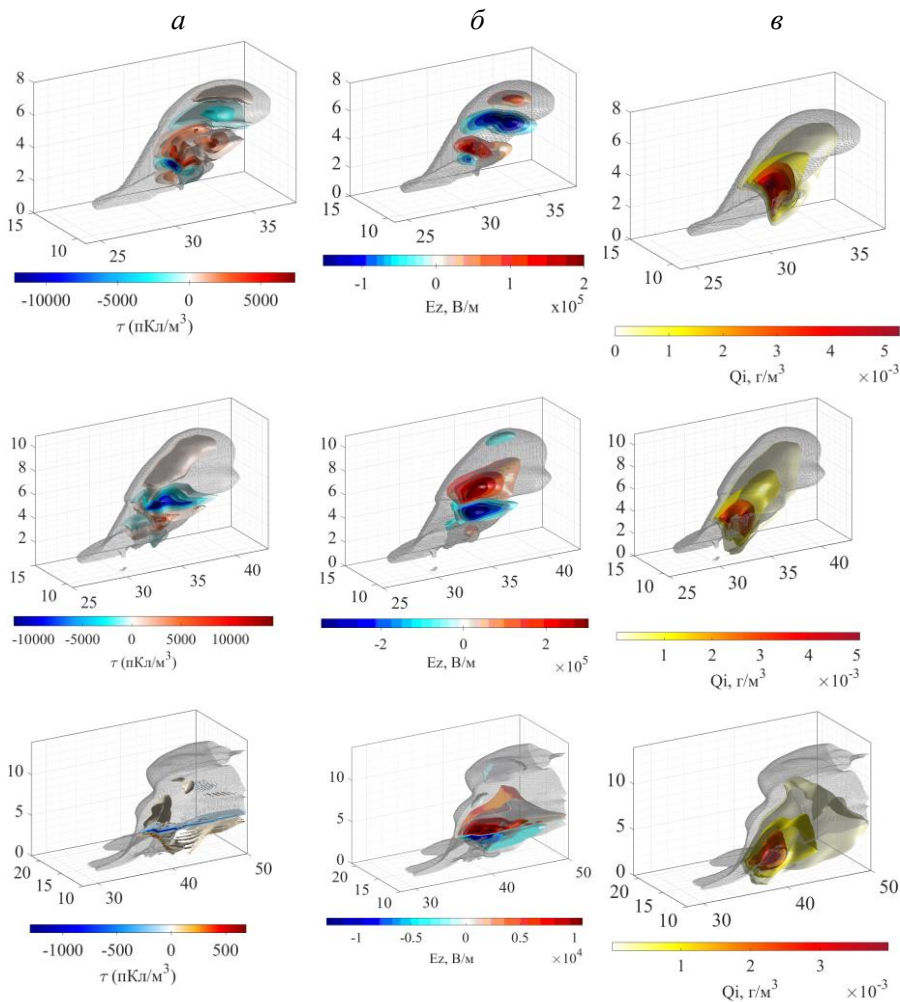


Рис. 2. Расположение областей электрического заряда τ (а), напряженности электрического поля E_z (б) и ледности градин Q_i (в) в облаке в различные моменты времени:

- начало электрических разрядов (45,0 мин) — верхний ряд;
- наибольшая интенсивность осадков у подстилающей поверхности (48,3 мин) — средний ряд;
- наибольшая частота электрических разрядов (60,0 мин) — нижний ряд

Из анализа данных о развитии облака видно, что электризация облака начинается после начала роста градин и завершается при уменьшении значений ледности до нуля.

Рассмотрено пространственное распределение E_z и ледности градин для выделенных моментов времени (рис. 2). E_z , как и суммарный заряд, имеет многослойную структуру. Ее экстремумы располагаются между слоями заряда, при этом наибольшие значения E_z располагаются вблизи основного облачного диполя. Градины охватывают значительную часть облака, включая область основного облачного диполя и самых больших значений напряженности поля. Эти результаты согласуются с полученными в работе (Zhang et al., 2016), где по результатам трехмерного моделирования показано хорошее соответствие областей наибольших абсолютных значений массовых концентраций крупы и напряженности электрического поля.

Полученное пространственное распределение объемного заряда и напряженности электрического поля отвечает современным представлениям об электрической структуре облака, сформировавшимся на основании данных наблюдений и других исследовательских работ. Так, в работе (Zhang et al., 2016) напряженность электрического поля имеет три основных экстремума (положительный, отрицательный и положительный), наибольшие абсолютные значения E_z также имеют отрицательный знак. При дальнейшем развитии облака экстремумы размываются, их количество сокращается до двух, а пространственная локализация смещается в нижнюю часть облака — эти закономерности прослеживаются и в полученных авторами настоящей статьи результатах (рис. 2). В работе (Zheng et al., 2021) приведены полученные по результатам моделирования электрические структуры облаков для двух обобщенных случаев гроз: в горной местности и на равнинах. В первом случае получен облачный диполь, а во втором — триполь с достаточно сложно расположенными изолиниями значений объемного заряда. Схожая трехполюсная структура

облачного заряда получена и в работе (Brothers et al., 2018), где по значениям электрического потенциала достаточно легко выделяются области основных центров заряда для рассмотренных многоячейкового

и суперячейкового облака, в то время как сами значения заряда организованы достаточно сложным образом. В работе (Mansell et al., 2005) воспроизведена многослойная зарядовая структура облака с более слабыми по абсолютному значению верхним отрицательным и нижним положительным зарядом. Показаны области распространения крупы, достаточно точно совпадающие с областями расположения основного заряда в облаке.

Пространственное распределение ледяных частиц в облаке (рис. 2) оказалось качественно сопоставимым с данными радиолокационных наблюдений, выполнявшихся в указанный день.

Заключение

Работа посвящена исследованию особенностей электрической структуры конвективного грозового облака. Анализируется развитие грозо-градового процесса на Северо-Западе России.

Выполнено трехмерное численное моделирование эволюции конвективного облака для вертикальных профилей температуры и влажности, наблюдавшихся в указанный день. В результате расчетов промоделировано развитие грозо-градового облака. Максимальное значение высоты его верхней границы составило 12,8 км, радиолокационной отражаемости — 57,5 дБZ, интенсивности дождя и града у подстилающей поверхности — 182,7 и 10,7 мм/ч соответственно. В облаке формируются молниевые разряды. Начало этих разрядов предшествует достижению максимумов вертикальной скорости и интенсивности осадков.

Распределение зарядов в облаке показывает многослойную структуру на стадии максимального развития — во время начала электрических зарядов и наибольшей интенсивности осадков.

При дальнейшем развитии облака количество слоев заряда уменьшается. Области экстремумов напряженности электрического поля расположены между слоями заряда. Наибольшие значения напряженности поля находятся вблизи основного заряда в облаке, как и повышенные концентрации градин.

Работа выполнена с использованием вычислительных ресурсов ГВЦ Росгидромета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ашабоков Б. А., Шаповалов А. В., Кулиев Д. Д., Продан К. А., Шаповалов В. А. (2013). Численное моделирование термодинамических, микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков на стадии роста и максимального развития // Известия вузов. Радиофизика. Т. 56, № 11–12. С. 900–907.

Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Морозов В. Н. (2006). О параметризации микрофизических процессов в численных моделях грозовых облаков // Метеорология и гидрология. № 11. С. 5–18.

Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Затевахин М. А., Игнатьев А. А., Морозов В. Н., Пастушков Р. С. (2016). Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака // Труды ГГО. Вып. 582. С. 45–91.

Горбатенко В. П., Кужевская И. В., Пустовалов К. Н., Чурсин В. В., Константинова Д. А. (2020). Оценка изменчивости конвективного потенциала атмосферы в условиях изменяющегося климата Западной Сибири // Метеорология и гидрология. № 5. С. 108–117.

Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А., Михайловский Ю. П., Матросов С. Ю., Попов В. Б. (2020). Численное моделирование эволюции и электрической структуры кучево-дождевого облака на северо-западе России // Метеорология и гидрология. № 4. С. 33–41.

Михайловский Ю. П., Торопова М. Л., Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Синькевич А. А., Янг Дж., Лу Дж. (2021). Динамика электрической структуры кучево-дождевых облаков // Известия вузов. Радиофизика. Т. 64, № 5. С. 341–353.

Попов В. Б., Синькевич А. А., Янг Дж., Михайловский Ю. П., Торопова М. Л., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Старых Д. С. (2020). Характеристики и структура кучево-дождевого облака с водяным смерчем над Финским заливом // Метеорология и гидрология. № 9. С. 5–16.

Пустовалов К. Н., Нагорский П. М. (2016). Основные типы вариаций электрического поля при прохождении кучево-дождевых облаков различного генезиса // *Оптика атмосферы и океана*. Т. 29, № 8. С. 647–653.

Синькевич А. А., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Куров А. Б., Михайловский Ю. П., Боданов Е. В., Торопова М. Л., Игнатьев А. А., Аджиев А. Х., Малкарова А. М., Абшаев А. М., Гопалакришнан В., Муругавел П., Павар С. Д. (2017). Исследования развития грозо-градового облака. Ч. 3. Численное моделирование эволюции облака // *Метеорология и гидрология*. № 8. С. 18–28.

Синькевич А. А., Михайловский Ю. П., Матросов С. Ю., Попов В. Б., Снегуров В. С., Снегуров А. В., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е. (2019). Связь структуры конвективных облаков с частотой молний по результатам радиофизических измерений // *Метеорология и гидрология*. № 6. С. 37–51.

Синькевич А. А., Михайловский Ю. П., Торопова М. Л., Попов В. Б., Старых Д. С., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е. (2020а). Строение грозового облака со смерчем и зависимость частоты молний от его характеристик // *Оптика атмосферы и океана*. Т. 33, № 9. С. 705–709.

Синькевич А. А., Попов В. Б., Абшаев А. М., Боу Б. А., Павар С. Д., Михайловский Ю. П., Торопова М. Л., Гопалакришнан В., Геккиева Ж. М. (2020б). Радиолокационные характеристики конвективных облаков разных регионов при переходе в грозовую стадию // *Оптика атмосферы и океана*. Т. 33, № 12. С. 932–936.

Синькевич А. А., Попов В. Б., Михайловский Ю. П., Торопова М. Л., Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Старых Д. С. (2020в). Характеристики кучево-дождевого облака с водяным смерчем над Ладожским озером по данным дистанционных измерений // *Оптика атмосферы и океана*. Т. 33, № 2. С. 153–158.

Синькевич А. А., Торопова М. Л., Михайловский Ю. П., Попов В. Б., Павар С., Гопалакришнан В. (2021). Особенности взаимосвязей электрических и радиолокационных параметров грозовых облаков в Индии (натурные исследования) // *Метеорология и гидрология*. № 6. С. 99–106.

Степаненко В. Д., Гальперин С. М. (1983). Радиотехнические методы исследования гроз. — Л.: Гидрометеиздат. 204 с.

Шаповалов В. А. (2018). Численное моделирование электрических процессов в грозовых облаках // *Труды ГГО*. Вып. 588. С. 28–36.

Altartaz O., Reisin T., Levin Z. (2005). Simulation of the electrification of winter thundercloud using the three-dimensional Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) model: Single cloud simulations // *J. Geophys. Res.* V. 110, D20. D20205. DOI: 10.1029/2004 JD005616.

Barthe C., Molinie G., Pinty J. P. (2005). Description and first results of an explicit electrical scheme in a 3D cloud resolving model // *Atmospheric Research*. V. 76 (1–4). P. 95–113.

Brothers M. D., Bruning E. C., Mansell E. R. (2018). Investigating the Relative Contributions of Charge Deposition and Turbulence in Organizing Charge within a Thunderstorm // *Journal of the Atmospheric Sciences*. V. 75 (9). P. 3265–3284. URL: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-18-0007.1>.

Deierling W., Petersen W. A. (2008). Total Lightning Activity as an Indicator of Updraft Characteristics // *J. Geophys. Res. Atmos.* D16210. DOI: 10.1029/2007JD009598.

Dolan B., Rutledge S. A., Lim S., Chandrasekar V., Thurai M. (2013). A Robust C-Band Hydrometeor Identification Algorithm and Application to a Long-Term Polarimetric Radar Dataset // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. V. 52, Is. 9. P. 2162–2186.

Fehr T., Dotzek N., Höller H. (2005). Comparison of Lightning Activity and Radar-Retrieved Microphysical Properties in EULINOX Storms // *Atmos. Res.* V. 76. P. 167–189. DOI: 10.1016/j.atmosres.2004.11.027.

Futyan J. M., Del Genio A. D. (2007). Relationships between lightning and properties of convective cloud clusters // *Geophysical Research Letters*. V. 34, Is. 15. L15705. P. 1–5.

Gungle B., Krider E. P. (2006). Cloud-to-Ground Lightning and Surface Rainfall in Warm-Season Florida Thunderstorms // *J. Geophys. Res. Atmos.* D19203 111. DOI: 10.1029/2005JD006802.

MacGorman D. R., Rust W. D. (1998). *The Electrical Nature of Storms*. — Oxford University Press: New York, NY, USA.

Mansell E. R., McGorman D. R., Ziegler C. L., Straka J. M. (2005). Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multisell thunderstorm // *Journal of Geophysical Research*. V. 110. D 12101. DOI: 10.1029/2004 JD005287.

Norville K., Baker M., Latham J. (1991). A numerical study of thunderstorm electrification: Model development and case study // *Journal of Geophysical Research*. V. 96, № D4. P. 7463–7481.

Pessi A. T., Businger S. (2009). Relationships among lightning, precipitation and hydrometeor characteristics over the North Pacific Ocean // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* V. 48, № 4. P. 833–848. DOI: 10.1175/2008JAMC1817.1.

Petersen W. A., Christian H. J., Rutledge S. A. (2005). TRMM Observations of the Global Relationship between Ice Water Content and Lightning // *Geophys. Res. Lett.* V. 32. L14819. DOI: 10.1029/2005GL023236.

Petersen W. A., Rutledge S. A. (2001). Regional Variability in Tropical Convection: Observations from TRMM // *J. Clim.* V. 14. P. 3566–3586. DOI: 10.1175/1520-0442(2001)014<3566:RVITCO>2.0.CO;2.

Qie Xiushu, Dongxia Liu, Zhuling Sun (2014). Recent advances in research of lightning meteorology // *Journal of Meteorological Research*. V. 28, № 5. P. 983–1002. DOI: 10.1007/s13351-014-3295-0.

Qie Xiushu, Yijun Zhang, Tie Yuan (2015). A Review of Atmospheric Electricity Research in China // *Advances in Atmospheric Sciences*. V. 32, № 2. P. 169–191. DOI: 10.1007/s00376-014-0003-z.

Rawling F. (1982). A numerical study of thunderstorm electrification using a three dimensional model incorporating the ice phase // *Quar. J. Roy. Met. Soc.* V. 108, № 458. P. 779–800.

Scavuzzo C. M., Masuelli S., Garanti G. M., Williams E. R. (1998). A numerical study of thundercloud electrification by graupel-crystal collisions // *J. Geophys. Res.* V. 103, № D12. P. 13 963–13 973.

Sin'kevich A., Boe B., Pawar S., Yang J., Abshaev A., Dovgaluk Yu., Gekkieva J., Gopalakrishnan V., Kurov A., Mikhailovskii Yu., Toropova M., Veremei N. (2021). Investigation of Thundercloud Features in Different Regions // *Remote Sensing*. V. 13 (16). 3216. DOI: 10.3390/rs13163216.

Stolzenburg M., Marshall T. C. (2008). Charge Structure and Dynamics in Thunderstorms // *Space Science Reviews*. V. 137, Is. 1–4. P. 355–372. DOI: 10.1007/s11214-008-9338-z.

Sun J., Chai J., Leng L. (2020). Feedback of electric field force and electrification on kinematic, microphysics and precipitation in thunderstorm // *Theor Appl Climatol*. V. 140. P. 1373–1391. URL: <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03132-4>.

Takahashi T. (1984). Thunderstorm electrification — a numerical study // *J. Atm. Sci.* V. 41, № 17. P. 2542–2558.

Zhang Bo, Chen Bin, Shi Lihua, Chen Qiang (2016). Modeling of the Stepped Leader Initiation Process in an Altitude Triggered Lightning // *Mathematical Problems in Engineering*. V. 2016.. ID 9201253. 10 p. URL: <https://doi.org/10.1155/2016/9201253>.

Zheng T., Tan Y., Wang Y. (2021). Numerical Simulation to Evaluate the Effects of Upward Lightning Discharges on Thunderstorm Electrical Parameters // *Adv. Atmos. Sci.* V. 38. P. 446–459. URL: <https://doi.org/10.1007/s00376-020-0154-z>.

Ziegler C. L., McGorman D. R., Dye J. E., Ray R. S. (1991). A model evaluation of noninductive graupel-ice charging in the early electrification of a mountain thunderstorm // *J. Geophys. Res.* V. 96, № D7. P. 12 833–12 855.

ОЦЕНКА МОЩНОСТИ ГЛОБАЛЬНЫХ И ЛОКАЛЬНЫХ ТОКОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПО ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ

Д. В. Тимошенко, Г. В. Куповых

Южный федеральный университет
344006 Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42

South Federal University
Rostov-on-Don, st. Bolshaya Sadovaya, 105/42

E-mail: kupovykh@sfnedu.ru

Поступила в редакцию 15.07.2024
Поступила после доработки 29.08.2024

Введение

Явление суточной вариации напряженности электрического поля в приземном слое, хорошо известное в физике атмосферы, преимущественно обусловлено глобальной унитарной вариацией потенциала ионосферы, которая, в свою очередь, вызвана переменным характером мощности глобального грозового генератора (Mauchly, 1926; Harrison, 2013; Морозов, Куповых, 2017). Однако наряду с глобальными факторами в формировании структуры поля значительное участие могут принимать и так называемые локальные генераторы, связанные с процессами турбулентного и конвективного переносов в приземном слое атмосферы. Их отдельное или совместное действия могут вносить существенный вклад в суточный ход напряженности поля. Результаты соответствующих исследований авторов приведены в работах (Аджиев и др., 2021; Куповых и др., 2023).

Для приземного слоя теория электродного эффекта изложена в работе (Куповых и др., 1998), а его электрическая структура для случаев конвективно-турбулентного и конвективно-неустойчивого

состояния описана в работе (Белоусова и др., 2024). В каждом из перечисленных источников получены результаты, отражающие влияние локальных токовых генераторов, действующих в приземном слое, на напряженность электрического поля.

Целью настоящей работы является оценка мощности токовых генераторов глобального и локального происхождения на основе электродинамических параметров приземного слоя атмосферы.

Модель структуры электрического поля приземного слоя

В качестве модели воспользуемся уравнением полного тока, описывающим результат совокупного действия локальных и глобального генераторов электрического поля (Аджиев и др., 2021; Куповых и др., 2023).

Для исследования действия токовых генераторов различного типа используем параметр S , характеризующий плотность мощности источника тока (Reiter, 1992):

$$S = j \cdot E. \quad (1)$$

Здесь j — плотность электрического тока; E — напряженность электрического поля, которая может быть определена из уравнения полного тока (Аджиев и др., 2021; Куповых и др., 2023).

Уравнение, описывающее суточный ход напряженности электрического поля в условиях совместного действия конвективного и турбулентного токовых генераторов в приземном слое, имеет вид (Куповых и др., 2023):

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} - \varepsilon_0 D(t; z) \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \varepsilon_0 v(z) \frac{dE}{dz} + \lambda(z) E = j(t), \quad (2)$$

где D — коэффициент турбулентной диффузии; v — скорость вертикального конвективного переноса; λ — электрическая проводимость атмосферы; j — плотность полного электрического тока; z_0 — шероховатость земной поверхности; L — характерный масштаб электродного слоя; ε_0 — электрическая постоянная.

Уравнение (2) дополняется начальными и граничными условиями:

$$E|_{t=0} = E_0 e^{-\frac{z}{L}}, \quad E|_{z=z_0} = E_0, \quad \frac{\partial E}{\partial z}|_{z=L} = 0, \quad (3)$$

где E_0 — напряженность электрического поля у поверхности земли, $z_0 = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Математическая модель (2)–(3) представляет собой начально-краевую задачу для уравнения параболического типа. В общем случае дифференциальный оператор в левой части (2) не удовлетворяет условиям Штурма—Лиувилля, поэтому задача (2)–(3) при наличии турбулентного и конвективного генераторов нерешаема классическими аналитическими методами, однако для ее решения подходит, например, метод Галеркина (Тихонов, Самарский, 1999).

Коэффициент турбулентного перемешивания, полученный в результате обобщения результатов градиентных наблюдений в нескольких пунктах, имеет вид (Куповых и др., 2023):

$$D(t) = D_0 \left(1 + \alpha \sin \left(\frac{\pi}{12} (t - 3) + \varphi \right) \right), \quad (4)$$

где D_0 — амплитудное значение коэффициента турбулентного перемешивания, $\alpha = 0,2$ — безразмерный множитель.

Преобразование временного аргумента в соотношении (4) соответствует синхронизации с ВСВ (по Гринвичу) и нормировке с учетом суточного хода коэффициента турбулентного перемешивания.

Зависимость скорости конвективного переноса от высоты определяется выражением (Куповых и др., 2023; Белоусова и др., 2024):

$$v(z) = v_0 \frac{z}{L} \left(1 - \frac{z}{L} \right). \quad (5)$$

Далее, используя формулы (4) и (5) оценим мощности токовых генераторов глобального и локальных типов.

Оценка мощности глобального грозового генератора

Для оценки мощности глобального грозового генератора используем решения уравнения полного тока для электродного слоя, полученные ранее (Аджиев и др., 2021).

Если на верхней границе электродного слоя: $D_0 = 0$, $v_0 = 0$, а электрическая проводимость $\lambda = \text{const}$, то уравнение (2) принимает вид (Аджиев и др., 2021):

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \lambda E = j(t). \quad (6)$$

Суточные изменения мощности грозового генератора описываются правой частью уравнения (6), выражающей колебания полного тока в виде гармонической функции времени (Аджиев и др., 2021), соответствующей глобальную унитарную вариацию потенциала ионосферы:

$$j(t) = j_0(1 - \alpha \sin(\omega t)), \quad (7)$$

где $j_0 = 3 \cdot 10^{-12}$ А/м².

Функция, задаваемая соотношением (7), имеет минимум в 6 ч и максимум в 18 ч ВСВ с амплитудой ± 20 % от среднего при значении параметра $\alpha = 0,2$, что достаточно хорошо согласуется с унитарной вариацией электрического поля (Mauchly, 1926; Орленко, 1979; Harrison, 2013; Морозов и др., 2017).

В результате решения уравнения (6) при условии постоянства электрической проводимости воздуха по высоте, получено, что изменение напряженности электрического поля во времени на верхней границе электродного слоя полностью совпадает с вариацией электрического тока в приземном слое (Аджиев и др., 2021).

В приближении классического электродного эффекта, когда электрическая проводимость воздуха зависит от высоты: $\lambda(z) = \lambda_0 \exp(z/L)$, где L — толщина электродного слоя (Куповых и др.,

1998), получено решение уравнения (6) с правой частью (7), описывающее пространственно-временное распределение электрического поля (Аджиев и др., 2021):

$$E(z; t) = \frac{E_0}{e^{z/L}} \cdot (1 - 0,2 \sin(\omega t)), \quad E_0 = j_0 / \lambda_0. \quad (8)$$

В этом случае изменения электрического поля во времени совпадают с вариацией электрического тока, а значения E зависят от высоты из-за разных значений λ .

На основе полученных суточных вариаций полного тока (7) и напряженности электрического поля (8) можно получить суточные изменения мощности грозового генератора S по формуле (1). Для расчетов использовались значения напряженности электрического поля на верхней границе L электродного слоя E_∞ .

Изменения мощности глобального грозового генератора для значения напряженности электрического поля вблизи земной поверхности $E_0 = -100$ В/м приведены в таблице 1, из которой следует, что минимальные и максимальные значения мощности глобального грозового генератора по времени совпадают с соответствующими экстремумами глобальной унитарной вариации электрического поля, обусловленными изменениями потенциала ионосферы.

Таблица 1

Оценка мощности глобального грозового генератора

Параметр	Время, ч (BCB)				
	0	6	12	18	21
E_∞ , В/м	78	66	69	75	85
j , пА/м ²	0,5	2	4	5	6
S , пВт/м ³	31	132	276	375	510

Оценка мощности локальных токовых генераторов

При оценке мощности локальных токовых генераторов в качестве естественного допущения будем считать плотность полного тока в пределах электродного слоя величиной постоянной ($j = j_0$),

соответствующей некоторой средней мощности глобального грозового генератора. Тогда решение задачи (2)–(3) определяет суточный ход напряженности электрического поля под действием только локальных токовых генераторов.

Решение, описывающее пространственно-временное распределение напряженности электрического поля для данного случая, определяется соотношением (Куповых и др., 2023; Белоусова и др., 2024):

$$E(z; t) = \sum_{k=1}^{\infty} E_0 e^{\frac{-(k+3)\varepsilon_0 \left(\frac{D_0 + \nu_0}{L} \right) t}{L}} \sin \left(\frac{\pi}{12} (t-3) \right) \left(\frac{z}{z_0} \right)^{3k+2} + \frac{j_0}{\lambda}. \quad (9)$$

Вычисления плотностей конвективного и турбулентного токов, а также тока проводимости производились по формулам, следующим из уравнения (2):

$$j_T = \varepsilon_0 D(t) \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} \text{ — плотность турбулентного тока;}$$

$$j_{np} = \lambda E \text{ — плотность тока проводимости;}$$

$$j_\kappa = \varepsilon_0 \nu(z) \frac{dE}{dz} \text{ — плотность конвективного тока.}$$

В данном приближении плотность тока проводимости повторяет профиль электрического поля в электродном слое. Конвективный ток имеет максимум на высоте 3 м, турбулентный ток — на высоте 4 м. Вблизи подстилающей поверхности значения j_κ и j_T невелики, а на верхней границе электродного слоя они стремятся к нулю (рис. 1).

Далее можно рассчитать мощность токовых источников для трех состояний приземного слоя: конвективно-неустойчивого (S_1), турбулентного (S_2) и конвективно-турбулентного (S_3) на разных высотах в заданные моменты времени. Для всех случаев напряженность электрического поля E_0 вблизи земной поверхности примем равной – 200 В/м.

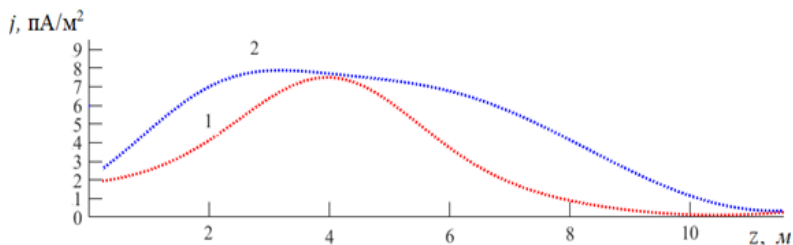


Рис. 1. Плотность турбулентного (1) и конвективного (2) тока внутри электродного слоя

Вначале рассмотрим конвективно-неустойчивое состояние приземного слоя. Для этого в уравнении (2) примем $D_0 = 0$, $v_0 = 0,01$ м/с, что означает отсутствие турбулентного тока и действие в приземном слое только конвективного переноса в соответствии с уравнением (5). Выражение для напряженности электрического поля представляет собой соотношение (Белюсова и др., 2024):

$$E_1(z;t) = \sum_{k=1}^{\infty} E_0 e^{\frac{-(k+3)\varepsilon_0 v_0}{L} t} \left(\frac{z}{z_0} \right)^{3k} + \frac{j_0}{\lambda}. \quad (10)$$

Мощность конвективного токового генератора S_I , рассчитанная по формуле аналогичной (1), на разных высотах и в различные моменты времени приведены в таблице 2.

Таблица 2

Изменение мощности токовых источников в течение суток на различных высотах в приземном слое

Параметр	Время, ч (BCB)														
	0			6			12			18			21		
$z, \text{ м}$	1	5	9	1	5	9	1	5	9	1	5	9	1	5	9
$S_I, \text{ пВт/м}^3$	34	59	0	121	183	0	249	312	0	279	403	0	327	503	0
$S_2, \text{ пВт/м}^3$	21	43	3	83	134	1	112	218	2	197	269	3	251	339	4
$S_3, \text{ пВт/м}^3$	63	125	12	234	345	7	397	587	9	525	741	11	637	929	15

Далее рассмотрим случай турбулентного состояния приземного слоя. В уравнении (2) примем $D_0 = 0,01 \text{ м/с}^2$, $v_0 = 0$, что соответствует наличию в приземном слое только турбулентного переноса в соответствии с (4) при отсутствии конвекции. Для данного случая задача (2)–(3) имеет решение (Белоусова и др., 2024):

$$E_2(z; t) = \sum_{k=1}^{\infty} E_0 e^{\frac{-(k+3)\varepsilon_0 D_0 t}{L^2}} \sin\left(\frac{\pi}{12}(t-3)\right) \left(\frac{z}{z_0}\right)^{3k} + \frac{j_0}{\lambda}. \quad (11)$$

Мощность S_2 за счет турбулентного тока с учетом (11), а также совместная мощность S_3 , турбулентного и конвективного генераторов S_3 в соответствии с формулой (9), приведены в таблице 2. Мощности локальных генераторов S_1 , S_2 , S_3 , возрастают по высоте от нижней границы электродного слоя, достигают максимальных значений примерно в его средней части, а затем убывают, достигая минимальных значений на верхней границе, что согласуется с поведением плотностей конвективного и турбулентного токов (рис. 1). Кроме того, параметры S_1 , S_2 , S_3 , изменяются в течение суток на каждой из фиксированных высот, что представляет самостоятельный интерес.

Таким образом, мощность локальных токовых генераторов вблизи поверхности земли значительна и сопоставима с вкладом глобального (грозового) генератора в динамику электрического поля приземного слоя. Последний начинает преобладать на верхней границе и вне электродного слоя.

Обсуждение результатов

Приведенная методика расчета плотности турбулентного и конвективного токов с использованием соответствующих слагаемых в уравнении полного тока (2) позволяет не только оценить мощность токовых генераторов различных типов, но и уточнить физические механизмы их действия.

Для этого рассмотрим совместно уравнения для плотности электрического заряда и уравнение Пуассона для напряженности электрического поля:

$$\rho = e(n_1 - n_2), \quad \frac{dE}{dz} = \frac{e}{\varepsilon_0}(n_1 - n_2). \quad (12)$$

Плотность заряда связана с напряженностью электрического поля соотношением:

$$\rho = \varepsilon_0 \frac{dE}{dz}. \quad (13)$$

Учитывая выражение для плотности конвективного тока j_k , получаем уравнение для плотности электрического заряда:

$$\rho_k(z) = \frac{j_k(z)}{v(z)}, \quad (14)$$

которое показывает, что конвективный токовый генератор создает в приземном слое электрический заряд, плотность которого обратно пропорциональна скорости конвективного переноса.

Рассматривая выражение для плотности турбулентного тока j_T , получим соотношение для плотности электрического заряда:

$$\frac{d\rho_T(z)}{dz} = \frac{j_T(z)}{D(t)}. \quad (15)$$

Выражение (15) определяет градиент (распределение) плотности электрического заряда с высотой за счет турбулентного переноса. Таким образом, токовый генератор в приземном слое, не являясь источником электрического заряда, оказывает влияние на его пространственное перераспределение.

На рисунке 2 приведены профили объемной плотности (ρ_k) электрического заряда, создаваемого конвективным генератором,

и градиента плотности заряда ($d\rho_T/dz$), возникающего за счет турбулентного переноса. Максимум ρ_K находится на высоте 6 м, а максимум $d\rho_T/dz$ — на высоте 4 м. Как и для плотности электрических токов вблизи поверхности земли и на верхней границе электродного слоя, значения рассматриваемых величин стремятся к нулю.

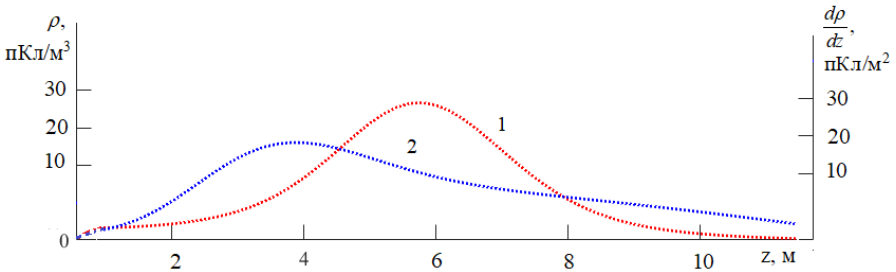


Рис. 2. Профили объемной плотности (1) и градиента электрического заряда (2) в электродном слое

Заключение

Предложенный теоретический подход к оценке мощности токовых генераторов на основе данных об электрических характеристиках атмосферного приземного слоя позволил выделить действия глобального (грозового) и локальных (конвективного и турбулентного) генераторов. Получены пространственно-временные закономерности и исследованы физические механизмы действия глобального и локальных токовых генераторов, их связь с электрическим полем, токами различного происхождения и объемным электрическим зарядом. Установлена связь изменения мощности грозового генератора на верхней границе электродного слоя с унитарной вариацией напряжённости электрического поля. Конвективный генератор создает дополнительный электрический заряд в приземном слое, тогда как турбулентный перенос, не являясь источником заряда, формирует его пространственную структуру. Влад локальных токовых генераторов в формировании динамики электрического состояния приземного слоя

сопоставим с глобальными факторами и должен учитываться при мониторинге электрического поля атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аджиев А. Х., Клово А. Г., Кудринская Т. В., Куповых Г. В., Тимошенко Д. В. (2021). Суточные вариации электрического поля в приземном слое атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 57, № 4. С. 452–461.

Белоусова О. В., Тимошенко Д. В., Куповых Г. В. (2024). Структура электрического поля в конвективно-турбулентном приземном слое атмосферы // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. № 2. С. 49–59.

Куповых Г. В., Морозов В. Н., Шварц Я. М. (1998). Теория электродного эффекта в атмосфере. — Таганрог: Изд-во ТРТУ. 123 с.

Куповых Г. В., Тимошенко Д. В., Клово А. Г., Кудринская Т. В. (2023). Влияние электродного эффекта на суточные вариации электрического поля атмосферы в приземном слое // Оптика атмосферы и океана. Т. 36. № 10. С. 834–838.

Морозов В. Н., Куповых Г. В. (2017). Математическое моделирование глобальной атмосферной электрической цепи и электричества приземного слоя. — СПб: Астерион. 307 с.

Орленко Л. П. (1979). Строение планетарного пограничного слоя атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат. 270 с.

Тихонов А. Н., Самарский А. А. (1999). Уравнения математической физики. 6-е изд. — М.: Наука. 736 с.

Harrison R. G. (2013). The Carnegie curve // *Surveys in Geophysics*. V. 34 (2). P. 209–232.

Mauchly S. J. (1926). Studies in atmosphere electricity based on observations made on the Carnegie (1915–1921) / *Researches of the Department of Terrestrial Magnetism*. Washington, Carnegie Institution. Publ. № 175. P. 385–424.

Reiter R. (1992). Phenomena in Atmospheric and Environmental Electricity. — Elsevier–Amsterdam–London–New York–Tokyo. 541 p.

МНОГОЛЕТНИЕ ТЕНДЕНЦИИ И СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

В. В. Занюков, Б. Г. Зайнетдинов, Л. Г. Соколенко

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7

Voeikov Main Geophysical Observatory
St. Petersburg, Karbysheva st., 7

e-mail: sokolenko_lg@mail.ru

Поступила в редакцию 05.03.2024
Поступила после доработки 23.08.2024

Введение

Электрическое состояние приземного слоя атмосферы, как одна из характеристик глобальной электрической цепи, может испытывать изменения под воздействием естественных процессов в атмосфере, а также при возникновении преднамеренных и непреднамеренных воздействий. Источником информации об электрическом состоянии атмосферы на территории Российской Федерации является атмосферно-электрическая сеть Росгидромета. В разные годы количество пунктов наблюдений на сети менялось от 4 до 12, причем основное сокращение произошло в период распада СССР, когда часть пунктов осталась за пределами границ Российской Федерации. В рамках развития и переоснащения сети в последнее десятилетие было организовано пять новых пунктов. В настоящий момент сеть насчитывает 9 постоянно действующих пунктов наблюдений, из которых 3 расположены в Арктической зоне (рис. 1). В период с 2017 по 2021 гг. параллельно с действующей сетью пунктов в Арктической зоне, совместно с ФГБУ «ААНИИ» были организованы пилотные измерения электрических характеристик атмосферы (ЭХА)

в пункте «Ледовая база Мыс Баранова» (архипелаг Северная Земля) (Соколенко, Зайнетдинов, 2021). В последнее десятилетие действующие и вновь организованные пункты были оснащены разработанными специалистами ФГБУ «ГТО» атмосферно-электрическими измерительными комплексами АЭИК, в состав которых входят измерители «Поле-2М» и «Электропроводность-2М» (Соколенко, Зайнетдинов, 2018). Наблюдения во всех пунктах выполняются по единым методикам в соответствии с требованиями РД 52.04.168-17 (2017).

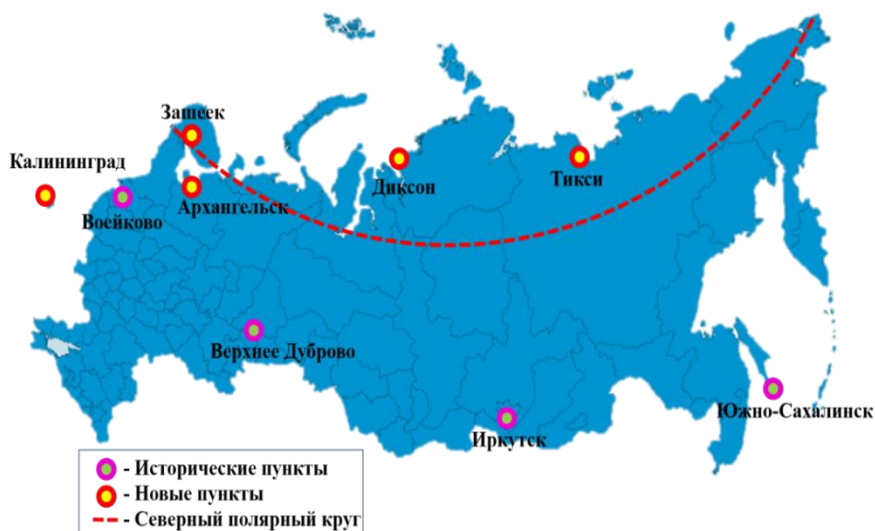


Рис. 1. Сеть пунктов наблюдения за ЭХА

Регулярные наблюдения на наземных станциях позволяют отслеживать глобальные и локальные пространственно-временные изменения ЭХА и давать оценку фактического электрического состояния приземного слоя атмосферы.

Результаты многолетних исследований

При анализе и обобщении данных наблюдений используются средние месячные и средние годовые значения измеряемых величин, по которым оцениваются их годовые вариации и многолетние тенденции. Несмотря на встречающиеся в рядах пропуски данных, связанные с ремонтом и профилактикой средств измерений, удалось получить ход электрических характеристик атмосферы более, чем за 60-летний период для станций Воейково, Иркутск и Верхнее Дуброво.

На основе многолетних рядов установлены закономерности изменения напряженности электрического поля E и суммарной электрической проводимости воздуха ($\sum\lambda=\lambda_+ + \lambda_-$) (Попов, Соколенко, 2013; Соколенко, Зайнетдинов, Занюков, 2024).

Наиболее четко связь электрического состояния приземного слоя атмосферы с неэлектрическими параметрами окружающей среды, в том числе с радиоактивным воздействием и концентрацией аэрозольных частиц, проявляется при обобщении рядов наблюдений за несколько десятилетий. На рисунке 2 показаны многолетние изменения средних годовых значений E и $\sum\lambda$ в Воейково (окрестности Санкт-Петербурга), Верхнее Дуброво (окрестности Екатеринбурга) и Иркутск (город), имеющих самые продолжительные ряды наблюдений.

Несмотря на то, что пункты наблюдений Воейково и Верхнее Дуброво расположены соответственно в 13 и 30 км от города, а Иркутск — непосредственно в городе, на них наблюдаются общие закономерности в изменениях E и $\sum\lambda$. Эти изменения не могут быть отнесены к методическим погрешностям, поскольку системы получения и обработки данных в каждом пункте являются независимыми. Следовательно, наблюдающийся однотипный отрицательный тренд E во всех пунктах является следствием глобальных вариаций E .

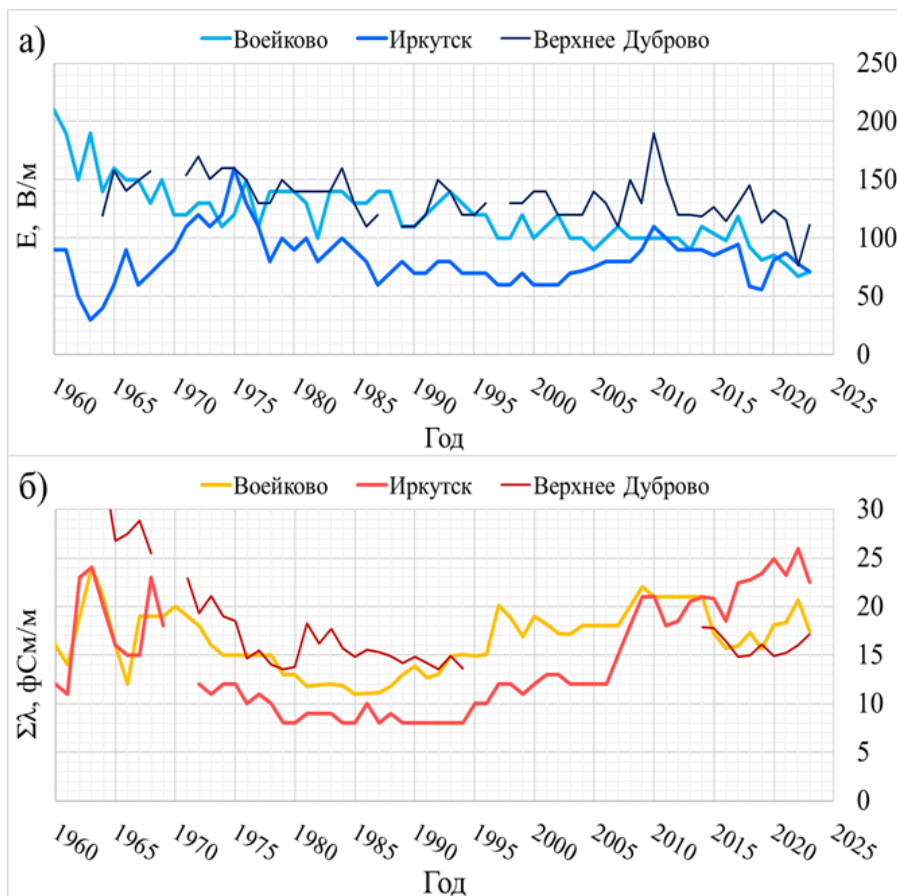


Рис. 2. Ход средних годовых значений напряженности электрического поля атмосферы (а) и суммарной удельной электрической проводимости воздуха (б) в Воейково, Иркутске и Верхнее Дуброво

Ход $\Sigma\lambda$, представленный на рис. 2б, отражает особенности периодов, характеризующихся различной степенью радиоактивного и аэрозольного воздействия.

В начале 1960-х годов во всех пунктах зафиксированы повышенные значения $\Sigma\lambda$, что объясняется проведением в те годы массовых ядерных испытаний, сопровождавшихся выбросами в атмосферу

радиоактивных веществ. Наиболее высокие значения $\sum\lambda$ в Верхнем Дуброво объясняются близостью пункта к зонам проведения испытаний. Далее, вплоть до 1985 г., происходит синхронное уменьшение $\sum\lambda$, связанное с бурным развитием промышленности и увеличением аэрозольного загрязнения атмосферы, которое затем сменяется ростом $\sum\lambda$ в годы сокращения промышленного производства.

Однотипный характер изменений $\sum\lambda$ в Воейково (В), Верхнем Дуброво (ВД) и Иркутске (И) (коэффициент корреляции $K_{ви} = 0,71$, $K_{ввд} = 0,44$ и $K_{вди} = 0,30$) может быть следствием глобальных вариаций $\sum\lambda$, обусловленных ростом антропогенного загрязнения в период промышленного развития, уменьшением антропогенного загрязнения атмосферы в результате сокращения производства в период «перестройки», а также применением в последние годы более экологически чистых технологий в различных отраслях хозяйственной деятельности и энергетике (Морозов и др., 2009).

Для подтверждения этой гипотезы отсутствуют независимые регулярные данные измерений концентрации аэрозоля, поэтому вопрос о причине столь значительного роста $\sum\lambda$ до конца не изучен. Подтверждением влияния аэрозольного загрязнения на ЭХА могут послужить проведенные в Воейково в пилотные измерения E , $\sum\lambda$ и концентрации аэрозольных частиц N (рис. 3). Суточный ход напряженности электрического поля атмосферы E качественно повторяет ход концентрации аэрозоля N , а электрическая проводимость воздуха $\sum\lambda$ имеет обратный ход. Этот результат согласуется с данными аналогичных наблюдений, выполненных в Тикси (Зайнетдинов и др., 2022).

В процессе ведения мониторинга в качестве одного из критериев изменения электрического состояния приземного слоя атмосферы принято рассматривать отклонение измеряемых параметров от хода фоновых значений, определенных в каждом пункте для условий «хорошей погоды».

По результатам многолетних исследований показано, что вместо классического годового хода $\sum\lambda$ с минимумом зимой и максимумом

летом, наблюдающимся в период с 1975 по 1994 год (Шварц, Соколенко, 2003), в 1995–2023 гг. появился неглубокий «провал» в летние месяцы (рис. 4).

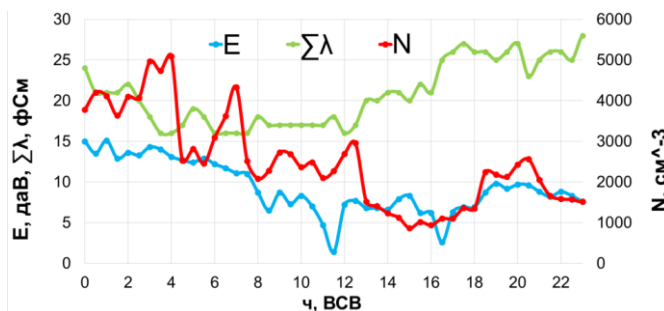


Рис. 3. Суточный ход E , $\Sigma\lambda$ (левая шкала) и N (правая шкала) в Воейково

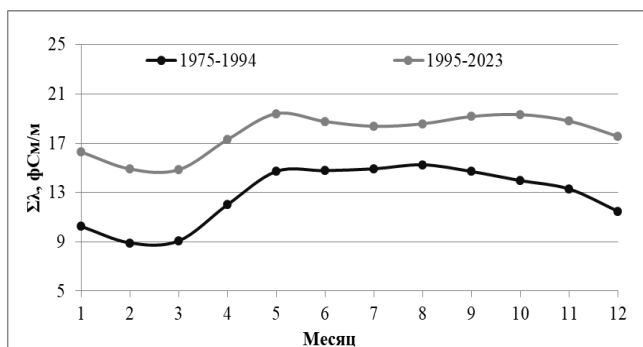


Рис. 4. Годовой ход $\Sigma\lambda$ в 1975–1994 и 1995–2023 гг.

Увеличение $\Sigma\lambda$ для в 1995–2023 гг. в сравнении с 1975–1994 гг. связано с общим уменьшением антропогенного загрязнения атмосферы в результате сокращения промышленного производства в период «перестройки». С конца 1990-х годов мощным источником аэрозолеобразующих газов стало резко возросшее количество автомобильного транспорта, интенсивность движения которого увеличивается летом.

Современные изменения параметров атмосферного электричества

Для анализа использовался архив банка данных специализированного центра данных «Атмосферное электричество» за 2015–2023 гг. Из получаемых средних часовых значений ЭХА рассчитывались их средние значения за месяц и год.

На рис. 5 и 6 показан средний за период 2015–2023 гг. годовой и ход средних месячных значений E и $\sum\lambda$ для всех станций атмосферно-электрической сети. За последние 10 лет тенденция к снижению E проявляется в Воейково, Архангельске, Диксоне и несколько слабее в Тикси и Верхнем Дуброво. На станциях Иркутск и Южно-Сахалинск E в рассматриваемый период — стабильна. Оценивать тенденции на станциях Калининград и Зашеек не имеет смысла из-за неоднородности их рядов.

Тенденция к увеличению $\sum\lambda$ в последнее десятилетие наблюдается только в Воейково и Иркутске. В Верхнем Дуброво, Южно-Сахалинске, Диксоне $\sum\lambda$ слабо уменьшается, а в Тикси практически не меняется.

Характерные вариации электрических характеристик атмосферы для пунктов со схожим географическим расположением

Пункты сети наблюдений за ЭХА по особенностям географического расположения и уровню антропогенной нагрузки можно условно разделить на 3 группы:

- городские (континентальные), расположенные в черте региональных центров с повышенной антропогенной нагрузкой: Калининград (до 2021 г.), Иркутск, Южно-Сахалинск;

- поселковые (континентальные), находящиеся в отдалении от крупных промышленных центров и расположенные преимущественно в поселковой зоне, где влияние антропогенного фактора значительно снижено: Воейково, Верхнее Дуброво, Зашеек, Архангельск, Калининград (после 2021 г.);

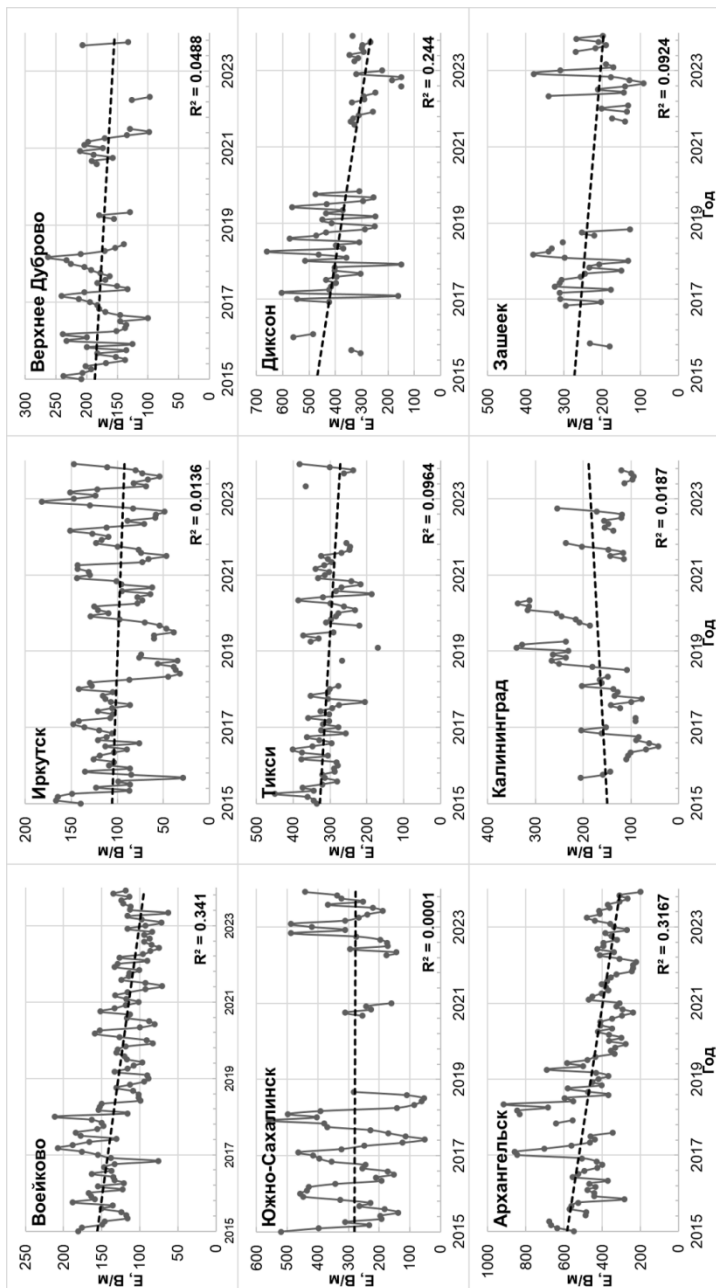


Рис. 5. Динамика средних месячных значений E в Воейково, Иркутске, Верхнем Дуброво, Южно-Сахалинске, Тикси, Диксоне и Калининграде

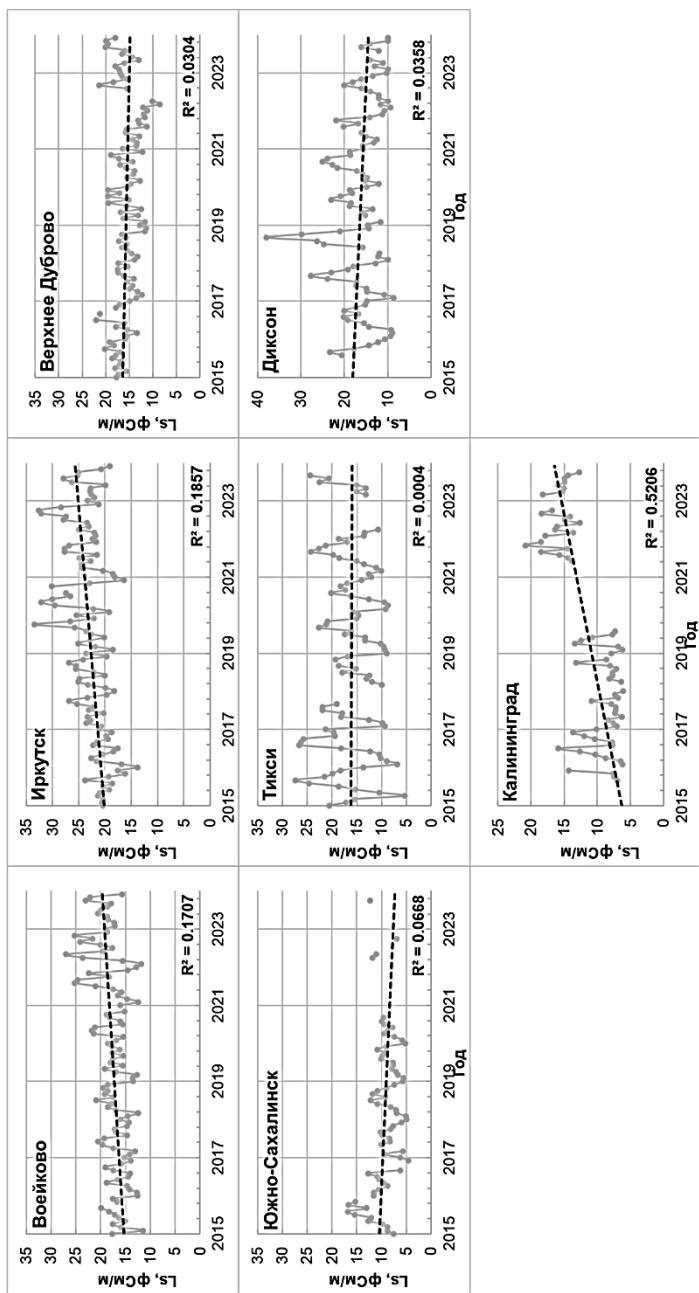


Рис. 6. Динамика средних месячных значений $\Sigma\lambda$ в Воейково, Иркутске, Верхнем Дуброво, Южно-Сахалинске, Тикси, Диксоне и Калининграде

– полярные (высокоширотные), находящиеся на побережье Северного Ледовитого океана (СЛО), где хозяйственная деятельность минимальна: Тикси, Диксон, Мыс Баранова. Пункт Зашеек хоть и находится в полярной зоне, но располагается вблизи крупного промышленного объекта (в 7 км от Кольской АЭС) и должен быть отнесен к группе континентальных.

Городские пункты

Данная группа пунктов характеризуется повышенной антропогенной нагрузкой, что проявляется в особенностях их суточного и годового хода ЭХА, графики которых для E и $\sum\lambda$ представлены на рисунке 7.

Суточный ход параметров, представленный в ВСВ, в разных пунктах не совпадает. Но при привязке графиков к местному (локальному) времени наблюдается совпадение максимумов $\sum\lambda$ и, соответствующих им, минимумов E . Так, например, 18-часовой полумаксимум $\sum\lambda$ в Южно-Сахалинске, 20-часовой максимум в Иркутске и 3-часовой максимум в Калининграде приходятся на период 4–5 ч по местному времени, что соответствует самому минимальному автомобильному трафику. Минимумы $\sum\lambda$ и соответствующие им максимумы E приходятся на часы пик.

Поселковые-(континентальные) пункты

На континентальных пунктах заметно выражены суточные вариации, на которых прослеживаются влияние глобальных процессов и локальных факторов.

К глобальным эффектам относится 19-часовой максимум E , являющийся основным показателем наличия глобальной электрической токовой цепи в атмосфере. Местные эффекты обусловлены более слабым вторичным максимумом, вызванным турбулентными процессами в приземном слое, возникающими в полдень по местному времени.

Для этих пунктов выделение унитарной вариации E представляется достаточно сложным, так как здесь большое влияние оказывают локальные генераторы электрического поля, в первую очередь

электрически заряженные частицы аэрозоля, а также локальные процессы ионизации атмосферы, связанные с выходом из почвы радиоактивных газов.

Полярные пункты

Пункты Арктической зоны практически не подвержены антропогенным воздействиям, о чем свидетельствует суточный и годовой ход ЭХА (рис. 9). Ход E в течение суток имеет вид простой полуволны с максимумом в 19 ч по ВСВ, что соответствует наблюдаемой по всему земному шару глобальной унитарной суточной вариации (Чалмерс, 1974, Зайнетдинов, 2018). Суточный ход $\sum\lambda$ отсутствует, поскольку в данном регионе антропогенное влияние незначительно. При этом годовой ход $\sum\lambda$ на всех станциях одинаков и имеет четко выраженный максимум в летне-осенние месяцы и минимум в зимне-весенние, последний обусловлен эффектом арктической дымки.

Отличительной особенностью пунктов, расположенных на побережье Северного Ледовитого океана по причине удаленности от источников загрязнения является то, что глобальная унитарная вариация особенно четко проявляется при условии исключения из анализируемой выборки результатов измерений при сильных ливнях, грозах, снегопадах и метелях.

Особенности изменения электрических характеристик атмосферы в результате нециклического влияния на окружающую среду

Влияние интенсивных лесных пожаров на ЭХА

Зависимость ЭХА от аэрозольного воздействия, обусловленного интенсивными лесными пожарами на обширных территориях Иркутской области в 2015 г., демонстрируют графики, представленные на рисунке 10. В июне 2015 г. значения E несколько выше, а значения $\sum\lambda$ несколько ниже по сравнению с теми же периодами 2014, 2016 и 2017 гг., когда по данным МЧС территория, охваченная пожарами, была незначительной.

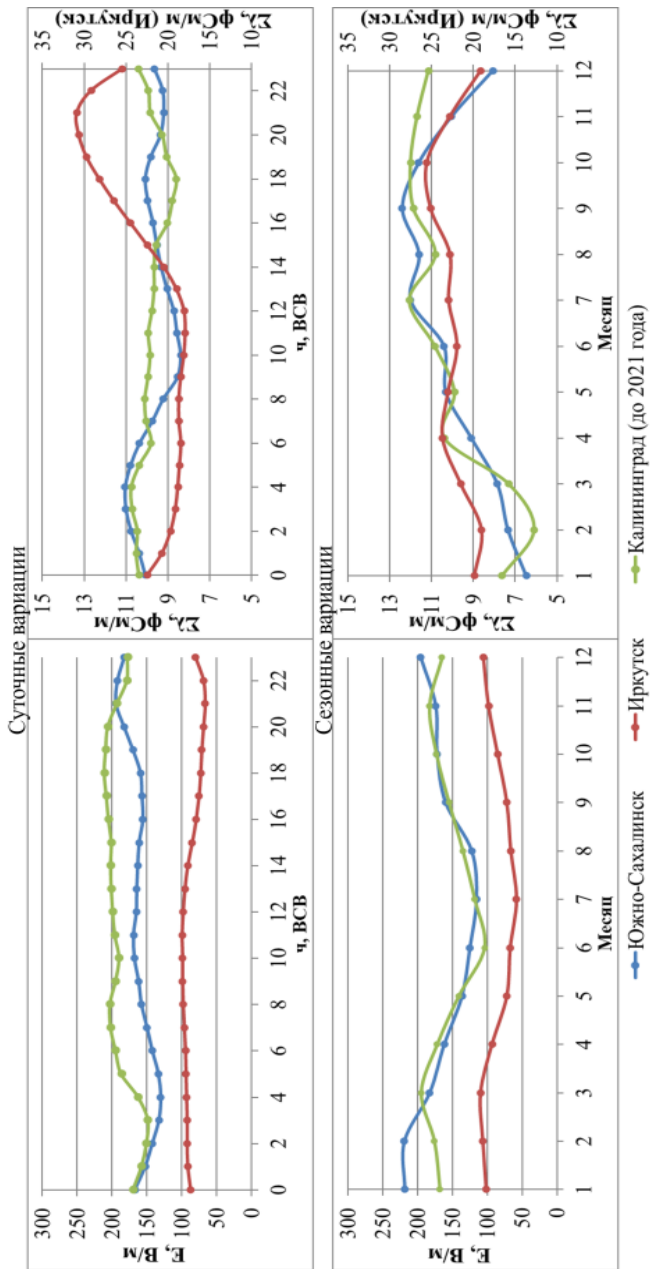


Рис. 7. Суточный и годовой ход E и $\Sigma\lambda$ для пунктов, расположенных в черте крупных региональных центров, период осреднения 2015–2023 гг..

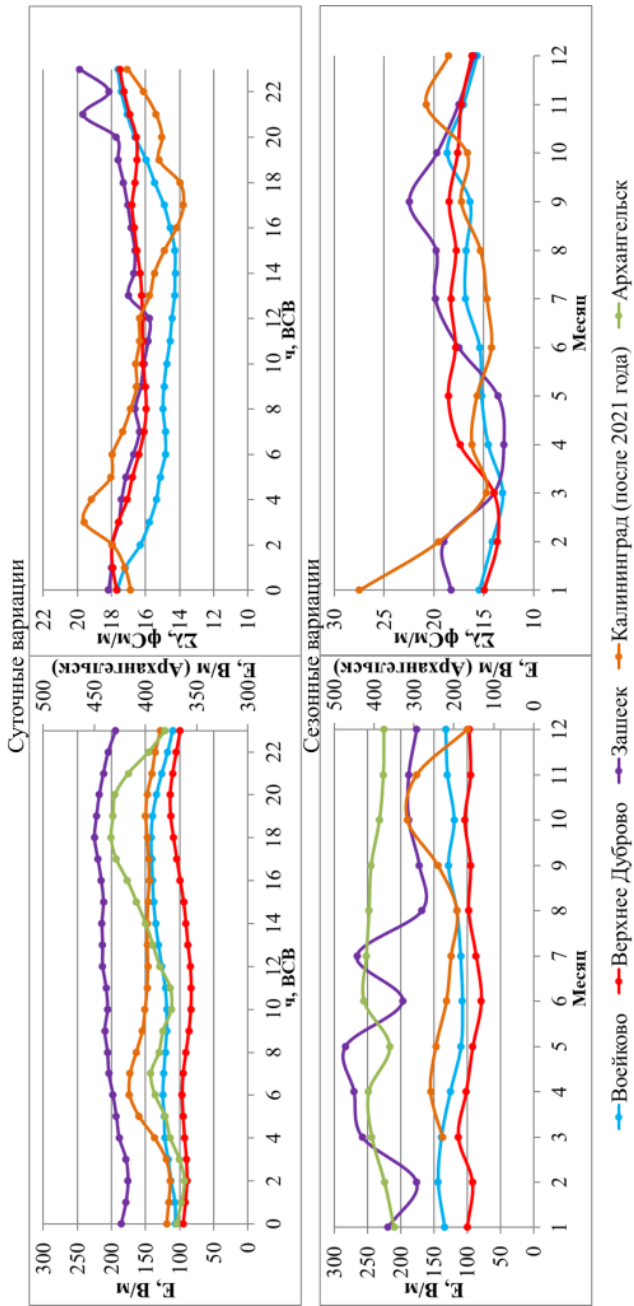


Рис. 8. Суточный и годовой ход E и $\Sigma\lambda$ для пунктов, расположенных в поселковой зоне, период осреднения 2015–2023 гг.

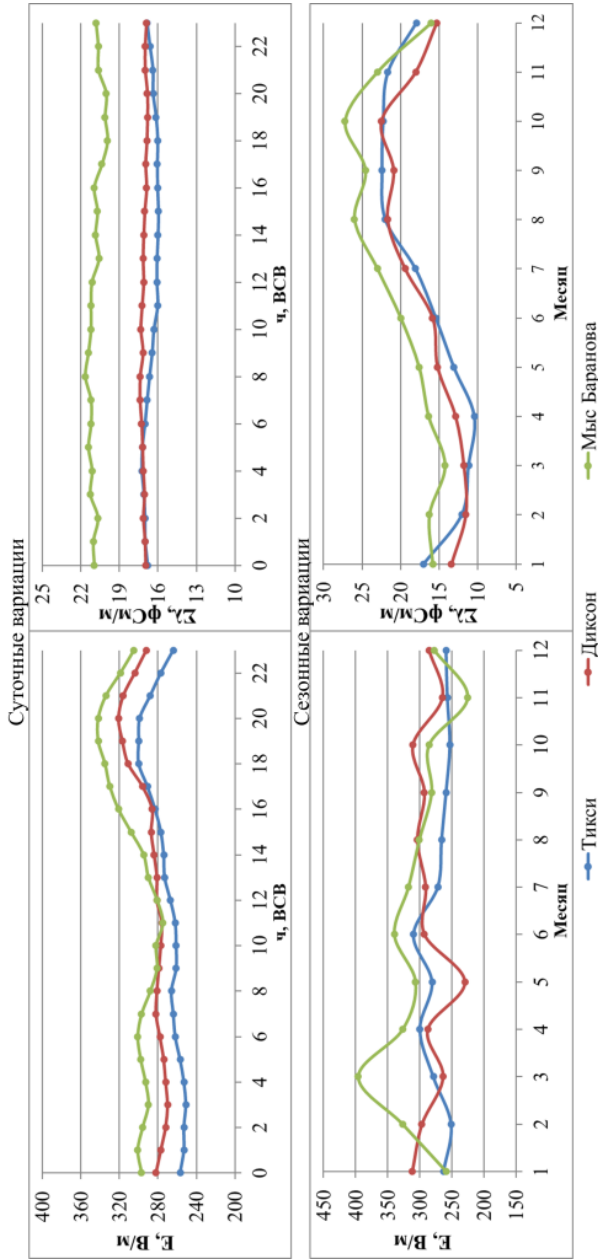


Рис. 9. Суточный и годовой ход E и $\Sigma\lambda$ для станций, расположенных на побережье Северного Ледовитого океана, период осреднения 2015–2023 гг.

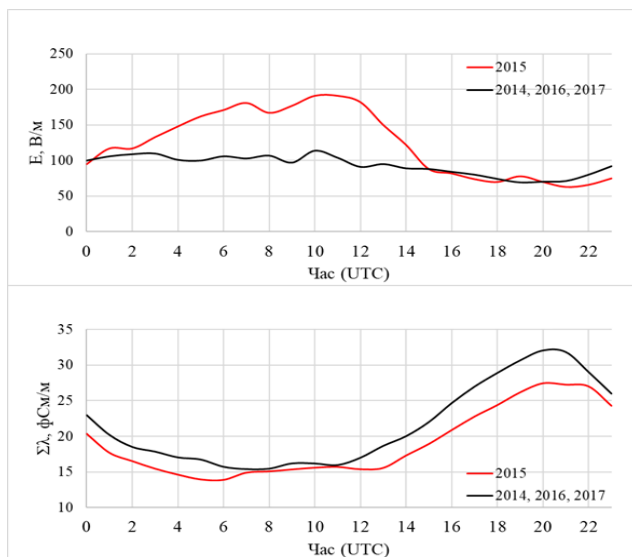


Рис. 10. Средний суточный ход E , $\Sigma\lambda$ в июне 2015 г. (красная линия) и в июне 2014, 2016 и 2017 гг. (синяя линия)

Особенности изменения ЭХА в период ослабления хозяйственной деятельности во время пандемии Covid-19

В 2020 г., после введения карантинных ограничений в связи с возникшей пандемией, характер и интенсивность антропогенного воздействия на окружающую среду, в том числе и на электрическое состояние атмосферы, кардинально изменились. Уменьшение интенсивности аэрозольного воздействия в результате введения усиленных карантинных мер, ограничивающих хозяйственную деятельность, включая движение транспорта, иллюстрирует рисунок 11, на котором представлен суточный ход электрических параметров атмосферы в период с мая по апрель 2020 года на фоне соответствующих средних значений за период 2015–2019 гг. для 3 пунктов наблюдений с разной степенью аэрозольного воздействия.

На станциях Воейково и Иркутск в 2020 г. наблюдается значительное увеличение $\Sigma\lambda$ по отношению к аналогичному периоду

2015–2019 гг. На станции Тикси значения $\Sigma\lambda$ практически не изменились, что связано с тем, что, в отличие от других станций, она расположена в зоне наименее подверженной антропогенному воздействию: активная хозяйственная деятельность в окрестностях станции не ведется.

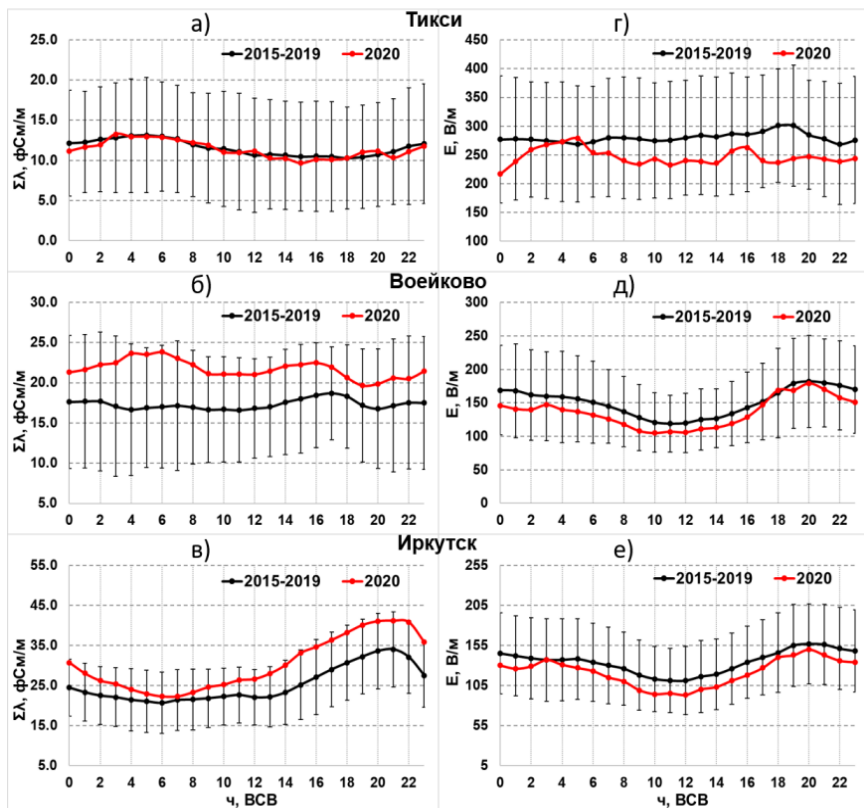


Рис. 11. Суточный ход ЭХА за май–апрель 2020 г. и средний за период с 2015 по 2019 гг. за те же месяцы

Уменьшение интенсивности аэрозольного воздействия иллюстрирует также рис. 12, на котором представлена зависимость $\Sigma\lambda$ от направления ветра на пункте Воейково. Осредненные

за 5 предыдущих лет значения $\Sigma\lambda$ — синяя кривая, за 2020 г. — красная кривая. Значения за 2020 год (красная диаграмма) значительно выше предыдущих, причем при направлениях ветра со стороны Санкт-Петербурга это превышение составляет порядка 30 %, а со стороны «чистых» направлений менее 10%. Единственное направление, в котором значения были сравнимы это ВЮВ, что, возможно, связано с наименьшим количеством случаев, зафиксированных с данного направления (2–3 %). Более детально результаты представлены в работе (Зайнетдинов, Соколенко, Занюков, 2022). В период ослабления хозяйственной деятельности влияние промышленного мегаполиса на ЭХА заметно снизилось.



Рис. 12. Распределение значений $\Sigma\lambda$ в п. Воейково в соответствии с розой ветров за апрель–май 2020 г. и розой ветров за те же месяцы 2015 - 2019 гг.

Заключение

Существующая атмосферно-электрическая сеть Росгидромета является составной частью общей системы мониторинга окружающей среды и единственным регулярным источником информации

об электрическом состоянии атмосферы на территории Российской Федерации. Обобщенные и проанализированные данные по мониторингу электрического состояния атмосферы публикуются в ежегодных Обзорах Росгидромета.

В зависимости от расположения пунктов сезонные и суточные вариации различаются. В городских пунктах заметно влияние хозяйственной деятельности, активность которой возрастает в утренние и дневные часы по местному времени. В пунктах поселкового типа прослеживается влияние глобальных эффектов и локальных источников. В полярном регионе при отсутствии локальных источников аэрозольного загрязнения четко проявляется глобальная унитарная вариация.

Воздействия локальных факторов продолжительностью 2–3 месяца приводят к заметному увеличению или уменьшению $\Sigma\lambda$ на фоне среднестатистических значений в эти месяцы, однако такие возмущения практически не проявляются в средних годовых значениях $\Sigma\lambda$.

Результаты, полученные во время пандемии в 2020 г., служат реальным подтверждением того, что электрические характеристики атмосферы могут использоваться в качестве индикаторов аэрозольного загрязнения атмосферы в системе экологического мониторинга окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Зайнетдинов Б. Г. (2018). Результаты наблюдений за электрическими характеристиками приземного слоя атмосферы в полярном регионе // Труды ГГО. Вып. 588. С. 47–61.

Зайнетдино Б. Г., Соколенко Л. Г., Занюков В. В. (2022). Изменение электрических характеристик атмосферы в разных географических регионах в период ослабления хозяйственной деятельности весной 2020 г. // Метеорология и гидрология. № 3. С. 47–54.

Зайнетдинов Б. Г., Занюков В. В., Соколенко Л. Г. (2022). Результаты совместных многолетних наблюдений за концентрацией аэрозоля субмикронного диапазона и электрическими характеристиками атмосферы в п. Тикси / В сб.: Физика окружающей

среды. Материалы XV Международной Школы молодых учёных «ФИЗИКА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ» им. А.Г. Колесника. — Томск. С. 18–22.

Морозов В. Н., Попов И. Б., Снегуров В. С., Снегуров А. В., Соколенко Л. Г., Шварц Я. М. (2009). Исследования в области атмосферного электричества и пеленгации гроз // Труды ГГО. Вып. 560. С. 213–242.

Попов И. Б., Соколенко Л. Г. (2013) РСБД «Атмосферное электричество». Свидетельство о госрегистрации базы данных № 2013620672.

Соколенко Л. Г., Зайнетдинов Б. Г., Занюков В. В. (2024). РСБД «Атмосферное электричество-2022». Свидетельство о госрегистрации базы данных № 2024621160.

РД 52.04.168-2017 (2017) «Наблюдения за атмосферным электричеством с использованием автоматизированных средств измерений». — СПб: ООО «Амирит». 44 с.

Соколенко Л. Г., Зайнетдинов Б. Г. (2018). Результаты модернизации и расширения сети наблюдений за атмосферным электричеством // Труды ГГО. Вып. 589. С. 153–166.

Соколенко Л. Г., Зайнетдинов Б. Г. (2021). Результаты пилотных наблюдений за электрическими характеристиками атмосферы на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» / В кн.: «Исследование природной среды высокоширотной Арктики на НИС «Ледовая база Мыс Баранова». — Санкт-Петербург: ААНИИ. С. 77–83.

Чалмерс Дж. (1974). Атмосферное электричество. — Л.: Гидрометеиздат. 424 с.

Шварц Я. М., Соколенко Л. Г. (2003). Результаты многолетних измерений градиента потенциала электрического поля атмосферы и удельных полярных электрических проводимостей воздуха в приземном слое на территории России // Труды 5 национальной конференции по атмосферному электричеству. — Владимир. С. 133–136.

МОНИТОРИНГ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В РОССИИ ПО ПРОГРАММЕ ГСА ВМО: ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОПОСТАВИМОСТИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

*Н. Н. Парамонова, В. И. Привалов,
В. М. Ивахов, А. В. Зинченко*

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Voeikov Main Geophysical Observatory
St. Petersburg, Karbysheva st., 7

E-mail: nina-paramonova@mail.ru

Поступила в редакцию 05.03.2024
Поступила после доработки 19 .08.2024

Введение

Вопросам изменения климата в Российской Федерации в последнее время уделяется всё больше внимания. В частности, перед Россией стоит задача получения надежной количественной оценки поглотительной способности природных экосистем. Для ее решения в настоящее время создается сеть карбоновых полигонов — специализированных тестовых площадок, расположенных в различных репрезентативных экосистемах, на которых будет проводиться мониторинг потоков парниковых газов (ПГ) и разрабатываться технологии по секвестированию углеродосодержащих ПГ из атмосферы (Карбоновые полигоны Российской Федерации. URL: <https://carbon-polygons.ru/>).

В рамках важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ) «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.10.2022 г. № 3240-р) в России интенсивно

развиваются работы по мониторингу парниковых газов. Один из основных компонентов создаваемой системы — мониторинг концентрации ПГ в атмосфере, которая является определяющим фактором изменения климата планеты.

Первоначально результаты наблюдений ПГ использовались для оценки глобальных тенденций изменения их концентрации, но в настоящее время эти данные находят применение в расчетах баланса ПГ в атмосфере посредством восстановления потоков ПГ методами обратного моделирования на глобальном и региональном уровнях (Bergamaschi et al., 2018; Tenkanen et al., 2021; Makarova et al., 2021). Обеспечение сопоставимости необходимо для того, чтобы минимизировать ошибку определения горизонтальных градиентов концентрации ПГ между станциями, которые приводят к ошибкам в оценках потоков. В работе (Masarie et al., 2011) показано, что отклонение концентрации CO_2 в 1 млн^{-1} на измерительной башне в Висконсине привело к изменению оценки потока диоксида углерода на 68 ТгС/год при использовании модели CarbonTracker (Peters et al., 2007). Эта величина составляет примерно 10 % предполагаемого годового поглощения CO_2 наземными экосистемами Северной Америки.

Подход к решению вопросов единства шкалы измерений разработан в рамках программы Всемирной метеорологической организации «Глобальная служба атмосферы» (ГСА), которая является международной платформой для координации долгосрочных наблюдений за составом атмосферы, выполняемых на территории порядка 100 стран (Global Atmosphere Watch Programme (GAW) / WMO. URL: <https://community.wmo.int/en/activity-areas/gaw>).

Для Росгидромета взаимодействие с ВМО на протяжении десятилетий является одним из ключевых направлений в области международного сотрудничества. Программа ГСА ВМО основана на исследованиях значимых для климата и экологии химических компонентов атмосферы (WMO GAW, 2017). ГСА ВМО появилась в 1989 г., объединив в себе программы ВАРМоN (основана в конце 1960-х гг.) и GO3OS (основана в 1957 г.). ГСА ВМО способствует сотрудничеству и обмену данными между странами, участвующими

в национальных программах мониторинга. Атмосферные данные, собранные в региональных масштабах, трудно интерпретировать без глобального охвата, который определяет граничные условия. ГСА ВМО ставит задачи обеспечения сопоставимости, чтобы измерения, полученные в независимых лабораториях, можно было использовать в научных исследованиях. Это значительно повышает ценность отдельных наборов данных, поскольку позволяет лучше отличать процессы, происходящие в регионе, от процессов, происходящих вне его.

В России программа ГСА ВМО по парниковым газам представлена единственной отечественной научной организацией — Главной геофизической обсерваторией им. А. И. Воейкова (ГГО), которая проводит измерения концентрации ПГ на четырех станциях: Воейково (Ленинградская обл.), Териберка (Кольский п-ов), Новый Порт (п-ов Ямал), Тикси (побережье моря Лаптевых). Основные результаты наблюдений регулярно публикуются в информационно-аналитических материалах Росгидромета и научных изданиях (Парамонова и др., 2023), а также передаются в мировой центр данных (МЦД) ВМО по парниковым газам WDCGG (World data center for greenhouse gases. URL: <https://gaw.kishou.go.jp/>).

Данная работа вслед за рекомендациями ВМО еще раз обращает внимание на необходимость обеспечения сопоставимости данных наблюдений на станциях, которые проводят или начинают проводить измерения ПГ в Российской Федерации. На основе имеющегося в ГГО опыта работы в рамках ГСА ВМО в статье дано описание способа достижения требуемой сопоставимости данных, приведены примеры достигнутой сопоставимости результатов измерений атмосферной концентрации парниковых газов, выполняемых на территории России различными организациями и разными методами, приведены результаты измерений, полученные в соответствии с требованиями обеспечения сопоставимости данных, и продемонстрированы некоторые результаты, полученные при их интерпретации.

Рекомендации ГСА ВМО и способы достижения требуемой сопоставимости

Программа ГСА ВМО курирует наблюдения за атмосферной концентрацией ПГ на основе прецизионных измерений. Для того чтобы данные наблюдений с разных станций можно было использовать для совместного анализа, выработаны целевые показатели сопоставимости данных измерений (WMO GAW, 2018) (см. табл. 1).

Таблица 1

Целевые показатели сопоставимости данных измерений в рамках ГСА ВМО

	Рекомендация на сопоставимость		Диапазон концентраций	
	основная	расширенная	для фоновых условий	покрываемый шкалой ВМО
CO ₂ , млн ⁻¹	0,1 (северный полюс)	0,2	380–450	250–800
	0,05 (южный полюс)			
CH ₄ , млрд ⁻¹	2	5	1750–2100	300–5900
N ₂ O, млрд ⁻¹	0,1	0,3	325–335	260–370
H ₂ , млрд ⁻¹	2	5	400–600	140–1200

Достижение требуемой сопоставимости данных обеспечивается за счет выполнения двух **основных принципов**.

1) Привязка шкалы измерений к единому газовому эталону, держателем которого является Центральная калибровочная лаборатория ВМО. Эталонная база ВМО состоит из эталонов трех уровней.

Эталоны первого уровня — 19 баллонов с газовыми смесями на основе естественного воздуха, концентрация CO₂ в них охватывает

диапазон от 250 до 800 млн⁻¹. Эталоны первого уровня регулярно (раз в 2–3 года) поверяются с помощью эталонной манометрической установки (Zhao et al., 1997). Предполагается, что время жизни первичных эталонов составляет несколько десятков лет. Сравнения первичных эталонов с предыдущими эталонами ВМО, подготовленными в институте океанологии Скрипса (США), а также с эталонами национального института наук об окружающей среде (Япония), не показали значимого различия между концентрациями углекислого газа.

Эталон второго уровня — 18 баллонов, подготовленных аналогичным образом, что и первичные, в том же диапазоне измерений. Концентрации CO₂ во вторичных эталонах определяются путем компарирования с первичными эталонами с помощью прецизионных газоанализаторов. Время жизни вторичных эталонов составляет от 3 до 10 лет.

Эталон третьего уровня — стандартные образцы, которые поставляются потребителю. Они готовятся по аналогичной схеме, что и вторичные эталоны, концентрация CO₂ в них определяется относительно вторичных стандартов. Подробное описание эталонной базы представлено на сайте центральной калибровочной лаборатории ВМО (Central calibration laboratory. URL: <https://gml.noaa.gov/ccl/airstandard.html>). Использование национальных газовых стандартов, в частности российского ГЭТ 154-2019 (Колобова и др., 2020), пока не дает возможности получить требуемую сопоставимость, поскольку, как показывают сличения CCQM-K82 и CCQM-K120, согласованность шкал институтов стандартизации выходит за пределы требуемой сопоставимости для атмосферных измерений концентрации парниковых газов (Flores et al., 2015, 2019). Следует отметить, что постепенно согласованность шкал улучшается и встает вопрос о распространении шкалы ВМО по парниковым газам с помощью национальных институтов стандартизации.

2) Выполнение измерений в режиме жесткого компарирования, в результате которого сигнал от измеряемой пробы сравнивается с сигналом от стандартной газовой смеси, концентрация парниковых газов в которой определена с высокой точностью.

Количество используемых газовых смесей и частота их регистрации (т. е. калибровки аппаратуры) зависит от характеристик аппаратуры.

Долгое время концентрация CO_2 измерялась преимущественно с помощью недисперсионных инфракрасных анализаторов с оптико-акустическими детекторами (WMO GAW, 2017). Вследствие того, что сигнал такого детектора формируется за счет нелинейного процесса поглощения радиации в измеряемой пробе, для калибровки аппаратуры необходимо иметь не менее трех газовых смесей. Дрейф прибора приводит к необходимости калибровки аппаратуры каждые 30–40 мин. Подробные рекомендации по выполнению измерений оптико-акустическим методом изложены в (WMO GAW, 1999).

Для измерения концентрации метана широкое распространение получил метод газовой хроматографии с детектором ионизации в пламени. Благодаря высокой степени линейности детектора выполнение измерений возможно при использовании одной стандартной газовой смеси с периодической проверкой отклика системы на различные концентрации парниковых газов в пробе атмосферного воздуха. Регистрацию газовой смеси для данного метода измерений рекомендуется производить после каждой регистрации измеряемой пробы, поскольку количество молекул измеряемого газа, вводимое в хроматограф с помощью петли крана дозатора, связано с давлением и температурой окружающего воздуха. Рекомендации по выполнению газохроматографических измерений концентрации парниковых газов изложены в (WMO GAW, 2009). Методика, разработанная в соответствии с рекомендациями ВМО на базе газового хроматографа «Кристалл 5000.2» (ЗАО СКБ «Хроматек») представлена в руководящем документе Росгидромета РД 52.04.875-2019 (2020).

В течение последнего десятилетия активно разрабатываются анализаторы на основе спектроскопических методов измерений: OA-ICOS, CRDS, TDLAS, FTIR и др. (Brewer et al., 2019; Zellweger et al., 2016). Наиболее надежными зарекомендовали себя приборы, действие которых основано на спектроскопии затухания излучения в многоходовой оптической кювете (O'Keefe, Deacon, 1988). Концентрация примеси определяется по времени затухания лазерного

излучения в кювете с пробой атмосферного воздуха. На этом принципе создана целая серия приборов для осуществления атмосферного мониторинга газового состава атмосферы Picarro (URL: <https://www.picarro.com/>). Для измерения основных парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O) используются модели G2301, G2401, PI5310 и др. Такие приборы имеют заводскую калибровку, и их выходным продуктом являются рассчитанные значения концентрации измеряемых газов. Однако для задач атмосферного мониторинга ПГ необходим дополнительный контроль шкалы измерений и стабильности аппаратуры, в основе которого лежит регулярное измерение газовых стандартных смесей в автоматическом режиме. Газоанализаторы G2301 и G2401 обладают высокими показателями с точки зрения повторяемости измерений, но при этом воспроизводимость результатов может варьировать в пределах нескольких десятых долей млн^{-1} для CO_2 и нескольких млрд^{-1} для CH_4 . Для учета дрейфа прибора по данным измерения калибровочных стандартов в рамках одного калибровочного цикла, состоящего из последовательного измерения 2–4 баллонов со стандартными смесями, каждый из которых регистрируется по 15–20 мин, выполняется расчет коэффициентов регрессии сигнала газоанализатора и концентрации определяемой примеси. На основе полученного уравнения регрессии вводятся поправки в результаты измерений атмосферной концентрации вплоть до следующего калибровочного цикла. Коррекция данных выполняется для всех высокоточных измерений концентрации парниковых газов (Andrews et al., 2014). Опыт использования приборов G2301 и G2401 показывает, что поправки для CO_2 могут достигать нескольких млн^{-1} . В случае использования для калибровки аппаратуры только одной стандартной газовой смеси остаточная неопределенность шкалы может достигать 1 млн^{-1} . Процедуры обработки и подготовки данных измерений атмосферной концентрации парниковых газов приведены в работе (Hazan et al., 2016).

Примеры достигнутой сопоставимости на основе опыта ГГО. Официальные сравнения ВМО по парниковым газам

В рамках контроля качества наблюдений на сети станций ГСА ВМО организованы регулярные межлабораторные сравнения посредством анализа «путешествующих» стандартов. Участие ГГО в шестом раунде официальных сравнений ВМО по парниковым газам убедительно показало высокую точность измерений, выполняемых ГГО. По результатам сравнений концентрации CO_2 лаборатория ГГО вошла в число 22 лабораторий (из 39 участвующих), показавших наилучшие результаты — отклонения измеренного значения от приписанного находятся в пределах 0,5 допустимого диапазона отклонений в соответствии с требованиями ВМО (WMORR Results CO_2 . URL: https://gml.noaa.gov/ccgg/wmorrr/wmorrr_results.php?rr=rr6¶m=co2) и в число 25 лабораторий из 35 участвующих, попавших в диапазон допустимых отклонений по концентрации CH_4 (WMORR Results CH_4 . URL: https://gml.noaa.gov/ccgg/wmorrr/wmorrr_results.php?rr=rr6¶m=ch4). При проведении сравнений требования на допустимые отклонения от приписанных в Центральной калибровочной лаборатории ВМО значений соответствуют приведенным в таблице 1.

Сравнения различных программ наблюдений, выполняемых в Тикси

В гидрометеорологической обсерватории (ГМО) «Тикси» в период с 2013 по 2018 г. сложилась уникальная для России ситуация, когда на одной станции одновременно проводились измерения атмосферной концентрации парниковых газов в рамках ГСА ВМО тремя разными организациями: Главной геофизической обсерваторией (ГГО), Финским метеорологическим институтом (ФМИ) и Лабораторией глобального мониторинга Национального управления по вопросам океана и атмосферы США (НУОА). Программа ГГО и НУОА состояла из еженедельного парного отбора проб воздуха в стеклянные 2-литровые колбы и их последующего анализа в лабораториях

(в Воейково и в Боулдере), а ФМИ выполнял непрерывные наблюдения с помощью газоаналитической установки на основе лазерного спектрометра G2301. Отбор проб осуществлялся путем прокачки воздуха через две последовательно соединенные колбы в течение 15–20 мин. Интервал между отбором проб для НУОА и ГГО составлял около 10–20 мин. Газоанализатор и устройство отбора проб располагались в здании павильона «Чистый воздух» ГМО «Тикси», атмосферный воздух отбирался с высоты 10 м над уровнем земли и по газовым магистралям поступал в соответствующее оборудование. К сожалению, после 2018 г. экономические и логистические проблемы привели к остановке программ ГГО и НУОА на станции Тикси.

Следует отметить, что ситуации, когда на станции мониторинга ПГ наблюдения проводятся разными институтами, довольно часто встречаются в рамках программы ГСА ВМО. Из 32 глобальных станций ГСА только на шести наблюдения выполняет одна организация, на остальных измерения проводят от двух до четырех разных институтов (World data center for greenhouse gases (WDCGG). URL: <https://gaw.kishou.go.jp/>). В таких случаях сравнительный анализ служит средством взаимного контроля качества наблюдений.

Для проверки сопоставимости измеренных значений концентрации ПГ были взяты следующие данные из МЦД ПГ ВМО: среднечасовые значения CO_2 и CH_4 (ФМИ) и фляжечные значения ПГ (ГГО и НУОА). Все данные CO_2 получены в шкале ВМО X2019, а данные CH_4 — в шкале X2004a. Принимая во внимание принципиальные отличия непрерывной и регулярной программ наблюдений, а также несинхронность регулярных программ, для выполнения корректного сравнения была проведена селекция данных. Для фляжечных данных основным критерием попадания в сравнение были установленные «флаги» в исходных файлах, которые отражают качество отбора проб и основываются на разности измеренного значения концентрации в двух одновременно отобранных пробах. Для непрерывных наблюдений основным критерием было СКО среднечасовой концентрации ПГ, которое не должно превышать $0,3 \text{ млн}^{-1}$ и 5 млрд^{-1} для CO_2 и CH_4 соответственно. Синхронизация данных непрерывных и фляжечных наблюдений была выполнена

с точностью до 1 ч, а синхронизация фляжечных наблюдений определялась временным интервалом между отбором разного типа фляг с точностью до 1 сут. Для сравнения рассчитывался модуль разности между концентрациями, полученными каждой парой организаций. В сравнениях не рассматривались данные, если модуль разности превышал 1 млн^{-1} для CO_2 и 5 млрд^{-1} для CH_4 . Количество таких данных для CO_2 и CH_4 составило соответственно: 15 и 17 % (ГГО–ФМИ), 5 и 13 % (ГГО–НУОА) и 7 и 11 % (НУОА–ФМИ). Число случаев, попавших в сравнение, составило 94, 89 и 144 (CO_2) и 123, 108 и 193 (CH_4) для пар ГГО–ФМИ, ГГО–НУОА и НУОА–ФМИ соответственно. Различие в количестве рассчитанных модулей разности для разных пар обусловлено пропусками наблюдений. Результаты расчетов представлены на рисунке 1.

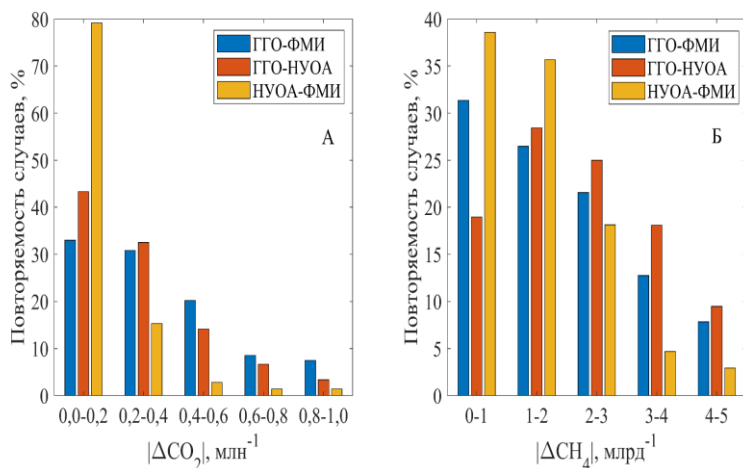


Рис. 1. Распределение модуля разности концентраций CO_2 и CH_4

Следует отметить, что на результаты сравнения данных, полученных в натуральных условиях, наряду с точностью выполнения измерений оказывают влияние такие факторы, как естественная изменчивость концентрации примесей в атмосфере, дискретность измерений и способ осреднения данных. Для выполнения корректного

сравнения следует выбирать данные с низкой дисперсией по результатам непрерывных измерений. Использование данных с большими естественными колебаниями будет демонстрировать влияние различных способов осреднения и временных несовпадений при отборах проб. Из рисунка 1 видно, что отличия между результатами измерений различных программ преимущественно не превосходят $0,6 \text{ млн}^{-1}$ для CO_2 и 4 млрд^{-1} для CH_4 .

В таблице 2 результаты сравнений непрерывных измерений ФМИ и фляжечных измерений ГГО представлены более детально. Такое сравнение было проведено для проверки сопоставимости данных при объединении двух рядов наблюдений в период, когда в каждом из них имелись разрывы. Описанная ситуация имела место в 2017 г. Сопоставимость данных была проверена на основе сравнений синхронных измерений.

Фляжечные и непрерывные измерения хорошо согласуются. Наблюдаемые расхождения не превышают $0,6 \text{ млн}^{-1}$ для концентрации CO_2 и $4,2 \text{ млрд}^{-1}$ для концентрации CH_4 . В среднем расхождения по диоксиду углерода составили $0,1 \text{ млн}^{-1}$ и $0,4 \text{ млрд}^{-1}$ по метану, что не превысило целевых показателей сопоставимости ГСА ВМО, а для метана оказались существенно меньше. При этом наиболее значительные расхождения наблюдаются в условиях повышенных естественных вариаций концентрации (повышенная разность в двух одновременно отобранных флягах и увеличенное СКО для среднечасовых значений непрерывных измерений).

Сравнение результатов непрерывных измерений CH_4 в Воейково

На полевой экспериментальной базе ФГБУ «ГГО» в пос. Воейково (павильон актинометрии) в течение 2021 г. выполнялись непрерывные измерения концентрации CH_4 двумя различными методами — газохроматографическим (хроматограф Кристалл 5000.2, ЗАО СКБ «Хроматек») и спектроскопическим методом затухания лазерного излучения в кювете (газоанализатор G2401, Picarro). Отбор проб воздуха осуществлялся с высоты 6 м над уровнем земли.

Таблица 2

Сравнение результатов синхронных фляжечных и непрерывных измерений

Дата	Фляжечные измерения				Непрерывные измерения				Разность	
	CH ₄ млрд ⁻¹	Разброс млрд ⁻¹	CO ₂ млн ⁻¹	Разброс млн ⁻¹	CH ₄ млрд ⁻¹	SKO млрд ⁻¹	CO ₂ млн ⁻¹	SKO млн ⁻¹	ΔCH ₄ млрд ⁻¹	ΔCO ₂ млн ⁻¹
18.01.16	1934,6	1,8	406,9	0,1	1935,0	2,1	407,1	0,1	-0,4	-0,2
25.01.16	1976,5	0,1	412,4	0,1	1977,5	0,9	412,8	0,2	-1,0	-0,4
02.02.16	1959,7	0,3	408,6	0,1	1958,9	0,3	408,5	0,0	0,7	0,1
08.02.16	1935,2	1,4	407,6	0,1	1931,0	2,4	407,5	0,3	4,2	0,1
15.02.16	1929,5	5,6	409,9	2,4	1928,7	0,3	409,3	0,9	0,8	0,6
23.02.16	1925,0	0,2	407,3	0,0	1924,3	0,2	407,0	0,1	0,7	0,3
29.02.16	1954,7	1,1	410,9	0,1	1951,0	0,3	410,9	0,1	3,7	0,0
09.03.16	1954,8	0,4	410,5	0,1	1955,3	0,5	410,4	0,0	-0,5	0,1
27.03.17	1939,3	2,5	413,7	0,0	1939,5	0,4	413,6	0,0	-0,3	0,1
03.04.17	1961,5	0,0	414,6	0,0	1962,2	0,3	414,4	0,1	-0,7	0,2
10.04.17	1958,7	1,1	414,4	0,2	1958,6	0,6	414,6	0,3	0,1	-0,2
17.04.17	1953,2	0,0	413,9	0,0	1952,0	0,5	413,6	0,0	1,2	0,3
24.04.17	1942,7	1,0	415,1	0,2	1942,3	0,2	414,9	0,1	0,4	0,2
02.05.17	1937,1	1,2	414,4	0,1	1937,9	0,3	414,0	0,0	-0,8	0,4
08.05.17	1936,9	1,4	413,6	0,2	1939,8	0,6	413,5	0,0	-2,9	0,1
15.05.17	1931,6	0,0	413,9	0,0	1931,1	0,2	413,3	0,1	0,5	0,6

Поскольку здание павильона расположено на вершине холма, то при восточных направлениях ветра, т. е. со стороны склона и долины (в которой находятся лесные и болотистые участки, простирающиеся до Ладожского озера), в газоанализатор поступает воздух с высоты порядка 30–40 м.

Каждый газоанализатор имел свою газовую магистраль, входы которых находились в нескольких сантиметрах друг от друга. Единичное значение концентрации CH_4 на хроматографе определялось в пробе воздуха, отобранной из непрерывно продуваемой пробозаборной газовой магистрали (длина 40 м) со скоростью 50 л/ч 1 раз в 20 мин. Лазерный спектрометр измерял концентрацию CH_4 с частотой 1 Гц при скорости прокачки воздуха 15 л/ч (длина заборной линии 30 м).

Наряду с естественной изменчивостью концентрации метана в атмосфере причиной расхождения между показаниями приборов являются различия в длине газовых магистралей и скорости прокачки воздуха, а также в количестве регистраций, попадающих в заданные интервалы времени при осреднении.

Несмотря на утверждение производителя лазерного спектрометра о достаточности заводской калибровки для соблюдения заявленных в спецификации прибора метрологических характеристик, результаты опытной эксплуатации газоанализатора показывают, что для обеспечения основного показателя сопоставимости ВМО необходимо регулярно контролировать дрейф прибора. В период сравнений двух газоанализаторов поправка, рассчитанная по результатам регулярных измерений калибровочных стандартов, плавно менялась от ~ 4 до ~ 1 млрд⁻¹.

Сравнения были выполнены для 2021 г., в обработку попало 2777 случаев. Результаты сравнений представлены на рисунке 2. Среднее значение разности показаний двух приборов, которое и определяет согласованность шкал измерений, составляет 0,8 млрд⁻¹, что укладывается в основной диапазон требуемой сопоставимости (табл. 1), СКО рассматриваемой разности равно 10 млрд⁻¹. Наиболее значимые расхождения наблюдаются в условиях заметных вариаций

концентрации и могут быть снижены за счет более тщательной временной синхронизации и увеличения периода осреднения.

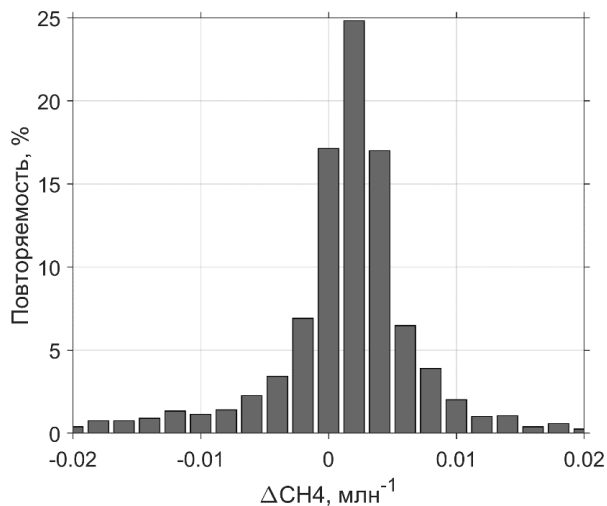


Рис. 2. Распределение разности между среднечасовыми значениями концентрации метана, полученными с использованием хроматографа и лазерного спектрометра, 2021 г.

Проверка сопоставимости данных двух лазерных спектрометров

В процессе подготовки к запуску пилотного проекта по оценке эмиссии парниковых газов (CO₂ и CH₄) на территории Санкт-Петербурга была проведена работа по оценке сопоставимости двух лазерных спектрометров G2401 (Picarro) и GLA131-GGA (ABB). Если G2401 является лабораторным прибором, изначально рассчитанным на прецизионные измерения концентрации ПГ в атмосфере, то портативный газоанализатор GLA131-GGA предназначен, в первую очередь, для измерения концентрации ПГ в полевых условиях. Однако заявленные производителем прибора характеристики позволяют

использовать его для атмосферных наблюдений при условии обеспечения соответствующего контроля их качества.

Шкала измерений обоих приборов регулярно контролируется путем регистрации двух рабочих градуировочных газовых смесей (РГГС), привязанных к шкале ВМО. Тем не менее, из-за существенного различия характеристик приборов необходима специальная проверка реальной сопоставимости получаемых данных.

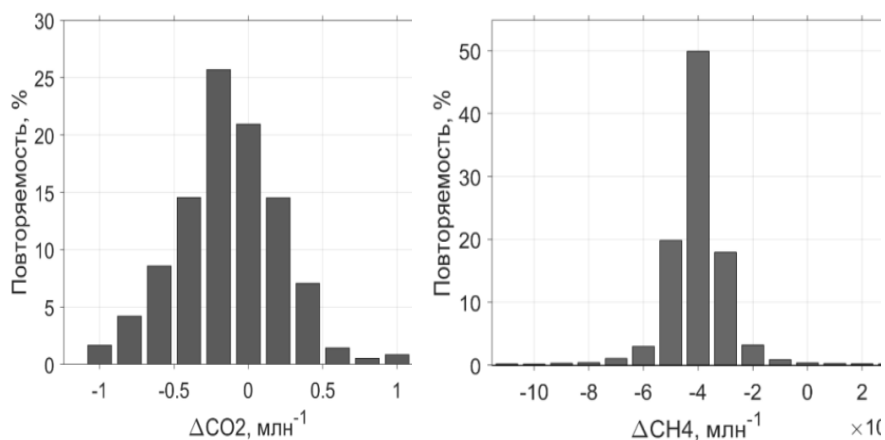


Рис. 3. Распределение разности концентраций CO₂ и CH₄, зарегистрированных приборами G2401 и GLA131-GGA

Приборы отличаются по скорости прокачиваемого через камеру потока воздуха (G2401 — ~12 л/ч и GLA131-GGA — ~120 л/ч), а также по точности поддержания температуры и давления в многоходовой оптической кювете, что приводит к существенному различию в стабильности характеристик приборов. Как было отмечено выше, газоанализатор G2401 обладает очень высокой стабильностью. В качестве примера можно привести изменение зарегистрированного значения CO₂ в РГГС за 6 месяцев 2023 г. от 403,14 до 403,17 млн⁻¹, т. е. на 0,03 млн⁻¹. Как показали результаты испытаний газоанализатора GLA131-GGA на этапе его подготовки к началу работы, данный прибор

обладает менее устойчивыми характеристиками по сравнению с газоанализатором G-2401. В июле 2023 г. был проведен специальный эксперимент по количественной оценке сопоставимости результатов измерений указанными приборами. Результаты сравнений приведены на рисунке 3. Среднее значение разности зарегистрированных концентраций CO_2 составляет $-0,14 \text{ млн}^{-1}$ при СКО $0,43 \text{ млн}^{-1}$ и для концентраций CH_4 $3,9 \text{ млрд}^{-1}$ и $9,9 \text{ млрд}^{-1}$ соответственно. Следовательно, сопоставимость результатов измерений указанными приборами удовлетворяет расширенному критерию ВМО (см. табл. 1), применимому для регионов, где заметно влияние источников эмиссии парниковых газов.

Примеры результатов, полученных с использованием сопоставимых данных

Результаты измерений на арктических станциях (Териберка, Тикси, Новый Порт) ежегодно представляются в аналитических обзорах Росгидромета. Сопоставимость получаемых данных позволяет не только оценить скорость роста концентрации и межгодовую изменчивость, но и получить представление об интенсивности региональных источников и стоков парниковых газов. Наличие в окрестностях станции Новый Порт техногенных (газовые и нефтяные месторождения) и естественных (увлажненные территории) источников ПГ приводит к тому, что измеренные на ней концентрации метана и CO_2 превышают фоновый уровень примерно на 4 и 1 % соответственно (Парамонова и др., 2023). Интенсивность источников эмиссии ПГ, расположенных в окрестностях места измерений, была оценена с использованием соответствующего моделирования распространения примеси (Зинченко и др., 2008; Решетников и др., 2009).

В работе В. М. Ивахова с соавторами (2019) выполнен анализ данных непрерывных измерений CO_2 на станциях Тикси и Мыс Баранова, по результатам которого была получена оценка влияния континентальных источников и стоков на указанных станциях (см. рис. 4). Сравнение с фоновым уровнем над морской поверхностью

— MBL (Marine Boundary Layer. URL: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/mbl/mbl.html>) — показало наличие континентальных источников в зимний период на станции Тикси (превышение над фоновым уровнем составило $1,3 \pm 0,8$ млн⁻¹), в то время как на станции Мыс Баранова их нет. В летний период на станции Тикси наблюдается более сильный сток CO₂ (разность с фоновым уровнем составляет $2,5 \pm 0,6$ млн⁻¹), чем на станции Мыс Баранова.

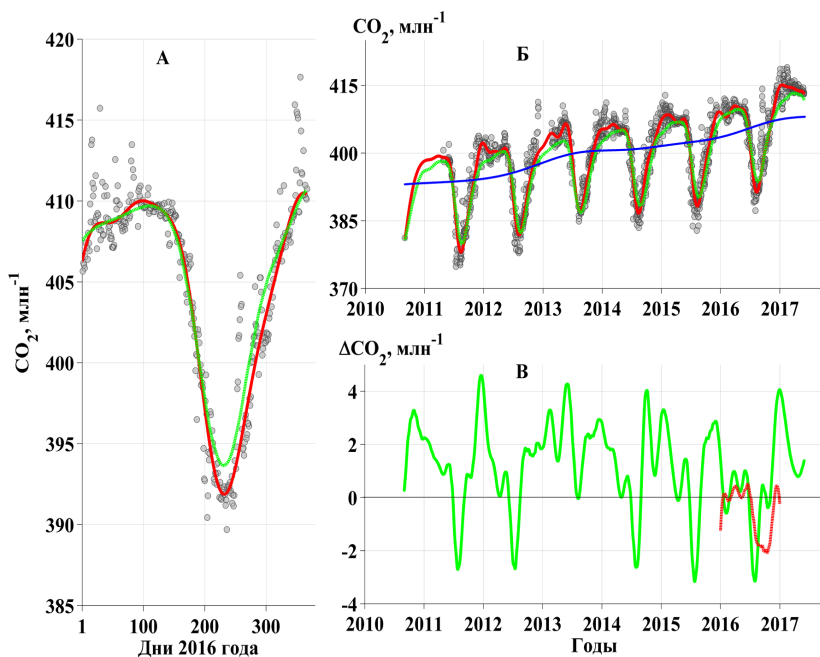


Рис. 4. Атмосферная концентрация CO₂ в Тикси и на Мысе Баранова.

А — Мыс Баранова: средние суточные значения CO₂ — кружки, годовой ход — красная кривая, MBL — зеленая кривая;

Б — Тикси: годовой ход средних суточных значений CO₂ — красная кривая, MBL — зеленая кривая, тренд — синяя кривая;

В — различие измеренных концентраций CO₂ и MBL в Тикси (зеленая кривая) и на мысе Баранова (красная кривая)

Работы по мониторингу парниковых газов выполнены в рамках тем 4.1 и 3.2 Плана НИТР Росгидромета.

Проверка сопоставимости данных лазерных спектрометров проведена в рамках ВИП ГЗ «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ».

Лазерные спектрометры G2401 и GLA131-GGA были приобретены в рамках федерального проекта «Развитие инфраструктуры для научных исследований и подготовки кадров» национального проекта «Наука и университеты».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Зинченко А. В., Парамонова Н. Н., Привалов В. И., Решетников А. И., Титов В. С. (2008). Оценка источников метана на основе измерений его концентрации в районе добычи газа на севере Западной Сибири // Метеорология и гидрология. № 1. С. 51–64.

Ивахов В. М., Парамонова Н. Н., Привалов В. И., Зинченко А. В., Лоскутова М. А., Махитас А. П., Кустов В. Ю., Лаурила Т., Аурела М., Асми Э. (2019). Атмосферная концентрация диоксида углерода на станциях Тикси и Мыс Баранова в 2010–2017 гг. // Метеорология и гидрология. № 4. С. 110–121.

Колобова А. В., Конопелько Л. А., Попов О. Г. (2020). Государственный первичный эталон единиц молярной доли, массовой доли и массовой концентрации компонентов в газовых и газоконденсатных средах ГЭТ 154-2019 // Эталоны. Стандартные образцы. Т. 16, № 3. С. 23–35. URL: doi.org/10.20915/2687-0886-2020-16-3-23-35.

Парамонова Н. Н., Привалов В. И., Ивахов В. М. (2023). Содержание CO₂ и CH₄ в атмосфере / в сб.: Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2022 г. — М.: Росгидромет. С. 29–31.

Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.10.2022 г. № 3240-р. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202211010041>.

Решетников А. И., Зинченко А. В., Яговкина С. В., Кароль И. Л., Лагун В. Е., Парамонова Н. Н. (2009). Исследования эмиссии метана на севере Западной Сибири // Метеорология и гидрология. № 3. С. 52–64.

РД 52.04.875-2019 (2020). Молярная доля метана и диоксида углерода в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений методом газовой хроматографии. — СПб: ООО «Амирит». 36 с.

Andrews A. E., Kofler J. D., Trudeau M. E., Williams J. C., Neff D. H., Masarie K. A., Chao D. Y., Kitzis D. R., Novelli P. C., Zhao C. L., Dlugokencky E. J., Lang P. M., Crotwell M. J., Fischer M. L., Parker M. J., Lee J. T., Baumann D. D., Desai A. R., Stanier C. O., De Wekker S. F. J., Wolfe D. E., Munger J. W., Tans P. P. (2014). CO₂, CO and

CH₄ Measurements from tall towers in the NOAA Earth System Research Laboratory's Global Greenhouse Gas Reference Network: instrumentation, uncertainty analysis and recommendations for future high-accuracy greenhouse gas monitoring efforts // *Atmospheric Measurement Techniques*. V. 7 (2). P. 647–687. DOI: 10.5194/amt-7-647-2014.

Bergamaschi P., Karstens U., Manning A. J., Saunois M., Tsuruta A., Berchet A., Vermeulen A. T., Arnold T., Janssens-Maenhout G., Hammer S., Levin I., Schmidt M., Ramonet M., Lopez M., Lavric J., Aalto T., Chen H., Feist D. G., Gerbig C., Haszpra L., Hermansen O., Manca G., Moncrieff J., Meinhardt F., Necki J., Galkowski M., O'Doherty S., Paramonova N., Scheeren H. A., Steinbacher M., Dlugokencky E. (2018). Inverse modelling of European CH₄ emissions during 2006–2012 using different inverse models and reassessed atmospheric observations // *Atmospheric chemistry and physics*. V. 18 (2). P. 901–920. DOI: 10.5194/acp-18-901-2018.

Brewer P. J., Kim J. S., Lee S., Tarasova O. A., Viallon J., Flores E., Wielgosz R. I., Shimozaka T., Assonov S., Allison C. E., Veen A. M. H. van der, Hall B., Crowell A. M., Rhoderick G. C., Hodges J. T., Mohn J., Zellweger C., Moossen H., Ebert V., Griffith D. W. T. (2019). Advances in Reference Materials and Measurement Techniques for Greenhouse Gas Atmospheric Observations // *Metrologia*. V. 56 (3). P. 034006. DOI: 10.1088/1681-7575/ab1506.

Flores E., Viallon J., Choteau T., Moussay P., Wielgosz R. I., Kang N., Kim B. M., Zalewska E., Veen A., Konopelko L., Wu H., Han Q., Rhoderick G., Guenther F. R., Watanabe T., Shimozaka T., Kato K., Hall B., Brewer P. (2015). International Comparison CCQM-K82: methane in air at ambient level (1800 to 2200) nmol/mol // *Metrologia*. V. 52 (1A). P. 08001. DOI: 10.1088/0026-1394/52/1A/08001.

Flores E., Viallon J., Choteau T., Moussay P., Idrees F., Wielgosz R. I., Lee J., Zalewska E., Nieuwenkamp G., Veen A. van der, Konopelko L. A., Kustikov Y. A., Kolobova A. V., Chubchenko Y. K., Efremova O. V., Zhe B. I., Zhou Z., Zhou Z., Jr W. R. M., Rhoderick G. C., Hodge J. T., Shimozaka T., Aoki N., Hall B., Brewer P., Cieciora D., Segal M., Macé T., Fűkő J., Szilágyi Z. N., Büki T., Jozela M. I., Ntsasa N. G., Leshabane N., Tshilongo J., Johri P., Tarhan T. (2019). CCQM-K120 (carbon dioxide at background and urban level) // *Metrologia*. V. 56 (1A). P. 08001. DOI: 10.1088/0026-1394/56/1A/08001.

Hazan L., Tarniewicz J., Ramonet M., Laurent O., Abbaris A. (2016). Automatic processing of atmospheric CO₂ and CH₄ mole fractions at the ICOS atmosphere thematic centre // *Atmospheric Measurement Techniques*. V. 9 (9). P. 4719–4736. DOI: 10.5194/amt-9-4719-2016.

Makarova M. V., Alberti C., Ionov D. V., Hase F., Foka S. C., Blumenstock T., Warneke T., Virolainen Y. A., Kostsov V. S., Frey M., Poberovskii A. V., Timofeyev Y. M., Paramonova N. N., Volkova K. A., Zaitsev N. A., Biryukov E. Y., Osipov S. I., Makarov B. K., Polyakov A. V., Ivakhov V. M., Imhasin H. K., Mikhailov E. F. (2021). Emission Monitoring Mobile Experiment (EMME): An Overview and First Results of the St. Petersburg Megacity Campaign-2019 // *Atmospheric Measurement Techniques*. V. 14 (2). P. 1047–1073. DOI: 10.5194/amt-14-1047-2021.

Masarie K. A., Pétron G., Andrews A., Bruhwiler L., Conway T. J., Jacobson A. R., Miller J. B., Tans P. P., Worthy D. E., Peters W. (2011). Impact of CO₂ measurement bias on CarbonTracker surface flux estimates // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. V. 116 (D17). P. D17305. DOI: 10.1029/2011JD016270.

O'Keefe A., Deacon D. A. G. (1988). Cavity Ring-down Optical Spectrometer for Absorption Measurements Using Pulsed Laser Sources // *Review of Scientific Instruments*. V. 59 (12). P. 2544–2551. DOI: 10.1063/1.1139895.

Peters W., Jacobson A. R., Sweeney C., Andrews A. E., Conway T. J., Masarie K., Miller J. B., Bruhwiler L. M. P., Pétron G., Hirsch A. I., Worthy D. E. J., Werf G. R. van der, Randerson J. T., Wennberg P. O., Krol M. C., Tans P. P. (2007). An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. V. 104 (48). P. 18925–18930. DOI: 10.1073/pnas.0708986104.

Tenkanen M., Tsuruta A., Rautiainen K., Kangasaho V., Ellul R., Aalto T. (2021). Utilizing Earth Observations of Soil Freeze/Thaw Data and Atmospheric Concentrations to Estimate Cold Season Methane Emissions in the Northern High Latitudes // *Remote Sensing*. 13 (24): 5059. DOI: 10.3390/rs13245059.

WMO GAW (1999). Guide on sampling and analysis techniques for chemical constituents and physical properties in air and precipitation as applied at stations of the Global Atmosphere Watch – Part 1: carbon dioxide / GAW Report № 134.

WMO GAW (2009). 15th WMO/IAEA Meeting of experts on carbon dioxide, other greenhouse gases and related tracers measurement techniques / GAW Report № 194.

WMO GAW (2017). WMO Global Atmosphere Watch (GAW) Implementation Plan: 2016–2023 / GAW Report № 228.

WMO GAW (2018). 19th WMO/IAEA Meeting of experts on carbon dioxide, other greenhouse gases and related tracers measurement techniques / GAW Report № 242.

Zellweger C., Emmenegger L., Firdaus M., Hatakka J., Heimann M., Kozlova E., Spain T. G., Steinbacher M., Schoot M. V. van der, Buchmann B. (2016). Assessment of recent advances in measurement techniques for atmospheric carbon dioxide and methane observations // *Atmospheric Measurement Techniques*. V. 9 (9). P. 4737–4757. DOI: 10.5194/amt-9-4737-2016.

Zhao C. L., Tans P. P., Thoning K. W. (1997). A high precision manometric system for absolute calibrations of CO₂ in dry air // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. V. 102 (D5). P. 5885–5894. DOI: 10.1029/96JD03764.

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА В ДЕЛЬТЕ ВОЛГИ В 2021 г.

Е. В. Гаврилова, И. В. Гонтовая

Каспийский морской научно-исследовательский центр
414045 Астрахань, ул. Ширяева, д. 14

Caspian Marine Research Center
414045 Astrakhan, Shiryeva st ., 14

E-mail: kaspnmiz@mail.ru

Поступила в редакцию 09.04.2024
Поступила после доработки 08.08.2024

Введение

Мониторинг и оценка текущих изменений гидрометеорологических условий являются одной из важных составляющих гидрометеорологического обеспечения региональных и территориальных органов власти, так как затрагивают в той или иной степени интересы практически любой отрасли экономики, а также социальной сферы Российской Федерации (Третий оценочный доклад, 2022).

Дельта Волги — одна из крупнейших в мире, ее площадь в настоящее время составляет около 49 тыс. км². Верхней границей дельты является район ответвления рукава Бузан, расположенный в 50 км к северу от Астрахани. Западная граница собственно дельты (без западных подстепных ильменей) проходит по правому берегу рукава Бахтемир до выхода на устьевое взморье, восточная граница проходит по левому берегу рукава Бузан. За морской край дельты принята условная граница между надводной дельтовой равниной и мелководной акваторией устьевского взморья (Устьевая область..., 1998).

Одним из проявлений глобального потепления на территории России является увеличение частоты опасных гидрометеорологических явлений. Неблагоприятным следствием глобального потепления является повышение засушливости климата на значительной территории России (Доклад, 2017; Третий оценочный доклад, 2022). Изучению гидрометеорологического режима дельты Волги посвящено немало исследований (Байдин и др., 1956; Полонский, Остроумова, 2007; Скриптунов, 1958; Устьева область Волги..., 1998).

Цель данной работы — анализ текущих метеорологических, гидрологических и ледовых процессов в дельте Волги в 2021 г. и оценка их изменения в условиях современного потепления.

Материалы и методы

Описание метеорологического режима проводилось по данным метеостанции М Астрахань за период 1922–2021 гг. Средние годовые значения температуры воздуха, ветра и атмосферных осадков рассчитывались за календарный год, сезонные — по календарным сезонам (зимний сезон включал декабрь предыдущего года). Аномалии средних месячных температур воздуха определены относительно нормы за период 1981–2010 гг. (<http://meteo.ru/126-trudy-vniigmi/trudy-vniigmi-mts-d-vypusk-178-2014-g/526-izmenenie-norm-osnovnykh-klimaticheskikh-parametrov-na-territorii-rossii-za-poslednie-desyatiletia>). В качестве дополнительных характеристик аномалий использовались порядковые статистики — ранги, т. е. порядковые номера в упорядоченном ряду значений.

Годовые и сезонные суммы осадков за период 1881–2021 гг. выражены в миллиметрах или в процентах нормы.

В качестве показателя изменения температуры воздуха и осадков был определен коэффициент линейного тренда, характеризующий среднюю скорость изменения и коэффициент детерминации, характеризующий долю учтенной трендом дисперсии ряда за весь период наблюдений.

Исходными материалами для характеристики стока послужили ежедневные данные о средних суточных и месячных расходах воды

по гидроствору (г/с) с. Верхнелебяжье, расположенного в вершине дельты Волги. За норму стока принято его среднее многолетнее значение за период зарегулированного стока (1962–2020 гг.). Основные параметры половодья в 2021 г. (даты наступления и окончания, продолжительность половодья, максимальные расходы воды и объем стока за половодье) даны в сравнении с многолетними данными с разделением на период естественного режима стока Волги (1942–1955 гг.) и период после зарегулирования стока (1962–2020 гг.).

Регулярные инструментальные наблюдения за уровнем воды в дельте Волги ведутся с середины XX в. Для характеристики уровня и ледового режима использованы данные о средних месячных уровнях воды и ежедневные наблюдения за ледовыми явлениями на 15-и гидрологических постах (ГП).

Результаты исследований и их обсуждение

По данным М Астрахань 2021 г. стал самым теплым за столетнюю историю метеонаблюдений. Средняя годовая температура воздуха составила +12,3 °С, что на 1,8 °С выше нормы, предыдущий рекорд отмечен в 2020 г. (+12,2 °С). Самым холодным годом остается 1929 г. (+7,7 °С).

Средняя температура воздуха зимой 2020/2021 гг. была в пределах климатической нормы. За весь период наблюдений самой теплой стала зима 2019/2020 гг. (+0,9 °С), самой холодной — зима 1953/1954 гг. (–11,2 °С).

Январь 2021 г. занял 4-е место в ранжированном ряду наблюдений (от наиболее теплого к наиболее холодному), аномалия составила 2,4 °С. В декабре 2020 г. температура была ниже нормы на 2,9 °С. Максимальная температура воздуха зимнего сезона зарегистрирована 12 февраля (+12,5 °С), минимальная — 24 февраля (–22,6 °С).

Весной аномалия температуры воздуха составила +1,8 °С. Температурный режим был неоднородным: аномалия в марте составила –0,5 °С, в апреле и в мае — соответственно +2,7 °С (7 ранг) и +3,2 °С (5 ранг).

Лето 2021 г. стало самым жарким с 1922 г. Средняя температура воздуха составила $+27,6^{\circ}\text{C}$ (аномалия $+3,3^{\circ}\text{C}$). Второе место занимает аномально-жаркое лето 2010 г. ($+27,5^{\circ}\text{C}$). Все три летних месяца характеризовались положительными аномалиями, достигающими $2,7\text{--}4,3^{\circ}\text{C}$. В августе установлен рекорд средней месячной температуры ($+28,3^{\circ}\text{C}$), предыдущий зафиксирован в августе 2014 г. ($+27,7^{\circ}\text{C}$), аномалии составили $4,3$ и $3,7^{\circ}\text{C}$ соответственно. В августе наблюдалось и аномальное повышение минимальной месячной температуры воздуха до $+16,8^{\circ}\text{C}$, предыдущий рекорд наблюдался в 1953 г. ($+16,0^{\circ}\text{C}$).

В июле и августе максимальная температура воздуха в дневные часы превышала $+40^{\circ}\text{C}$, достигнув критерия опасного явления (ОЯ). Максимальная температура воздуха в июле составила: $+40,6^{\circ}\text{C}$ (20.07), в августе — $+40,0^{\circ}\text{C}$ (4.08). Сильная жара наблюдалась в период установления в средней тропосфере меридионального переноса воздушных масс, следствием которого стал вынос на территорию Астраханской области теплого воздуха со стороны Средиземного моря и Ирана. 19 мая и 2 июня 2021 г. на юге Астраханской области наблюдалось редкое атмосферное явление — пыльная (песчаная) буря, которая также распространилась на отдельные районы Калмыкии и Дагестана (Гонтовая и др., 2023).

Средняя температура воздуха за осенний сезон была в пределах климатической нормы.

В 2021 г. было зафиксировано 6 волн тепла. Самая продолжительная наблюдалась в июне и длилась 8 дней (22.06–29.06). Отклонения среднесуточной температуры воздуха от среднемесячной составили $4,0\text{--}5,9^{\circ}\text{C}$. Наиболее интенсивная волна тепла зафиксирована в сентябре (01–02.09), отклонения температур составили $6,3\text{--}8,3^{\circ}\text{C}$, в период второй сентябрьской волны (14–15.09), аномалии температуры составили $4,5\text{--}4,7^{\circ}\text{C}$.

На рисунке 1 представлены графики векового хода средней годовой и сезонной температуры воздуха за период 1922–2021 гг. По данным метеостанции Астрахань за последние 100 лет повышение среднегодовой температура воздуха составляло $0,23^{\circ}\text{C}/10$ лет (вклад в общую изменчивость 41 %).

Наибольший рост температур наблюдается зимой $0,41\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$, наименьший осенью — $0,12\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$.

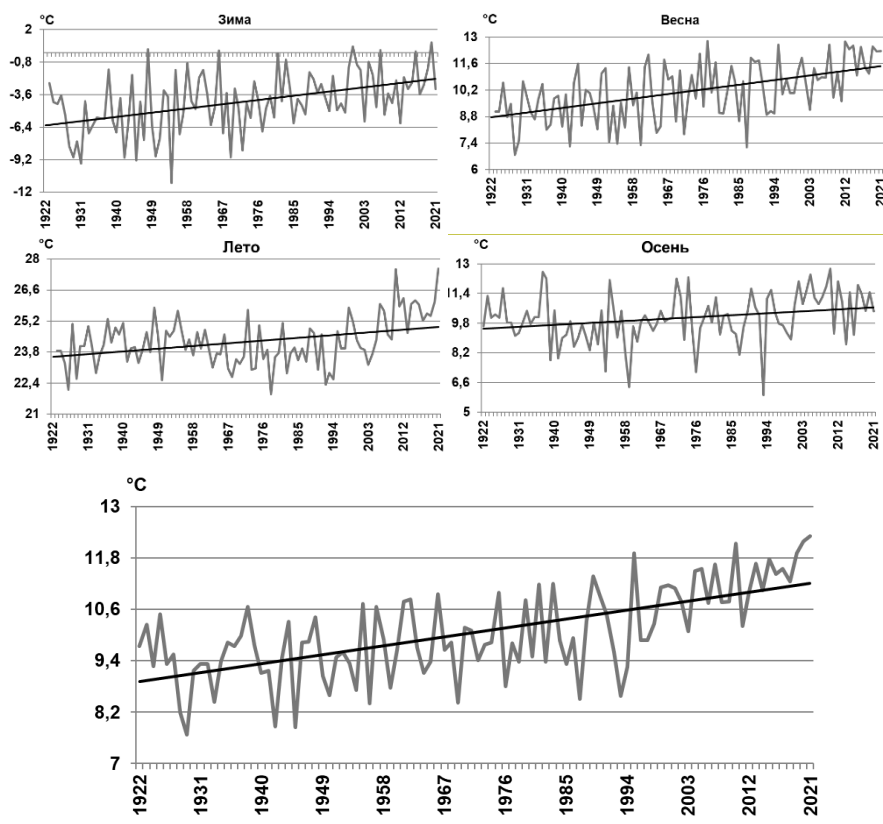


Рис. 1. Ход средней годовой и сезонной температуры воздуха на М Астрахань за период 1922–2021 гг.

По режиму увлажнения 2021 г. был «сухим». Годовая сумма осадков составила 161 мм (или 69 % от нормы). За период наблюдений (1881–2022 гг.) самым «сухим» остается 1962 г. (76,0 мм), самым влажным — 2016 г. (372,3 мм).

Зимой 2020/2021 гг. количество осадков было меньше нормы (67,3 %). В декабре 2020 г. и январе 2021 г. наблюдался дефицит

осадков — 2,5 и 37 % от нормы (2 и 25 ранг), в феврале — их избыток (199 % нормы, 18 ранг). Весной осадки составили 40 % нормы (27 ранг). Лето в целом было засушливым: в июне выпало 114 % нормы, в июле количество осадков составило лишь 9 % нормы (11 ранг), а в августе осадки вообще не выпадали. Осень была «влажной» (121 % нормы). В сентябре отмечался избыток осадков (285 % нормы, 9 ранг), в октябре осадков практически не было, в ноябре осадки составили 86 % нормы

На рисунке 2 представлены графики векового хода годовых и сезонных сумм осадков по данным М Астрахань за период 1881–2021 гг. Тренд годовых сумм осадков в целом положителен (4,2 мм/10 лет), вклад в общую изменчивость составил 8,1 %. Скорость изменения сезонных сумм осадков варьирует от 0,0 до 1,9 мм/10 лет. В осенний и весенний сезоны наблюдается увеличение сумм осадков на 1,4 и 1,9 мм/10 лет соответственно, вклад в общую изменчивость составил 5,5 и 5,7 %. В летний сезон статистически незначимое увеличение сумм осадков составило 0,8 мм/10 лет, вклад в общую изменчивость составил всего 0,9 %. Зимой за рассматриваемый период осадки не изменились.

2021 г. был маловодным. Годовой сток Волги по данным г/с Верхнелебязье составил 208 км³ при норме 242 км³. Максимальный средний годовой сток воды зафиксирован в 1994 г. (333 км³), минимальный — в 1975 г. (166 км³). Характерной особенностью водного режима в 2021 г. были низкие расходы в течение всего года.

15 февраля отмечен наименьший расход воды зимнего периода — 3910 м³/с, водность была на 28 % ниже нормы. Половодье началось 21 апреля, что в пределах нормы, закончилось 21 июня, средняя дата окончания половодья в условиях естественного стока — 5 августа, в период зарегулированного стока — 2 июля. Продолжительность половодья в 2021 г. в сравнении с периодом естественного стока сократилась на 47 суток, с периодом зарегулированного стока — на 11 суток. Объем стока за половодье в 2021 г. составил 80 км³ при норме 91 км³, а в условиях естественного стока — 147 км³.

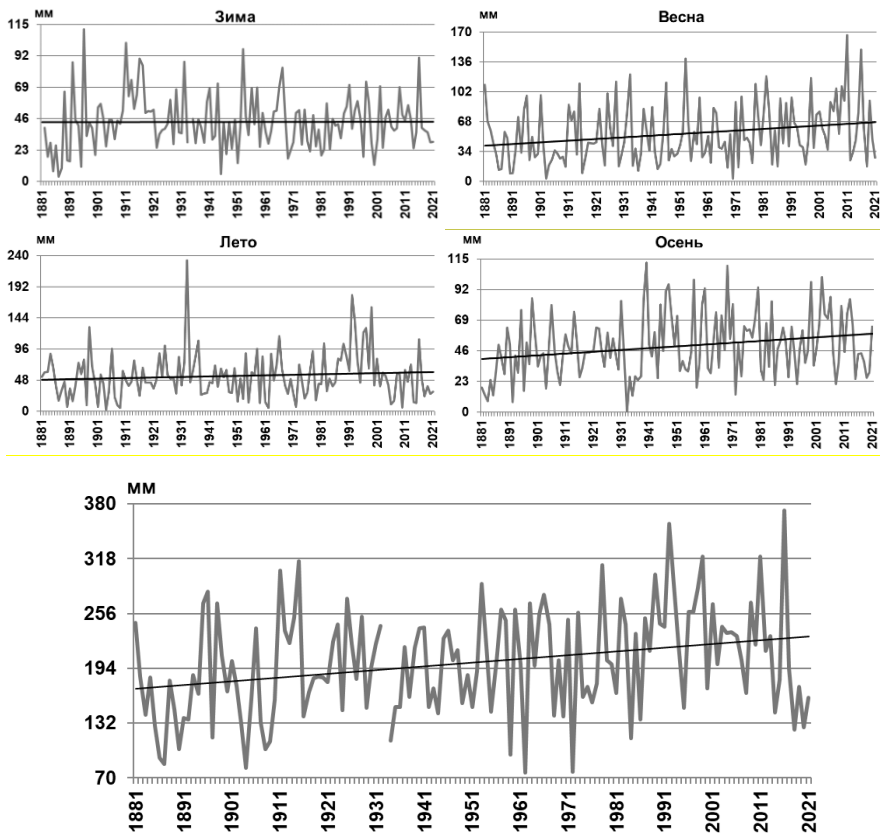


Рис. 2. Ход средних годовых и сезонных сумм осадков на М Астрахань с линейным трендом за период 1881–2021 гг.

Максимальный объем стока за половодье отмечен в 1947 г. (225 км^3), минимальный — в 1975 г. (34 км^3). В 2021 г. пик половодья наблюдался 8 мая ($19700 \text{ м}^3/\text{с}$), в среднем максимальный расход половодья в период естественного стока проходил 4 июня, после зарегулирования стока — 16 мая. Самая ранняя дата наступления пика половодья в естественных условиях — 22 мая (1951 г.), после зарегулирования — 29 апреля (1990 г. и 2007 г.). Доля стока

за половодье в общем объеме годового стока в 2021 г. составила 38 %, что в пределах нормы, в естественных условиях — 60 %.

Уровень воды в дельте Волги определяется ее стоком. В течение года в водотоках дельты уровень воды был понижен и только в мае он достигал нормы. Причиной снижения уровня стало маловодье. С января по март средние месячные уровни воды в дельте Волги были ниже нормы на 20–107 см, в апреле — на 42–73 см, в летне-осеннюю межень отклонения от нормы составляли 21–82 см. На рисунке 3 приведен график уровней воды в 2021 г. в сравнении с периодом зарегулированного стока (1962–2020 гг.) по данным ГП-1 с. Верхнелебяжье.

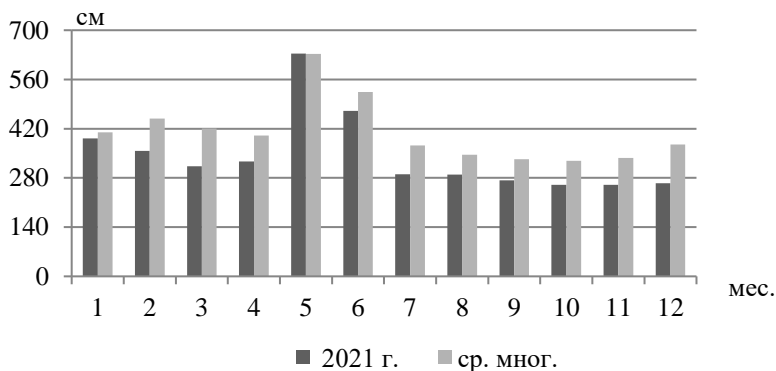


Рис. 3. Средний месячный уровень воды по данным ГП-1 с. Верхнелебяжье за 2021 г. в сравнении с периодом зарегулированного стока (1962–2020 гг.)

В 2021 г. минимальные месячные уровни в дельте Волги опустились до рекордно низких отметок за все время наблюдений. На ГП Икряное рекордами стали минимальные уровни в феврале 181, сентябре 173 и октябре 170 см; на ГП Астрахань — в сентябре 214 и октябре 211 см; на ГП Оля — в апреле 124, в сентябре 118, октябре 116, ноябре 117 см, в июне и августе были повторены рекорды 2019 г. 144 и 138 см.

В октябре минимальные месячные уровни в Оля, Икряном и Астрахани приближались к критериям ОЯ «низкая межень», всего на 6, 10 и 11 см (соответственно) не достигая значения ОЯ.

Температурные условия воды в водотоках дельты Волги определяются в основном климатическими условиями района и волжским стоком. Как отмечалось выше, 2021 г. был аномально-теплый, к тому же низкие меженные уровни воды, вызванные пониженным стоком, способствовали интенсивному прогреву воды в водотоках дельты. На всех постах с апреля по сентябрь отмечались положительные аномалии. Наиболее значительные отклонения отмечены в летнюю межень: в июле аномалии составили +1,7...+2,7 °С, в августе — +1,4...+2,6 °С. Значительное потепление наблюдалось и в апреле (+0,6...+2,1 °С).

Первые ледовые явления в виде заберегов, сала, шугохода, густого и редкого ледохода появились 3–9 декабря 2020 г. Наиболее ранние даты начала ледовых процессов за весь период наблюдений приходятся на первую декаду ноября (9.11.1953 г., 10.11.1993 г.).

На ГП Зеленга ледообразование сопровождалось заторными явлениями. Затор наблюдался с 7 декабря 2020 г. по 3 февраля 2021 г., продолжительность составила 57 суток. В период естественного стока заторные явления в дельте Волги не наблюдались.

Во второй и третьей декадах декабря образовался ледостав. Продолжительность ледостава составила 55–96 суток. Максимальная продолжительность ледостава (124–132 суток) наблюдалась в аномально-холодные зимы (1993/1994 гг., 1953/1954 гг.). Толщина льда в конце января в водотоках дельты составила 10–18 см при норме 29–30 см. Первая половина февраля была аномально теплой. 11 и 12 февраля максимальная температура воздуха в дневные часы повышалась до + 10,8...+ 12,5 °С. В водотоках дельты наблюдалось ослабление ледовой обстановки. В период оттепели на ГП Оля, Камызяк в течение 4–6 дней наблюдалось полное очищение ото льда. Во второй половине февраля с затоком холодного воздуха установилась морозная погода. 24, 25 февраля минимальная температура воздуха опускалась до –20,6...–22,8 °С. Процессы ледообразования возобновились, наблюдался ледостав, несплошной

ледостав, ледостав с наледью, ледостав с торосами. 25 февраля по данным ГП г. Нариманов, с. Килинчи толщина льда составила 16 см. Наибольшая толщина льда (30 см) наблюдалась 25 февраля на ГП Володарский (рук. Бузан, пр. Чурка). В середине марта появились забереги, средний и редкий ледоход, протоки. Во второй половине третьей декады водотоки полностью очистились ото льда. Продолжительность ледовых явлений в 2020/2021 гг. составила 85–116 суток. В аномально–холодные зимы (1953/1954 гг., 1993/1994 гг.) продолжительность возрастала до 137–154 суток.

Заключение

2021 г стал самым теплым годом, а лето самым жарким за всю историю метеонаблюдений. Скорость роста среднегодовой температуры воздуха составила 0,23 °C/10 лет. В осенний и весенний сезоны прослеживается статистически значимое увеличение осадков. В целом же количество атмосферных осадков за весь период наблюдений (с 1881 г.) увеличивается в среднем на 4,2 мм/10 лет.

В течение года в дельте Волги наблюдался пониженный фон уровня воды, причиной которого стало маловодье. Водность по данным г/с Верхнелебяжье была ниже нормы на 14 %.

На всех постах в дельте Волги с апреля по сентябрь отмечались большие положительные аномалии температуры воды. На фоне глобального потепления данная тенденция, скорее всего, будет сохраняться.

В зиму 2020/2021 гг. в результате оттепелей процесс ледообразования в дельте Волги носил прерывистый характер. Очищение водотоков ото льда произошло на 5 суток раньше средних многолетних сроков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Байдин С. С., Линберг Ф. Н., Самойлов И. В. (1956). Гидрология дельты Волги. — Л.: Гидрометеиздат. 331 с.

Гонтовая И. В., Татарников В. О., Очеретный М. А. (2023). Анализ условий возникновения пыльных бурь на территории Астраханской области в 2021 году // Метеорология и гидрология. № 3. С. 119–128.

Доклад об особенностях климата на территории российской федерации за 2021 год, (2022). — М.: Росгидромет. 104 с.

Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации, (2017). — СПб: ООО «Амирит». 106 с.

Полонский В. Ф., Остроумова Л. П. (2008). Изучение параметров затопления дельты Волги и ее водно-балансовое моделирование / Водные ресурсы Волги: настоящее и будущее, проблемы управления. Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. 3–5 октября 2007 г. — Астрахань: Астраханский университет. С. 263–273.

Полонский В. Ф., Остроумова Л. П. (2008). Исследование гидрологического режима дельты Волги / Водные ресурсы Волги: настоящее и будущее, проблемы управления. Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. 3–5 октября 2007 г. — Астрахань: Астраханский университет. С. 274–290.

РД 52.27.724-2019. (2019). Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. — М.: ФГБУ «Гидрометцентр России». 66 с.

Скриптунов Н. А. (1958). Гидрология предустьевого взморья Волги. — М.: Гидрометеиздат. 143 с.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2022) / под ред. В. М. Катцова. — СПб: Научное издание. 676 с.

Устьевая область Волги: гидролого-морфологические процессы, режим загрязняющих веществ и влияние колебаний уровня Каспийского моря (1998) / Отв. ред.: В. Ф. Полонский и др. — М.: ГЕОС. 278 с.

УДК 551.510.534

О критериях качества воздуха и их применении в целях мониторинга и охраны атмосферного воздуха. Чичерин С. С. Труды ГГО. 2024. Вып. 612. С. 6–36.

Показано, что предельно допустимые концентрации (ПДК) служат для разнородных функций – гигиенической (оценка качества воздуха) и регуляторной (нормативы допустимых выбросов). Совмещение этих функций снижает целостность и эффективность государственной политики по улучшению качества воздуха. Представлены рекомендации по установлению целевых (промежуточных) нормативных показателей качества воздуха с указанием сроков их поэтапного повсеместного достижения.

Ключевые слова: охрана атмосферного воздуха, предельно допустимые концентрации, государственная политика.

Табл. 5. Ил. 1. Библ. 31.

Совместное использование детерминистической и стохастической моделей для прогнозирования загрязнения воздушного бассейна городов.

Генихович Е. Л., Кириллова В. И., Румянцев Д. Ю., Яковлева Е. А., Павлов И. Н., Булавина Е. В. Труды ГГО. 2024. Вып. 612. С. 37–81.

Описан новый метод оперативного прогнозирования для городов неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) и суточных максимумов концентраций загрязняющих веществ, основанный на совместном использовании данных моделирования с помощью стохастической модели и детерминистической численной химической транспортной модели (ХТМ). В качестве предикторов используются данные инструментального мониторинга загрязнения атмосферы, а также до тридцати предикторов, которыми задается синоптическая, аэрологическая и метеорологическая информация. Синтез информации, полученной с использованием детерминистического и стохастического моделирования, а также наблюдений за состоянием и загрязнением окружающей среды, осуществляется на основе стохастической модели. При этом значимые предикторы отбираются с применением пошаговой регрессии. Разработанный метод предназначен для прогнозирования так называемого параметра Р (значения этого параметра используются при принятии решения о выдаче прогноза НМУ), а также суточных максимумов концентрации загрязняющих веществ.

Апробация метода проведена в режиме хиндкастинга с использованием пятилетних рядов наблюдений для региона Хакасии (города Абакан, Черногорск и Саяногорск), города Красноярска, а также города Атырау (Казахстан). Численное моделирование осуществлялось с применением химической транспортной модели ХТМ_ГГО, а в качестве метеорологического драйвера использовалась модель прогноза погоды WRF.

Подтверждена возможность использования разработанного метода для восстановления/прогнозирования рассматриваемых показателей загрязнения атмосферы в точках, для которых данные инструментального мониторинга отсутствуют. При этом сделан вывод о том, что погрешность такого восстановления зависит от расположения этих точек относительно пунктов размещения постов мониторинга.

Ключевые слова: Неблагоприятные метеорологические условия, метод прогнозирования, концентрация загрязняющих веществ, стохастическая модель, детерминистическая численная химическая транспортная модель.

УДК 551.58

Специализированная климатическая информация для подготовки региональных планов адаптации к изменению и изменчивости климата (на примере Новосибирской области). Фасолько Д. В., Ключева М. В., Самойлова Е. П., Федорова Е. Н., Разова Е. Н., Акентьева Е. М. Труды ГГО. 2024. Вып. 612. С. 82–108.

Представлены результаты анализа влияния наблюдаемых и ожидаемых изменений климатических показателей на объекты и процессы в строительном и транспортном секторах экономики, а также в здравоохранении Новосибирской области с целью выявления наиболее значимых погодноклиматических рисков. Данная работа выполнялась с целью апробации Методических рекомендаций по учету климатической информации при формировании региональных планов адаптации к изменению климата на уровне субъектов РФ.

Ключевые слова: изменение климата, климатические риски, адаптация, транспортный сектор, строительный сектор, здоровье населения, Новосибирская область.

Табл. 2. Ил.11. Библ. 26.

Взаимосвязь между молниевой активностью грозового облака и образованием и распределением града и крупы. Веремей Н. Е., Торопова М. Л., Куров А. Б., Довгалюк Ю. А., Михайловский Ю. П., Синькевич А. А. Труды ГГО. 2024. Вып. 612. С. 109–124.

Работа посвящена исследованию особенностей электрической структуры конвективного грозового облака. Рассмотрен пример случая образования и развития грозо-градового процесса на Северо-Западе России 9 июня 2020 г.

Выполнено трехмерное численное моделирование эволюции конвективного облака для условий, наблюдавшихся в указанный день. Исследована эволюция электрической структуры облака. Получено, что распределение зарядов в облаке показывает многослойную структуру на стадии максимального развития — во время начала электрических зарядов и наибольшей интенсивности осадков. При дальнейшем развитии облака количество слоев заряда уменьшается. Области экстремумов напряженности электрического поля расположены между слоями заряда. Наибольшие значения напряженности поля находятся вблизи основного заряда в облаке, как и повышенные концентрации градин.

Ключевые слова: конвективное облако, электрический заряд, осадки, град, крупа, электрическое поле.

Таб. 1. Ил. 2. Библ. 41.

УДК 551.594

Оценка мощности глобальных и локальных токовых генераторов по электродинамическим параметрам приземного слоя. Тимошенко Д. В., Куповых Г. В. Труды ГГО. 2024. Вып. 612. С. 125–135.

В качестве математической модели рассматривается уравнение полного тока в приземном слое атмосферы, описывающее поведение напряженности электрического поля как результат действия совокупности глобального грозового, локальных турбулентного и конвективного токовых генераторов.

Для оценки вкладов токовых генераторов в качестве параметра использована плотность мощности источника. Отдельно рассмотрено влияние глобального (грозового) генератора, локальных токовых генераторов (конвективного и турбулентного), действующих в приземном слое, а также их совместное действие. Исследованы физические механизмы действия локальных токовых генераторов и их связь с электрическим полем, токами различного происхождения и объемным электрическим зарядом на разных высотах.

Ключевые слова: приземный слой, атмосфера, глобальный грозовой генератор, конвективный токовый генератор, турбулентный токовый генератор, плотность мощности токового источника.

Таб. 2. Ил. 2. Библ. 10.

УДК 551.510

Многолетние тенденции и современные изменения параметров атмосферного электричества. Занюков В. В., Зайнетдинов Б. Г., Соколенко Л. Г. Труды ГГО. 2024. Вып. 612. С. 136–154.

В работе подведен итог 10-летней работы автоматизированной и расширенной сети наблюдений за электрическими характеристиками атмосферы (ЭХА) на территории Российской Федерации. Полученные результаты сравниваются с многолетними рядами данных об атмосферном электричестве. Показана динамика ЭХА за период свыше 60 лет. Отдельно рассматривается вопрос влияния аэрозольных частиц субмикронного диапазона на электрическое состояние приземного слоя атмосферы.

Ключевые слова: атмосферное электричество, напряженность электрического поля атмосферы, электрическая проводимость воздуха, атмосферный аэрозоль, ионизация.

Ил. 12. Библ. 11.

УДК 551.510.41; 551.501.6

Мониторинг парниковых газов в России по программе «ГСА» ВМО: обеспечение сопоставимости данных наблюдений. Парамонова Н. Н., Привалов В. И., Ивахов В. М., Зинченко А. В. Труды ГГО. 2024. Вып. 612. С. 155–174.

Рассмотрены вопросы обеспечения сопоставимости данных наблюдений на станциях, проводящих мониторинг ПГ в Российской Федерации. Высокоточные измерения концентрации дают возможность получить характеристики изменчивости глобального поля концентрации ПГ, оценить влияние источников природного и антропогенного происхождения, выполнить проверку оценок эмиссии ПГ, полученных путем инвентаризации, а также объединить разрозненные локальные данные об эмиссии ПГ в цельную замкнутую систему.

Изложены требования к сопоставимости данных и особенности реализации методики измерения различными методами (оптико-акустическими, газохроматографическими, внутривибрационной лазерной спектроскопии). Приведены примеры достигнутой сопоставимости данных и результаты, полученные на основе высокоточных сопоставимых данных.

Ключевые слова: парниковые газы, диоксид углерода, метан, мониторинг, методы измерений, сопоставимость данных.

Табл. 2. Ил. 4. Библ. 32

УДК 551.582.1

Особенности гидрометеорологического режима в дельте Волги в 2021 г. Гаврилова Е. В., Гонтовая И. В. Труды ГГО. 2024. Вып. 612. С. 175–186.

Приводится информация об особенностях климата в дельте Волги в 2021 г., который вошел в шестерку самых маловодных лет за последнюю четверть века и стал самым теплым за столетнюю историю метеонаблюдений. Впервые за весь период наблюдений наблюдалась пыльная буря в виде вала. Описаны особенности развития и изменения основных метеорологических элементов, гидрологических и ледовых условий. Дана оценка изменения климатических элементов за многолетний период в дельте Волги.

Ключевые слова: климат, изменение, пыльная буря, тенденции, сток, маловодье, уровень, ледовые условия.

Ил. 3. Библ. 10.

On ambient air quality criteria and their applications for monitoring and air protection. Chicherin S. S. Proceedings of MGO. 2024. V. 612. P. 6–36.

It is shown that maximum permissible concentrations (MPC) served for different functions – a hygienic function (air quality assessment) and a regulatory one (permissible emission norm). Combining these functions reduces the integrity and effectiveness of government policies to improve air quality. Recommendations are presented on establishing target (intermediate) regulatory air quality indicators and obligatory date to meet them everywhere.

Keywords: ambient air protection, concentration limit values, state policy.

Tab. 5. Fig. 1. Ref. 31.

Joint use of deterministic and stochastic models in forecasting the urban air pollution Genikhovich E. L., Kirillova V. I., Rumyantsev D. Yu., Yakovleva E. A., Pavlov I. N., Bulavina E. V. Proceedings of the GGO. 2024. V. 612. P. 37–81.

This article describes a new method referred to as Data Fusion Method (DFM_MGO). It is intended for operational forecasting of the unfavorable meteorological conditions (UMC), which could lead to accumulation of atmospheric pollutants in the urban surface layer as well as enhanced daily maxima of concentrations of the pollutants. The methodology includes the use of the stochastic model, which is developed using the *big data* approach and trained on the datasets of meteorological, synoptical, aerological and air-pollution data. It includes also the use of the chemical transport model (CTM), which generates, operating in the hindcast regime, the data set of calculated concentrations of the pollutants. The forecasting scheme is constructed as a result of the fusion of all datasets available using the stochastic model as a tool for the fusion.

The described Data Fusion Method has been used for development of the operational schemes for predicting the UMC and daily maximum concentrations in three cities located in the region of Khakasia (Minusinsk Hollow, Russia), the city of Krasnoyarsk (Russia) and the city of Atyrau (Kazakhstan). The article presents the correlation graphs of actual and forecasted values of the characteristics under consideration, as well as tables with the quantitative estimates of various indicators of performance of the schemes. They confirm that the developed schemes outperform the “purely stochastic ones”. The method could also be used for reconstruction of concentration at the receptor points, where air pollution monitoring was not carried out. It is demonstrated that the efficiency of such a reconstruction depends on the location of a receptor point relative to the existing monitoring network.

Keywords: unfavorable meteorological conditions, concentrations of the pollutants, new method, stochastic model, chemical transport model.

Tab. 7. Fig. 9. Ref. 39.

Tailored climate information for the preparation of regional adaptation plans to climate change and variability (the case of the Novosibirsk region).

Fasolko D. V., Klueva M. V., Samoilova E. P., Fedorova E. N., Razova E. N., Akentyeva E. M. Proceedings of the GGO. 2024. V. 612. P.82–108.

The results from the analysis of the impact of observed and expected changes in climate indicators on the objects and processes in the construction and transport economy sectors, as well as in healthcare in the Novosibirsk region are presented in order to identify the most significant weather and climate risks. This work was carried out with the aim of trialability the Methodological Recommendations for taking into account climate information when forming regional plans for adaptation to climate change at the level of the RF regions.

Keywords: climate change, climate risks, adaptation, transport sector, construction sector, public health, Novosibirsk region.

Tab. 2. Fig. 11. Ref. 26.

The relationship between thunderstorm lightning activity and formation and distribution of hail. Veremei N. E., Toropova M. L., Kurov A. B., Dovgaluk Yu. A., Mikhailovskii Yu. P., Sin'kevich A. A. Proceedings of the GGO. 2024. V. 612. P. 109–124.

The paper is devoted to the investigation of the features of thunderstorm electrical structure. The case study of formation and development of thunderstorm with hail in North-West of Russia (2020 June 9) was carried out.

Three-dimensional simulation of convective cloud evolution for observed conditions was performed. The cloud electric structure evolution was investigated. It was obtained that charge distribution in the cloud has a multilayer structure at the stage of maximum development (during the onset of electric charges and the greatest intensity of precipitation). A number of charge layers decreases during further cloud development. Areas of electric field strength extremes are located between the charged layers. The greatest values of the electrical field strength are located near the main charge in the cloud, as well as increased concentrations of hailstones.

Keywords: convective cloud, electric charge, electric field, precipitation, hail, graupel.

Tab. 1. Fig. 2. Ref. 41.

The estimation of global and local current generators power by surface layer electrodynamic parameters. Timoshenko D. V., Kupovykh G. V. Proceedings of the GGO. 2024. V. 612. P. 125 – 135.

As a mathematical model, the equation of the total current in the atmospheric surface layer is considered, describing the behavior of the electric field as a result of the global thunderstorm, local turbulent and convective current generators combination action.

To evaluate the contributions of current generators, a parameter is used - the source power density. The influence of a global (thunderstorm) generator, as well as local current generators (convective and turbulent) operating in the surface layer, as well as their combined action, is considered separately. The physical mechanisms of the local current generators action and their connection with an electric field, currents of various origins and a space electric charge at different heights are investigated.

Keywords: surface layer, atmosphere, global thunderstorm generator, convective current generator, turbulent current generator, current source power density.

Tab. 2. Fig. 2. Ref. 10.

Long-term trends and recent changes in atmospheric electricity parameters. Zanyukov V. V., Zaynetdinov B. G., Sokolenko L. G. Proceedings of the MGO. 2024. V. 612. P. 136–154.

The paper summarizes the results of a 10-year operation of an automatic extensive atmospheric electricity monitoring network for atmospheric electricity characteristics (AEC) observation in the territory of the Russian Federation. The obtained results are compared with long-term series of atmospheric electricity data. It is shown the dynamics of AEC changing during over more than 60 years. The issue of the influence of aerosol particles of the submicron range on the electrical state of the near surface layer of the atmosphere is considered separately.

Keywords: atmospheric electricity, electric field intensity of the atmosphere, air electrical conductivity, atmospheric aerosol, ionization.

Fig. 12. Ref. 11.

Greenhouse Gas Monitoring in Russia under the WMO GAW Program: Ensuring Comparability of Observational Data. Paramonova N. N., Privalov V. I., Ivakhov V. M., Zinchenko A. V. Proceedings of the GGO. 2024. V. 612. P. 155–174.

The article considers the issues of ensuring comparability of observational data at stations that perform or start GHG monitoring in the Russian Federation. High-precision concentration measurements make it possible to obtain characteristics of the variability of the global GHG concentration field, assess the impact of natural and anthropogenic sources, verify GHG emission estimates obtained through sources inventory, and combine disparate local data on GHG emissions into integrated closed system.

The article presents the requirements for data comparability due to the tasks set, ways to achieve it, as well as the features of the implementation of the measurement methodology for various methods (optical-acoustic, gas chromatographic, cavity ring-down spectroscopy). Examples of achieved data comparability are presented and the results obtained on the basis of highly accurate comparable data are shown.

Keywords: greenhouse gases, carbon dioxide, methane, monitoring, measurement methods, data comparability.

Tab. 2. Fig.4. Ref. 32

Features of the hydrometeorological regime in the Volga delta in 2021
Gavrilova E. V., Gontovaya I. V. Proceedings of the GGO. 2024. V. 612. P. 175–186.

Information on climate characteristics in the Volga Delta in 2021, which entered in the six years of low water in the last quarter century and became the warmest in the 100 year history of weather observations, for the first time in the entire observation period a dust storm was observed in the form of a trough is provided. Description of the characteristics of development and variability of various meteorological elements, hydrological and ice conditions, assessment of change of climatic elements over a long period in the Volga Delta is given. Key weather: climate, change, dust storm, trends, run-off, low water level, ice conditions.

Keywords: climate, change, dust storm, trends, flow, low water, level, ice conditions.

Fig. 3. Ref. 10.

Сборник научных трудов
Труды ГГО. Вып. 612

Подписано в печать 17.09.24. Формат 60x84/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Печ. л. 12,375. Тираж 300 экз. Заказ №2224.

Изготовлено в ООО «Д'АРТ».

194044, Санкт-Петербург, Пироговская наб., д. 17 к. 6, литера А, помещ. 8.