

Федеральная служба
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ТРУДЫ
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
им. А. И. Воейкова

Выпуск

610

Под редакцией
д-ра физ.-мат. наук В. М. Катцова,
д-ра физ.-мат. наук В. П. Мелешко

Санкт-Петербург
2023

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. Акентьева, 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»
2023

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>Г. Б. Пигольцина, В. А. Задворных, Д. В. Фасолько,</i> Климатическое районирование Новосибирской области.	8
<i>Е. Д. Надёжина, И. М. Школьник, А. В. Стернзат,</i> <i>А. А. Пикалёва.</i> Моделирование влияния региональных климатических воздействий на фактическое испарение на территории Европейской территории России.	25
<i>М. С. Загайнова, К. В. Иванченко, С. С. Чичерин,</i> <i>В. П. Челибанов, И. С. Яновский</i> Об использовании устройств на основе малобюджетных датчиков для измерения концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе.	48
<i>А. Д. Зив.</i> Эффективные схемы расчета максимальных разовых концентраций при нестационарности и асинхронности выбросов источников и с учетом движущихся источников.	77
<i>А. С. Иманова, С. П. Смышляев, Е. В. Розанов,</i> <i>В. А. Фролькис</i> Изменение озонового слоя и других параметров стратосферы Антарктиды в будущем, рассчитанных по данным модели SOCOL V4.	102
<i>Б. Г. Зайнетдинов.</i> Критерии выборки данных об атмосферном электричестве для полярных регионов в целях автоматизации их обработки и контроля.	113
<i>П. С. Зименков,</i> Новый подход к передаче единицы измерения метеорологической оптической дальности нефелометрам.	126
<i>А. Г. Стародубов, В. С. Яковлев, А. А. Родионов.</i> Имитатор рассеянного атмосферным аэрозолем светового потока для тестирования датчиков нефелометрического типа.	138

<i>А. Х. Будаев.</i> Исследования удельного электрического заряда на частицах оксида цинка.	148
<i>С. Л. Алита, Ж. Ю. Аннаева, В. А. Шаповалов.</i> Экономические аспекты применения мобильных пунктов воздействия в Ставропольской противорадовой службе.	160
<i>С. Л. Алита, К. Б. Лиев.</i> О возможном способе применения мобильных пунктов воздействия на градовые процессы в Краснодарской противорадовой службе.	171

CONTENTS

<i>G.B., Zadvornyykh V.A., Faselko D.V. Climatic zoning of the Novosibirsk region.</i>	8
<i>Nadyozhina E. D., Shkolnik I. M., Sternzat A. V., Pikaleva A. A. Modeling of regional climate impacts on actual evaporation over the European part of Russia... ..</i>	25
<i>Zagainova M. S., Ivanchenko K. V., Chicherin S. S., Chelibanov V. P., Yanovsky I. S. The use of devices based on low-cost sensors to measure concentrations of pollutants in the atmospheric air.</i>	48
<i>Ziv A. D. Effective schemes for calculating maximum single concentrations with non-stationary and asynchronous emissions of sources and considering the moving sources.</i>	77
<i>Imanova A. S., Smyshlyayev S. P., Rozanov E. V., Frolkis V. A. Possible changes in the total ozone content and other parameters of the Antarctic stratosphere according to the SOCOL v4 model.</i>	102
<i>Zaynetdinov B. G. The Criteria for sampling data on atmospheric electricity for the Polar regions in order to automate their processing and control.</i>	113
<i>Zimenkov P. S. A new approach for transferring units of measurement of meteorological optical range to nephelometers.</i>	126
<i>Starodubov A. G., Yakovlev V. S., Rodionov A. A. The imitator of light scattered by aerosol for testing nephelometer type sensors.</i>	138
<i>Budaev A. Kh.. Studies of the specific electric charge on zinc oxide particles.</i>	148

<i>Alita S. L., Appaeva Zh. Yu., Shapovalov V. A.</i> Economic aspects of application of mobile impact points in Stavropol anti-hail service.	160
<i>Alita S. L., Live K. B.</i> Method of using mobile points of influence on hail processes in the Krasnodar anti-hail service. .	171

КЛИМАТИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

Г. Б. Пигольцина., В. А. Задворных., Д. В. Фасолько

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

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021, St. Petersburg, Karbysheva st., 7

E-mail: pigoltsina@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.10.2023
Поступила после доработки 21.11.2023

Введение

Оперативное климатическое обслуживание различных секторов экономики ориентировано на решение отдельных текущих практических задач. Этот вид обслуживания основан на использовании базовой справочной и нормативной информации, к которой относится и разномасштабное климатическое районирование отдельных областей. Однако в большинстве случаев представленные в литературе сведения по районированию и анализу климатических условий относятся к периоду, оканчивающемуся в 70-х годах XX в.

За прошедшие с того времени десятилетия в условиях глобального потепления значения климатических показателей существенно изменились. Использование устаревшей информации о климате при принятии хозяйственных решений может приводить к большим потенциальным и реальным потерям. В связи с этим назрела острая необходимость обновления данных о климатических ресурсах конкретных территорий.

Новосибирская область — один из основных экономических районов Российской Федерации. Характерной чертой климата данной территории является высокая континентальность, глубокие инверсии температуры в течение всего холодного периода, большие годовые и суточные амплитуды температуры воздуха (Орлова, 1962; Новосибирская область..., 1978). В таких условиях при климатическом районировании области необходим комплексный учет особенностей летнего и зимнего периодов. Несмотря на практическую значимость такого районирования, оно до настоящего времени не проводилось. В литературе для Новосибирской области представлено лишь агроклиматическое (Агроклиматические ресурсы..., 1971) и природно–климатическое районирование (Сляднев, 1965; Почвенно–климатический..., 1978).

В данной статье представлены результаты климатического районирования Новосибирской области, выполненного на основе оценки пространственной изменчивости комплекса базовых и специализированных климатических показателей по статистическим данным метеостанций (по 2021 г. включительно).

Физико–географические особенности территории

Новосибирская область расположена в центральном регионе нашей страны и занимает площадь 177756 км² (1,04 % территории Российской Федерации). Протяженность ее с востока на запад составляет 642 км, с севера на юг — 444 км. Область граничит на западе с Омской, на севере с Томской, на востоке с Кемеровской областями, на юге с Алтайским краем, на юго–западе с Республикой Казахстан. Область разделена на 30 муниципальных районов.

Территория Новосибирской области расположена в южной части Западной Сибири в междуречье Оби и Иртыша. На востоке области тянутся увалы Салаирского кряжа и хребет Сокур. Часть Западно–Сибирской низменности к востоку от Иртыша называют Барабинской или просто Барабой. Это — огромная равнинная территория, составляющая большую часть области. Рельеф Барабы плоский, слабо

пересеченный. Платообразная поверхность слегка наклонена с северо-востока на юго-запад. Наиболее пониженные участки с высотами менее 110–120 м занимают западную часть низменности. В несколько приподнятой восточной ее половине отметки плоских междуречных увалов достигают 120–150 м. С востока низменность защищена отрогами Салаирского кряжа и Кузнецкого Ала-Тау.

Северная часть низменности — равнинная, центральная и южная части носят гривно-котловинный характер. Вытянутые на протяжении нескольких километров крупные гривы высотой 10–12 м разделены обширными межгривными понижениями и замкнутыми котловинами, поверхность которых обычно заболочена или занята зарастающими озерами.

Барабинскую низменность с востока и юго-востока ограничивает Приобское плато. Широкая долина р. Оби делит плато на правобережную и левобережную приобские области. Плато представляет собой приподнятый увал, примыкающий на востоке и юго-востоке к предгорьям Салаира. Приобское плато поднимается над уровнем моря более чем на 200 м, абсолютная высота на юге области достигает 313 м, к северу плато понижается.

К юго-западу от Приобского плато расположена Кулунда — обширная степь, занимающая южную часть Западно-Сибирской низменности. Небольшая северная часть Кулунды находится на территории Новосибирской области. Граница между Барабой и Кулундой почти не выражена. Кулундинская степь более равнинна и напоминает чашеобразное понижение, открытое на северо-запад, которое представляет собой нерасчлененную равнину с высотой над уровнем моря 120–125 м.

Восточная часть области — Присалаирская предгорная холмистая равнина — представляет собой холмистый рельеф с системой долин и балок. В пределы Новосибирской области Салаир входит лишь северо-западной частью. Средняя высота его 400–450 м. Наивысшая точка достигает 523 м (в Маслянинском районе). Юго-западный склон кряжа (в пределах области), постепенно понижаясь к долине р. Оби, незаметно сливается с Западно-Сибирской низменностью.

Климатические особенности территории

Климатические особенности территории Новосибирской области определяются ее положением внутри материка Евразии и орфографией местности (Орлова, 1962; Новосибирская..., 1978; Воронина, Гриценко, 2011). С севера территория области доступна воздействию арктических масс воздуха, характеризующихся сухостью и низкими температурами. Открытость с юга способствует выносу прогретого континентального умеренного и даже тропического воздуха. Наиболее интенсивно циркуляционные процессы развиты зимой, весной и в первой половине осени. Зимой под воздействием северной части азиатского антициклона климат относительно устойчив. Весной происходит постепенное ослабление и размывание отрога антициклона и увеличивается циклоничность. Летом циклоническая деятельность более спокойна, чем в переходные сезоны.

Рельеф области неоднороден. В ее пределах есть низменности, всхолмленные равнины, плато и горы. Особенности рельефа влияют на формирование климата и микроклимата, воздействуют на пространственное распределение климатических характеристик. Для анализа закономерностей изменения различных климатических показателей по территории области были использованы данные Научно–прикладного справочника «Климат России» (Научно–прикладной справочник...) по 63 метеостанциям, из которых 34 расположены в Новосибирской области и 29 — в непосредственной близости от нее в прилегающих областях.

По указанным данным, используя геоинформационную систему Golden Software Surfer 16, были построены изолинейные карты для 13 климатических показателей. Полученное пространственное распределение исследуемых показателей легло в основу климатического районирования области.

Климат Новосибирской области континентальный. В данной работе степень континентальности оценивалась по индексу Г. Шрепфера (К), согласно которому $K = 0$ — соответствует морскому климату, а $K = 100$ — резко континентальному (Пряхина, Ормели, 2017).

В целом по территории области индекс континентальности изменяется с севера на юг от 60 до 69 %. На востоке области (правобережье р. Оби) под влиянием возвышенного рельефа происходит более быстрое нарастание континентальности, чем на западной равнинной территории.

Особенно ярко контрасты континентальности климата проявляются в характерном для нее показателе — годовой амплитуде температуры воздуха, которая представляет собой разность между средними температурами самого теплого месяца (июля) и самого холодного (января). В пределах области годовая амплитуда средних месячных температур составляет 36–39 °С, а абсолютная амплитуда (разность между абсолютными максимумами и минимумами) достигает 81–92 °С.

Средняя годовая температура воздуха в целом по территории области положительная (от 0 до +2,5 °С). Следует отметить, что в период до 1960 г. эта температура была отрицательная (от –0,1 до –1,1 °С).

Зима в Новосибирской области суровая и продолжительная (до 5,5–6 месяцев). Средняя месячная температура января изменяется по территории от –17,0° до –19,5°, т. е. на 2,5 °С. В отличие от средних месячных, минимальные температуры очень чувствительны к условиям местоположения и изменяются в довольно широком диапазоне в зависимости от характера подстилающей поверхности, формы рельефа и других условий. Наиболее значительные различия имеют абсолютный минимум и средний из абсолютных годовых минимумов температуры.

Абсолютный минимум температуры воздуха в пределах области варьирует от –45,5° до –54,0 °С (диапазон 8,5°). Средний из абсолютных годовых минимумов температуры (T_m) изменяется от –37,5° до –44,4 °С (диапазон 6,9°). Пространственное распределение T_m по территории области представлено на рисунке 1. Изолинии характеризуют обобщенную (фоновую) величину T_m . В зависимости от местных условий (от местоположения конкретного участка) средний из абсолютных годовых минимумов может значительно изменяться. В изрезанном рельефе самые низкие

температуры воздуха наблюдаются в долинах и, как правило, при инверсиях, и зависят от местных условий формирования температурных инверсий, что исключает линейную интерполяцию метеорологических характеристик в сложном рельефе. Для расчета значений T_m в различных условиях подстилающей поверхности разработана система микроклиматических поправок (Микроклимат..., 1967; Мищенко, 1984), которые вводятся к фоновым значениям (табл. 1, 2).

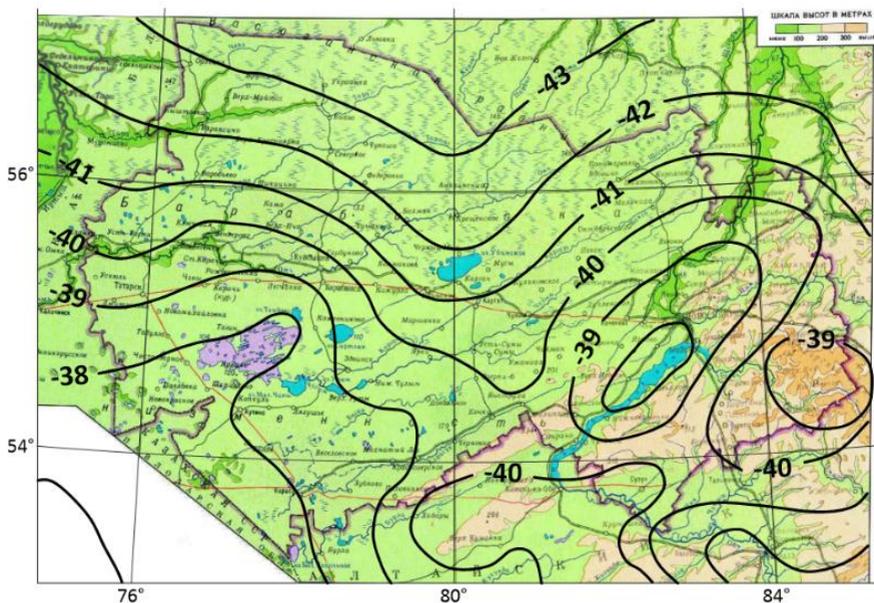


Рис. 1. Средний из абсолютных годовых минимумов температуры воздуха, °С

Изменение по территории области длительности наиболее холодных периодов также велико, как и минимальных температур. Средняя продолжительность периода с температурой воздуха ниже минус 15° изменяется в пределах области от 54 до 81 дня, а максимальная продолжительность от 121 до 132 дней.

Таблица 1

**Изменение среднего из абсолютных годовых минимумов
температуры воздуха ($T_m, ^\circ\text{C}$) под влиянием местоположения в
холмистом и горном рельефе в условиях континентального климата**

Орографические районы	Местоположение			
	Вершина, верхняя треть склона	Середина склона	Широкая долина	Замкнутая долина, котловина
Слабовсхолмленный рельеф ($\Delta H \leq 50$ м)	2 – 3	1 – 2	–2	–4
Слабовыраженный рельеф ($\Delta H \approx 50 \dots 150$ м)	3 – 4	> 2	–2, –3	–4, –5
Холмистый рельеф ($\Delta H \approx 50 \dots 150$ м)	4 – 5	2 – 3	> –3	–5, –6
Низко- и среднегорный рельеф ($\Delta H \approx 150 \dots 300$ м)	> 5	0	–3, –4	–6, –8

Примечание. Положительные величины означают повышение T_m по сравнению с ровным местом в холмистом рельефе или с серединой склона в горном рельефе, отрицательные — понижение. ΔH — относительные превышения.

Таблица 2

**Изменение среднего из абсолютных годовых минимумов
температуры воздуха ($T_m, ^\circ\text{C}$) в разных местоположениях по сравнению с
открытым ровным местом**

Местоположение	Изменение T_m		
	Наименьшее	Среднее	Наибольшее
Побережья больших озер	1 – 2	2 – 3	> 4
Долины больших рек	1	> 2	> 3
Города	1 – 2	2 – 3	4 – 6
Лесные поляны	–1	–2	–3, –4

Примечание. Положительные величины означают повышение T_m по сравнению с открытым ровным местом, отрицательные — понижение.

Продолжительность периодов с температурой воздуха ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет в пределах области в среднем от 8 до 30 дней, а число дней с температурой ниже $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ от 2 до 15 дней.

Весна и осень в Новосибирской области непродолжительны, с характерной для этих периодов года неустойчивой погодой. Лето короткое, но жаркое, нередко засушливое. Самый жаркий месяц — июль. Средняя месячная температура июля изменяется по территории от $17,9$ до $20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, преимущественно увеличиваясь с севера на юг и несколько уменьшаясь в юго-восточном районе на возвышенностях Салаирского кряжа. Абсолютный максимум температуры достигает $35\text{--}41\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Длительность наиболее теплого периода летом со средней температурой устойчиво выше $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ изменяется по территории области от 66 до 97 дней. Различие сумм температур (термических ресурсов) за этот период также очень велико: от 1150 до 1770 $^{\circ}\text{C}$.

В зимний период, как было указано выше, характеристикой, наиболее четко реагирующей на влияние подстилающей поверхности, является средний из абсолютных годовых минимумов температуры воздуха. В теплую половину года такой характеристикой является длительность безморозного периода. На территории области длительность безморозного периода изменяется в пределах от 96 до 143 дней (рис. 2). Однако, имеющаяся сеть метеостанций слишком ограничена, чтобы только по ее данным можно было отразить количественные изменения длительности безморозного периода в других местоположениях. Поэтому, для учета местных особенностей климата какого-либо участка территории нужно вводить соответствующие микроклиматические поправки (табл. 3) (Гольцберг, 1961).

Естественные ресурсы атмосферного увлажнения оценивались двумя показателями: количеством осадков, выпавших за год и за теплый период (апрель–октябрь). Количество осадков и распределение их по области определяется ходом синоптических процессов, свойственных Западной Сибири, и орографией местности.

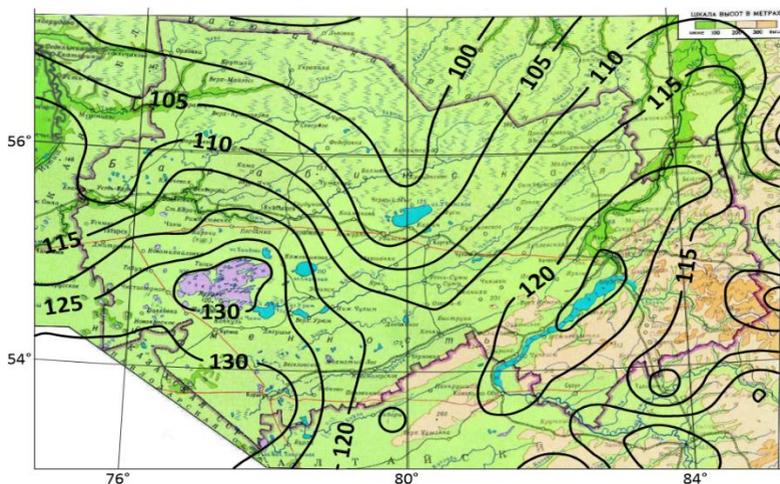


Рис. 2. Средняя продолжительность безморозного периода, дни

Таблица 3

**Изменение длительности безморозного периода (б/п) в воздухе
в зависимости от местных условий
(относительно открытого ровного места)**

Местоположение	Изменение б/п, дни	
	от	до
Вершины и верхние части склонов, прибрежные зоны больших водоёмов, города	+15	+20
Широкие (более 1 км) плоские долины	0	0
Долины небольших рек, лога глубиной менее 50 м	-12	-16
Долины в холмистой местности глубиной от 50 до 100 м	-16	-25
Замкнутые долины и котловины глубиной от 50 до 100 м, сырые низины, лесные поляны	-25	-30

Примечание. Широкие (более 1 км) плоские долины приравняются к ровному открытому месту и поэтому поправки не вводятся.

В центральных и юго–западных районах годовое количество осадков недостаточное, особенно на юго–западе, включая район оз. Чаны. В целом годовые суммы осадков убывают в направлении с северо–востока на юго–запад от 480 до 320 мм. Орография местности оказывает большое влияние на пространственное распределение атмосферных осадков. На правобережье р. Оби в связи с близостью гор климат более влажный, чем на левобережье, годовая сумма осадков изменяется здесь от 440 до 530 мм.

Годовой ход осадков, как и другие характеристики, определяется особенностями циркуляции, в соответствии с которой зима является более сухим сезоном, а лето — более влажным. За тёплый период года в среднем по территории области выпадает 73 % от годовой суммы осадков. Пространственное распределение осадков тёплого периода аналогично распределению их годового количества.

Наибольшее количество осадков выпадает в летние месяцы, нередко в виде ливней, с максимумом в июле (54–76 мм). Минимум осадков отмечается в феврале (3–11 мм). В отдельные годы в зависимости от условий атмосферной циркуляции как максимум, так и минимум могут быть сдвинуты на другие месяцы, и месячное количество осадков может значительно отклоняться от многолетнего среднего значения.

Снежный покров держится 5–6 месяцев. В большинстве случаев образованию устойчивого снежного покрова предшествует период предзимья, характеризующийся постепенным похолоданием с неоднократным сходом снежного покрова, который наиболее часто длится 10–20, но иногда может достигать 50 дней и более. Разрушение устойчивого снежного покрова в зависимости от общих погодных условий в каждый отдельный год происходит в разные сроки и неравномерно — первыми освобождаются от снега гривы и холмы, а в западинах (понижениях рельефа) и лесах снег задерживается дольше (примерно на месяц). Число дней со снежным покровом уменьшается по области в целом с севера на юг от 178 до 150 дней.

Залегает снежный покров крайне неравномерно. Средняя из наибольших декадных высот снежного покрова по постоянной

рейке изменяется по территории от 30 до 72 см. Наименьшие значения высоты снежного покрова (менее 35 см) наблюдаются в крайних юго-западных районах и на побережье южной части Новосибирского водохранилища. Причём в южных районах сильные ветры в отдельные годы могут совершенно сдувать снег с открытых участков.

Климатическое районирование Новосибирской области

Исходные фактические данные для климатического районирования Новосибирской области были обобщены в виде серии карт климатических показателей, построенных аналогично рис. 1 и 2 (всего 13 карт). Анализ пространственного распределения исследуемых показателей выполнялся с учетом проявления географической зональности (зональных и аazonальных факторов).

Комплексное климатическое районирование осуществляется путем выделения ведущих факторов, определяющих количественные характеристики климата приземного слоя воздуха. К таким факторам в первую очередь относятся ресурсы тепла и влаги. Выделение районов проводится на базе последовательного рассмотрения пространственного распределения указанных показателей. По тепловым ресурсам, оцениваемым суммами температур за период с устойчивой температурой выше 15° , рассматриваемую территорию можно разделить на пять термических зон с суммами температур от 1050 до 1800° (табл. 4). Внутри зон выделяются районы с местными климатами (мезоклиматами), различающимися определенными соотношениями тепла и влаги. При этом в качестве ресурсов увлажнения были использованы годовые суммы осадков. Всего выделено 13 районов (рис. 3).

В табл. 4 для каждого района приведен широкий спектр климатических показателей (13 показателей). Данные для климатических районов снимались с указанных выше карт для каждого показателя. В таблице данные помещены для границ климатических районов в виде крайних значений элементов, которые изменяются по районам в направлении с севера на юг или

с запада на восток от наименьших к наибольшим. Высота снежного покрова, приведенная в табл. 4, получена как средняя из наибольших декадных высот по постоянной рейке.

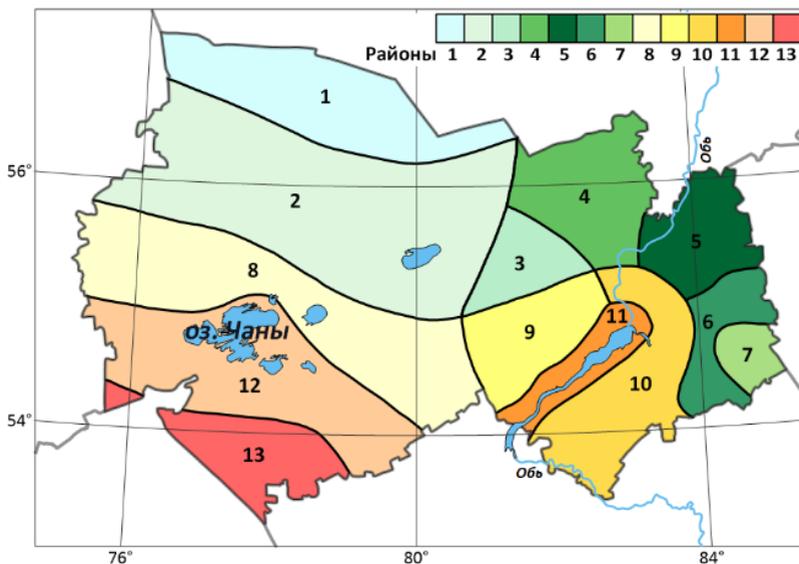


Рис. 3. Климатическое районирование Новосибирской области

Для тех элементов, пространственную изменчивость которых в районах со сложным рельефом (например, район 7) нельзя детально отразить из-за мелкого масштаба карт (безморозный период, средний из абсолютных годовых минимумов температуры), дополнительно даны таблицы возможной изменчивости (см. табл. 1–3). Значения абсолютных минимальных и максимальных температур воздуха, округлённых до целых градусов, приведены по станциям, имеющим крайние значения в пределах каждого района. Для района 7 экстремальные температуры не представлены, т. к. в этом горном районе метеостанции отсутствуют.

Таблица 4а

Климатические характеристики термических зон Новосибирской области

Термические зоны (I – V), суммы температур выше 15°C	№ района на рис. 3	Суммы температур выше 15°C	Количество осадков (мм)		Продолжительность периодов, дни	
			год	теплый период (IV–X)	безморозный	с температурой воздуха выше +15°C ниже –15°C
I 1050 – 1150	1	1050 – 1150	440 – 500	330 – 360	96 – 102	60 – 65 76 – 81
	2	1150 – 1350	380 – 440	280 – 340	100 – 118	65 – 80 71 – 80
	3	1250 – 1350	380 – 430	290 – 320	108 – 120	72 – 77 68 – 74
	4	1150 – 1250	430 – 480	320 – 360	106 – 122	63 – 77 67 – 76
	5	1250 – 1350	480 – 530	330 – 360	114 – 122	72 – 75 64 – 71
II 1150 – 1350	6	1300 – 1350	440 – 480	320 – 340	112 – 116	75 – 78 64 – 66
	7	1250 – 1300	400 – 440	310 – 330	106 – 112	70 – 75 62 – 66
	8	1350 – 1500	340 – 380	260 – 280	110 – 126	76 – 85 69 – 78
III 1350 – 1500	9	1350 – 1480	380 – 430	280 – 330	112 – 122	77 – 83 64 – 73
	10	1320 – 1500	430 – 480	290 – 350	114 – 122	76 – 88 60 – 68

Термические зоны (I – V), суммы температур выше 15°C	№ района рис. 3	Суммы температур выше 15°C	Количество осадков (мм)		Продолжительность периодов, дни		
			год	теплый период (IV–X)	безморозный	с температурой воздуха выше +15°C	Ниже – 15°C
IV 1500 – 1650	11	1500 – 1550	400 – 450	280 – 330	122 – 142	85 – 87	62 – 70
	12	1500 – 1650	320 – 360	250 – 270	118 – 130	85 – 90	69 – 74
V 1650 – 1800	13	1650 – 1800	320 – 340	230 – 250	122 – 134	90 – 100	70 – 74

Таблица 4б

Климатические характеристики термических зон Новосибирской области

Термические зоны (I – V), суммы температур выше 15°C	№ района на рис. 3	Температура воздуха, °C			Снежный покров		Число дней с ветром более 15 м/с	Континентальность, %
		абсолютный		высота, см	число дней			
		минимум	средний абсолютный			минимум		
I 1050 – 1150	1	-43 ... -44	-52	35	60 – 65	174 – 178	15 – 25	60 – 62
	2	-40 ... -43	-52	39	40 – 65	162 – 174	20 – 30	61 – 64
II 1150 – 1350	3	-39 ... -41	-54	40	40 – 55	165 – 170	25 – 30	62 – 64

Термические зоны (I – V), суммы температур выше 15°	№ района на рис. 3	Температура воздуха, °С			Снежный покров		Число дней с ветром более 15 м/с	Континентальность, %
		минимум	абсолютный		высота, см	число дней		
			средний абсолютный	минимум				
II 1150 – 1350 (продолжение)	4	-39... -42	-55	39	55 – 65	166 – 174	15 – 30	61 – 63
	5	-39... -41	-51	37	60 – 65	170 – 175	15 – 25	61 – 62
	6	-39... -40	-54	37	55 – 60	168 – 170	20 – 30	61 – 64
	7	-39... -41	—	—	35 – 55	160 – 168	25 – 30	62 – 63
III 1350 – 1500	8	-38... -41	-50	41	35 – 55	158 – 164	25 – 35	63 – 66
	9	-38... -40	-50	38	40 – 55	158 – 165	20 – 30	63 – 66
	10	-38... -40	-55	40	35 – 60	156 – 170	20 – 40	62 – 66
IV 1500 – 1650	11	-37... -39	-51	40	30 – 40	156 – 166	25 – 35	63 – 66
	12	-38... -39	-48	40	30 – 50	154 – 160	35 – 60	65 – 67
V 1650 – 1800	13	-38... -39	-47	40	30 – 45	150 – 156	35 – 55	67 – 69

Заключение

Представленное районирование Новосибирской области является первым комплексным обобщением базовых и специализированных климатических показателей для этой территории.

Климатическое районирование области дает реальную основу для оперативного получения объективной информации о текущем состоянии климатических ресурсов различных её районов, что позволит более точно учитывать климатические факторы при принятии хозяйственных решений в различных отраслях экономики, а также при разработке региональных планов адаптации к изменению климата.

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

Агроклиматические ресурсы Новосибирской области. (1971). – Л.: Гидрометеоиздат. 155 с.

Воронина Л. В., Гриценко А. Г. (2011). Климат и экология Новосибирской области. – Новосибирск: СГГА. 228 с.

Гольцберг И. А. (1961). Агроклиматическая характеристика заморозков в СССР. – Л.: Гидрометеоиздат. 198 с.

Микроклимат СССР. (1967). / Под ред. д-ра геогр. наук И. А. Гольцберг. – Л.: Гидрометеоиздат. 284 с.

Мищенко З. А. (1984). Биоклимат дня и ночи. – Л.: Гидрометеоиздат. 280 с.

Научно-прикладной справочник «Климат России». Электронный ресурс. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/climsprn/> (дата обращения – 19.10.2023)

Новосибирская область. Природа и ресурсы. (1978). – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение. 151 с.

Орлова В. В. (1962). Климат СССР. Вып. 4. Западная Сибирь. – Л.: Гидрометеоздат. 360 с.

Почвенно–климатический атлас Новосибирской области. (1978). – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение. 121 с.

Пряхина С. И., Ормели Е. И. (2017). Расчёт индексов континентальности климата для Среднего и Нижнего Поволжья // Изв. Саратов. ун–та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. Т. 17. Вып. 1. С. 17–19.

Сляднев А. П. (1965). Географические основы климатического районирования и опыт их применения на юго–востоке Западно–Сибирской равнины. // География Западной Сибири. – Новосибирск. С. 3–122.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ФАКТИЧЕСКОЕ ИСПАРЕНИЕ НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

*Е. Д. Надёжина, И. М. Школьник,
А. В. Стернзат, А. А. Пикалёва*

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

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021 St. Petersburg, Karbysheva st., 7

E-mail: picaleva@gmail.com

Поступила в редакцию 12.10.2024
Поступила после доработки 30.11.2024

Введение

Испарение играет важнейшую роль в формировании водного, энергетического и углеродного баланса атмосферы и земной поверхности. Надежные оценки фактического суммарного испарения или фактической эвапотранспирации (E) и его региональных изменений в естественных условиях необходимы для решения задач водоснабжения и водопользования. Проблема определения фактического испарения с достаточной для практики точностью остается актуальной на протяжении десятков лет. В связи с изменением климата во многих регионах возникают риски дефицита водоснабжения. Изменения климата создают, кроме того, дополнительные риски экстремальных явлений, в частности, катастрофических паводков. Функционирование многих отраслей хозяйства требует возможно более точных сведений о водном балансе и изменении соотношения между его составляющими. Большая неопределенность прогнозов изменения E создает трудности

в определении дефицита водоснабжения и затрудняет выработку мер по устранению угроз продовольственной безопасности и устойчивости экосистем. Понимание физических основ климатического воздействия на процессы влагопереноса в атмосферном пограничном слое (АПС) является одной из приоритетных задач современных исследований.

При оценках фактического испарения с поверхности суши (фактической эвапотранспирации, далее ЭТ) возникают значительные трудности. Величина фактической ЭТ с различных поверхностей складывается под влиянием сложного разномасштабного взаимодействия подстилающей поверхности с растительностью и атмосферой. Для проведения натурных измерений фактической ЭТ используются либо испарители, либо установки для пульсационных измерений. Отметим, что в России значительно сократилась регулярная сеть почвенно-испарительных и водно-испарительных станций (Сперанская, 2016), а пульсационные измерения потоков доступны в единичных пунктах. При решении практических задач фактическая ЭТ (во многих публикациях для этой характеристики используется также термин «испаряемость» или «суммарное испарение») рассчитывается преимущественно на основе данных о потенциальной ЭТ. В расчетах используются эмпирические коэффициенты, связывающие фактическую (E) и потенциальную (E_{po}) ЭТ и определяемые по данным измерений для каждого вида растительности в каждом конкретном регионе. Термин «потенциальная ЭТ» используется в том случае, когда на испаряющей поверхности поддерживается насыщающая влажность, термин «фактическая ЭТ» — в том случае, когда влажность на поверхности отлична от насыщающей.

В настоящее время разработка методов моделирования процессов испарения в нижних слоях атмосферы интенсивно продолжается (Надёжина и др., 2022, 2023; Школьник и др., 2020; Brutsaert, 2015; Crago et al., 2022; Han, Tian, 2020; Li et al., 2021; Renhua Yan, Janfeng Gao, 2021; Yunfei et al., 2023; Zhang et al., 2017). Широко распространен метод оценки E с помощью дополнительного соотношения (ДС). Расчет E с помощью ДС выполняется по данным

стандартных метеорологических наблюдений. Метод, использующий ДС, связывает фактическое испарение с участка естественной поверхности суши с потенциальным испарением (E_{po}) с такого участка и видимым потенциальным испарением (E_{pa}), которое отождествляется с испарением с малого участка, имеющего насыщающую влажность на поверхности и не оказывающего заметного влияния на влажность слоев воздуха, прилегающих к подстилающей поверхности. Идея использования метода ДС возникла на основе наблюдений за изменением испарения с высыхающей поверхности в аридных регионах и испарением с расположенного в тех же условиях испарителя. В ходе наблюдений установлено, что при уменьшении испарения с высыхающего полигона измеренное на испарителе испарение растет, поскольку уменьшается влажность окружающего воздуха. Первоначально предложенный Буше (Bouchet, 1963) метод ДС основывался на предположении о том, что скорость убывания и возрастания, соответственно, величин E и E_{pa} одинакова (отсюда возникло понятие симметрии процессов). Развитие исследований привело к пониманию того, что скорости убывания и возрастания E и E_{pa} не одинаковы, следовательно процессы эволюции E и E_{pa} асимметричны (Brutsaert et al., 2020; Han et al., 2021; Wang et al., 2021). Многочисленные уточнения ДС, проводившиеся на протяжении десятилетий, тестировались с помощью натуральных данных о потоках влаги, измеряемых пульсационными методами или вычисляемыми на основе балансовых соотношений (Brutsaert, 2015; Crago, Qualls, 2018; Han, Tian, 2020; Li et al., 2021). Большие усилия затрачиваются на поиски универсальной формы ДС и демонстрацию прогностических возможностей применения этого соотношения (Crago, Qualls, 2018; Crago et al., 2022; Han et al., 2021; Li et al., 2021; Pan et al., 2015, 2020; Renhua Yan, Janfeng Gao, 2021; Tu et al., 2023). Ряд исследований направлен на выяснение того, как изменяется ДС под влиянием изменения временных и пространственных масштабов входных данных, определяющих это соотношение (Crago et al., 2022; Lintner et al., 2015; Wang et al., 2021; Yunfei et al., 2023).

Ключевой проблемой в разработке оптимальных методов применения ДС является учет неоднородности естественных поверхностей, для которых вычисляется фактическая эвапотранспирация.

Обобщения ДС на случай наличия адвекции предпринимались в работах (Brutsaert, Stricker, 1979; Han, Tian, 2020; Han et al., 2021). В (Aminzadeh, Or, 2017) исследовалось изменение ДС под влиянием чередования неоднородностей поверхности. Анализ проводился на примере чередования неоднородностей одинаковой протяженности в направлении оси X , а их вертикальный масштаб был либо существенно меньше высоты атмосферного пограничного слоя, либо задавался сравнимым с этой высотой.

В настоящей работе анализируются возможности воспроизведения ДС на основе модельных оценок E с использованием метода сравнения профилей влажности. Этот метод был описан и применен для оценки фактического испарения в работах (Симонов, 1968; Школьник и др., 2020). Для месячных и сезонных сумм испарения исследуется деформация алгебраической аппроксимации ДС в зависимости от характеристик поверхности. Испарение с участка поверхности, составленного из неоднородностей разного размера, вычислялось на Европейской территории России в зоне тайги и в зоне засушливых степей.

Модели и методы

Оценки фактической эвапотранспирации выполнялись с помощью схемы, основанной на сравнении профилей влажности (q) на границах прямоугольного участка заданной протяженности, состоящего из полос с разной степенью увлажнения. Схема расположения отдельных полос на поверхности неоднородного участка представлена на рисунке 1. Предполагается, что размеры полос таковы, что влияние неоднородностей не выходит за пределы верхней границы АПС.

Разная степень увлажнения может быть связана со сменой вида растительности или изменением влагосодержания почвы. Размеры

соотношений размеров участков: $L1/L = 0,04$ и $L1/L = 0,008$, исходя из того, что участок $L1$ по определению ДС должен быть достаточно мал по отношению к участку L . Боковая диффузия и диффузия, направленная навстречу ветру, не учитывались.

Метод оценки испарения, предложенный в (Симонов, 1968), основан на информации о профилях влажности в конце и в начале ограниченного участка поверхности (сеточной ячейки региональной климатической модели ГГО (РКМ) или части сеточной ячейки). В результате решения системы уравнений пограничного слоя на выходе модели АПС (МАПС) рассчитываются (с заданной по оси X дискретностью) профили метеорологических характеристик от уровня шероховатости до высоты АПС. Если двумерное уравнение диффузии водяного пара проинтегрировать по высоте (Z) от поверхности (Z_0) до высоты АПС (H) в предположении, что на верхнем уровне поток водяного пара, возникающий за счет неоднородностей поверхности, пренебрежимо мал, то фактическое испарение с участка поверхности заданной протяженности в направлении ветра (u) будет определяться разностью интегралов $\int_{Z_0}^H u(x, z)q(x, z)dz$ на наветренной и подветренной границах участка. Выбор верхнего предела интегрирования осуществляется на основе сравнения профилей влажности на этих границах. Положительное направление оси X совпадает с преобладающим направлением геострофического ветра в изучаемом регионе. Вычисление средней эвапотранспирации по участку обеспечивает близость расчетного значения этой характеристики к фактическому (Школьник и др., 2020). Более подробное изложение метода оценки фактической эвапотранспирации содержится в работах (Симонов, 1968; Школьник и др., 2020), где предложено называть этот метод методом сравнения профилей (далее в тексте МСП).

В качестве входных данных для расчета E используются результаты ансамблевых расчетов атмосферной циркуляции и климата с помощью глобальной и встроеной в нее региональной климатической модели ГГО с разрешением по горизонтали 25 км и привлечением детализирующей модели АПС. Технология

построения ансамблей и описание изложены в (Shkolnik et al., 2018). Численные эксперименты проводились от разных (случайных) начальных условий в атмосфере и на подстилающей поверхности суши для разных периодов в XX и XXI вв. (здесь используются результаты для базового десятилетнего периода 1990–1999 гг.). Использован сценарий антропогенного воздействия МГЭИК RCP8.5 (Vuuren et al., 2011). Всего проведено по 50 экспериментов с разными начальными и граничными условиями на поверхности океанов. Таким образом, для каждого периода (в т. ч. базового) в совокупности доступно по 500 лет расчетов регионального климата.

Использование МАПС позволяет провести пространственную детализацию (даунскейлинг) расчетов крупномасштабных характеристик климата для подсеточных по отношению к РКМ неоднородностей подстилающей поверхности. МАПС неоднократно применялась для решения задач даунскейлинга (Надёжина и др., 2022, 2023; Пикалёва и др., 2020; Школьник и др., 2020). Эта модель относится к классу мезо- γ -моделей, в ней использован полуторный уровень замыкания системы уравнений АПС с помощью параметрических соотношений для масштаба и коэффициента турбулентности. Численное решение системы уравнений АПС отыскивается маршевым методом с дополнительными приближениями для нелинейных членов уравнений. К числу внешних параметров модели относятся: характеристики рельефа, шероховатость подстилающей поверхности Z_0 , высота пограничного слоя атмосферы H , скорость геострофического ветра, радиационный баланс или температура на уровне $Z = Z_0$ или $Z = 2$ м, температура и массовая доля влаги на уровне $Z = H$. Боковая диффузия и диффузия, направленная навстречу набегающему потоку воздуха, в модели МАПС предполагаются пренебрежимо малыми. Методология выбора входных параметров МАПС адаптирована к выдаче РКМ.

Зависимость аппроксимации ДС от регионального климата и структуры неоднородной поверхности

Физическая основа метода ДС — предположение о том, что при неограниченном поступлении воды к поверхности (поддержании насыщающей влажности на поверхности) $E = E_{po} = E_{ra}$. Если при постоянном притоке энергии поверхность начинает высыхать, E и E_{ra} отклоняются от E_{po} , причем значения E и E_{ra} соответственно убывают и возрастают с одинаковой скоростью. Таким образом, первоначально оценки E выполнялись на основе соотношения:

$$E_{ra} - E_{po} = E_{po} - E. \quad (1)$$

ДС, записанное в виде выражения (1), отражает гипотезу полной компенсации уменьшения E_{ra} увеличением величины E . Традиционно в этом случае говорят о симметричных процессах эволюции E и E_{ra} . Чтобы рассчитать E на основе соотношения (1), необходимо задать E_{ra} и E_{po} . Различные комбинации и модификации формул Пенмана и Пристли–Тейлора (Han et al., 2021) тестировались для оценок этих характеристик в разных регионах земного шара (Crago et al., 2022; Gao Jiaqi et al., 2018; Han, Tian, 2020; Li et al., 2021). В одной из последних работ на эту тему (Tu et al., 2023) предлагается рассчитывать E_{po} как максимально возможное испарение, реализующееся при минимально возможной относительной влажности воздуха вблизи поверхности. Современные модификации соотношения (1) в большинстве случаев представляют полиномиальное выражение вида:

$$Y = X - \sum_{i=0}^n a_i X_i,$$

где $Y = E/E_{ra}$; $X = E_{po}/E_{ra}$; n — степень полинома.

Однако степень универсальности ДС для разных ландшафтных и климатических условий требует дополнительных исследований. Учитывая неопределенность экспериментальных и балансовых оценок E , имеет смысл использовать результаты моделирования, в основе которого лежит явное описание физических механизмов,

влияющих на эволюцию компонент водного баланса, включая испарение. Это принципиально отличает модельные оценки от тех, которые используются для расчетов $E_{ро}$ и $E_{ра}$.

Большинство работ, посвященных развитию метода ДС, начинаются с анализа противоположно направленных изменений E и $E_{ра}$ при увеличении или убывании влажности почвы. Основные положения метода ДС принято иллюстрировать графиками безразмерных зависимостей:

$$E/E_{ро} = F(E/E_{ра}) \text{ и } E_{ра}/E_{ро} = F(E/E_{ра}).$$

В случае выполнения гипотезы (1) графики этих двух функций являются симметричными относительно

$$Y = E/E_{ро} = E_{ра}/E_{ро} = 1.$$

Именно этим, по-видимому, объясняется терминологическое использование понятия симметричных процессов в работах, посвященных развитию ДС. В качестве примера на рисунках 2 а, б показаны обсуждаемые зависимости, полученные в работе (Tu et al., 2023) по данным наблюдений FLUXNET2015 (Pastorello et al., 2020) в разные месяцы года в разных регионах земного шара. Были использованы данные наблюдений в 64 пунктах, где потоки влаги измерялись пульсационным методом. Анализ рисунков показывает, что выбор формулы для расчета $E_{ро}$ влияет на исследуемые соотношения. Симметрия функций $E/E_{ро}$ и $E_{ра}/E_{ро}$ описывается лучше, если $E_{ро}$ рассчитывать как максимально возможное значение испарения с той же поверхности при минимально возможной влажности в атмосфере и сохранении остальных характеристик приповерхностного воздуха.

Совокупности экспериментальных точек, относящиеся к выделенным диапазонам параметра $LE/(R - B)$, группируются в определенном (и единственном) диапазоне значений $E/E_{ра}$ (рис. 2 а, б). Индекс $LE/(R - B)$ определен как доля радиационной энергии $(R - B)$, которая тратится на испарение (здесь R — радиационный баланс, B — поток энергии в почву, LE — затраты энергии на испарение).

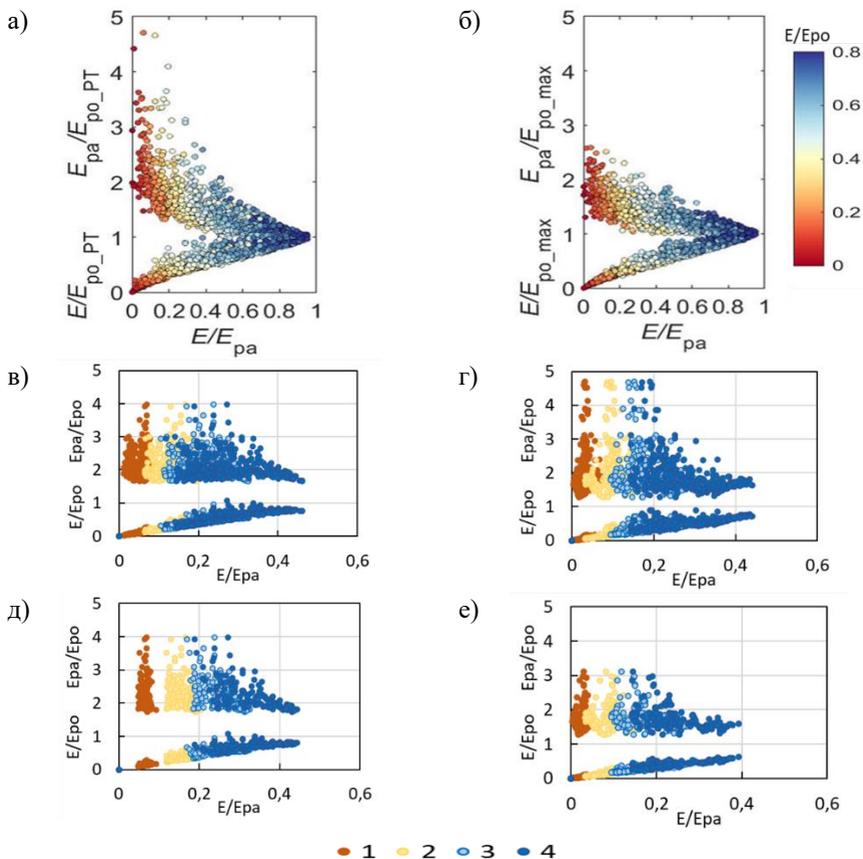


Рис. 2. Связь сезонных значений фактического и видимого потенциального испарения для таежных (в, д) и степных (г, е) регионов ЕЧР:

а, б — из работы (Shkolnik et al., 2018); в, г, д — соотношения по МСП с использованием данных РКМ; в — зона тайги южнее 66° с. ш.;

г — зона сухих степей севернее 43° с. ш.; д — зона тайги, Ленинградская область; е — зона степей, Заволжье.

Z_0 задано по данным РКМ; $rb = 0,3$.

Цветом на рисунках 2 в, д показана степень увлажнения поверхности (суммарная площадь влажных участков S), на рисунках 2 а, б — диапазон индекса $LE/(R - B)$,

1 — $S = 20\%$, 2 — $S = 40\%$, 3 — $S = 60\%$, 4 — $S = 80\%$

Для локального пункта наблюдений индекс $LE/(R - B)$ отражает, прежде всего, степень увлажненности участка; для которого рассчитывается испарение. Для множества пунктов индекс показывает совокупное влияние климатических особенностей региона, растительности и структуры поверхности. Разброс точек в диапазоне значений $LE/(R - B)$ связан преимущественно с указанными воздействиями. При обобщении данных экспериментов в (Tu et al., 2023) для расчета E_{p0} и E_{p1} используются формулы, не учитывающие неоднородность поверхности.

Обратимся к расчетным значениям среднемесячных величин испарения, полученных методом СП в разных регионах ЕТР. Численные эксперименты проведены для разных значений эффективной шероховатости (Z_0) и эффективной относительной влажности (rb) набегающего на неоднородный участок потока воздуха. Расчетные значения исследуемых характеристик получены в узлах регулярной сетки РКМ, выделенных на территории ЕТР и характеризующих ландшафты таежной и степной зоны. Выделенные узлы сетки РКМ соответствуют классификации регионов, приведенной в (Сперанская, 2016). Рисунки отражают результаты применения метода ДС для неоднородного участка поверхности, внутри которого чередуются влажные и сухие полосы. Длина участка составляет 5 км в направлении геострофического ветра, суммарная площадь переувлажненных отрезков составляет от 20 до 80 % его общей площади, обеспечивая соответствующие вариации влажности воздуха у подстилающей поверхности. На поверхности влажных участков задается насыщающая влажность. Расчет выполнен для периода вегетации (с мая по сентябрь). Эффективная шероховатость, определяющая вертикальную структуру потока, набегающего на неоднородный участок, и шероховатость отдельных составляющих поверхности варьирует с учетом различных типов растительности.

Анализ универсальности изучаемых соотношений — один из ключевых вопросов, которые обсуждаются в исследованиях, посвященных ДС. Как видно из рисунков 2 в, г, для таежной и степной зоны ЕЧС расчетные значения по соотношению $E/E_{p0} = F(E/E_{p1})$ оказываются близкими. Для соотношения

$E_p/E_{p0} = F(E/E_p)$ расхождения между оценками несколько бóльшие. При $E_p/E_{p0} \geq 3$ различие в положении кривых, относящихся к определенному интервалу значений суммарной площади S переувлажненных участков (и, следовательно, степени увлажненности полной поверхности выбранного участка), на графике этой зависимости становится заметным. В рассматриваемом случае среднее увлажнение неоднородного участка поверхности определяется суммарным увлажнением с учетом каждого переувлажненного участка. Аналогия полученных зависимостей для лесной и степной зоны очевидна (рис. 2 в, г). Расчеты по данным РКМ на территории ЕТР показывают, что значения $E/E_p \geq 0,46$ в сезон вегетации в этом регионе не наблюдаются. Заметим, что на рисунках 2 а, б наличие значений $E_p/E_{p0} \geq 3$ зависит от выбора нормировочных значений E_{p0} .

Поскольку основой для тестирования метода ДС часто служат данные наблюдений, полученные в разных регионах земного шара (как это сделано, например, в (Brutsaert, 2015; Tu et al., 2023)), покажем, как изменяются исследуемые функции, если объединить расчетные данные для лесной и степной зоны. Результат объединения виден на рисунке 3, который демонстрирует одновременно влияние временного масштаба осреднения характеристик, составляющих ДС, на исследуемые соотношения.

Асимметрия кривых $E/E_{p0} = F(E/E_p)$ и $E_p/E_{p0} = F(E/E_p)$ очевидна как для сезонных, так и для среднемесячных значений испарения. Различия в соотношениях $E_p/E_{p0} = F(E/E_p)$ для сезонных значений и для летних месяцев незначительны. Поскольку диапазон значений E_p/E_{p0} для отдельных месяцев сужается, соотношения $E_p/E_{p0} = F(E/E_p)$ и $E/E_{p0} = F(E/E_p)$ в этом случае выглядят лучше с точки зрения симметричности расположения кривых (рис. 3).

Результаты, показанные на рисунке 2, демонстрируют возможность разделить с помощью модельных данных разномасштабные влияния на расчетные значения фактического испарения.

Аналогичные зависимости, построенные для отдельных регионов зоны тайги и степной зоны (рис. 2 д, е), удовлетворительно согласуются с теми, которые представлены на рисунках 2 в, г.

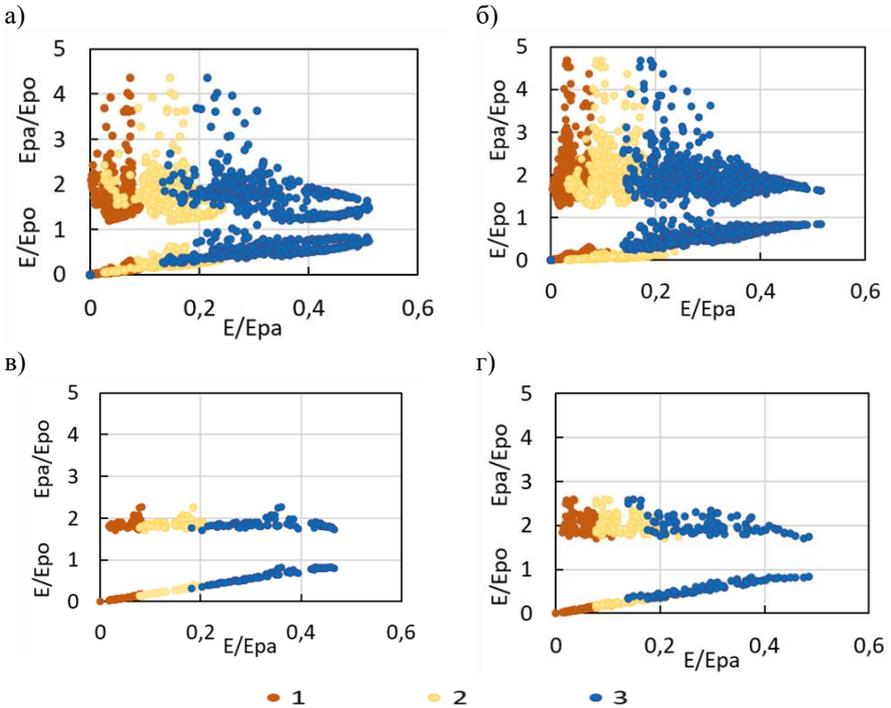


Рис. 3. Изменение ДС для объединенных данных регионов, различающихся степенью засушливости:

а — объединенные данные для зоны тайги и зоны засушливых степей ЕТР (июль + август);

б — сезонные (май–сентябрь) данные для зоны тайги и зоны засушливых степей ЕТР; в — зона тайги (май); г — зона тайги (сентябрь),

1 — $S = 20\%$; 2 — $S = 40\%$; 3 — $S = 80\%$

Для практических расчетов фактического испарения связь между E , E_{pa} и E_{po} задается алгебраическим выражением, которое обобщает формулу (1), используя другую нормировку функций. В этом случае E нормируется на E_{pa} , и линейная форма зависимости

$E/E_p = F(E_p/E_p)$ соответствует симметрии графиков $E/E_p = F(E/E_p)$ и $E_p/E_p = F(E/E_p)$ на рисунках 2 и 3.

Проверка универсальности соотношения $E/E_p = F(E_p/E_p)$ на основе тестирования по данным наблюдений или балансовым расчетам выполнялась неоднократно (Brutsaert, 2015; Han, Tian, 2020; Li et al., 2021; Lintner et al., 2015; Wang et al., 2021, 2022; Yunfei et al., 2023). При построении этой зависимости в явном виде учитывается необходимость выполнения граничных условий: $E = E_p = E_a$ при насыщающей и нулевой влажности на поверхности участка, для которого оценивается величина E . Возможные варианты соотношения $E/E_p = F(E_p/E_p)$, полученные на основе оценок E_a и E_p с помощью метода сравнения профилей, анализировались с использованием объединенных сезонных данных зоны тайги и степной зоны ЕТР.

На рисунке заметна зависимость исследуемого соотношения от суммарной площади переувлажненных полос внутри неоднородного участка поверхности. Зависимость $E/E_p = F(E_p/E_p)$ можно аппроксимировать полиномом четвертой степени, как это сделано, например, в работе (Brutsaert, 2015). Коэффициенты полиномов, описывающих изучаемую зависимость для объединенных данных степной зоны и участков, покрытых травой в зоне тайги, и объединенных данных разных растительных зон, но для случая лесной растительности, различаются незначительно. Для отдельных регионов зоны тайги различия в коэффициентах полиномов могут быть более заметны (рис. 4 в).

Полученная в (Brutsaert, 2015) формула для расчета E предполагается универсальной и проверяется данными измерений и балансовых оценок. Из рисунка 4 понятно, как модельные сезонные значения $E/E_p = F(E_p/E_p)$ варьируют в зависимости от региона и динамических характеристик поверхности. Из рисунка видно, что в случае объединения данных регионов, характеризующихся разным климатом, различия в коэффициентах аппроксимирующих полиномов, связанные с динамическим влиянием поверхности, уменьшаются. Для отдельных регионов динамическое влияние оказывается более существенным. Так, сезонные значения E

на территории северо-запада ЕТР количественно согласуются с данными локальных наблюдений (Сперанская, 2016; Школьник и др., 2020) при определенном сочетании Z_0 и rb . Величины E в этом регионе находятся в диапазоне 300–500 мм/сезон при эффективной шероховатости порядка 0,5 м во всех точках расчетной области.

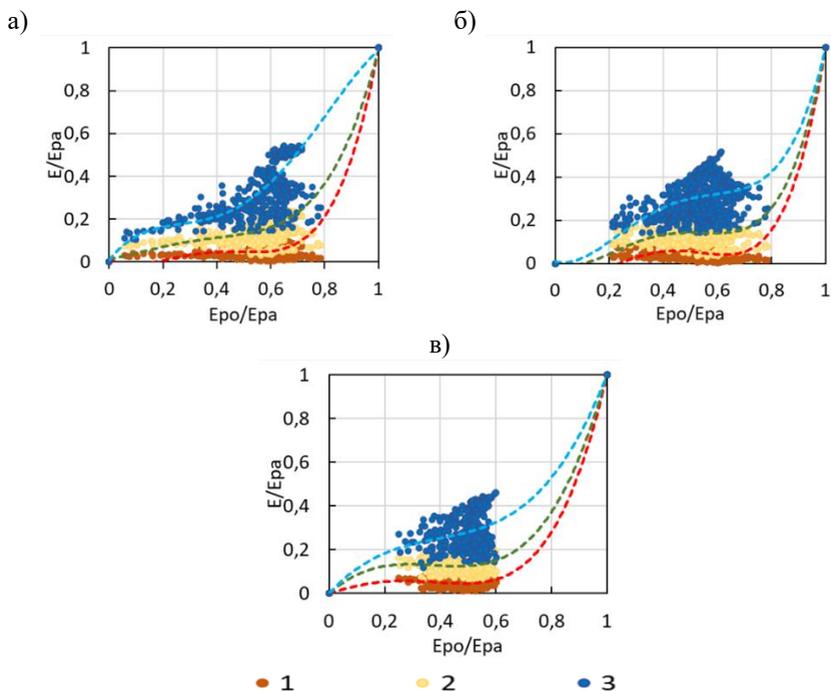


Рис. 4. Аппроксимация зависимости $E/E_{ра} = F(E_{ро}/E_{ра})$ для разной площади увлажненных участков поверхности на основе сезонных данных об испарении, рассчитанных с помощью МПС:

- а — объединенные данные для степной зоны и лесной растительности зоны тайги; б — объединенные данные для степной зоны и участков, покрытых травой в зоне тайги;
- в — данные для участков, занятых лесной растительностью в зоне тайги.

Обозначения для S см. на рисунке 3

Представленные на рисунке 5 модельные функции аппроксимируют соотношение $E/E_{ра} = F(E_{ро}/E_{ра})$ в случае, когда переувлажненные участки составляют 60 % поверхности, для которой выполняется расчет фактического испарения. Рисунок отражает влияние характеристик набегающего потока на анализируемую зависимость. Различие в функциональной зависимости, показанной на рисунке, определяется как эффективной шероховатостью, так и влажностью набегающего потока. Выбор оптимального значения шероховатости в отдельных регионах нуждается в дополнительном исследовании.

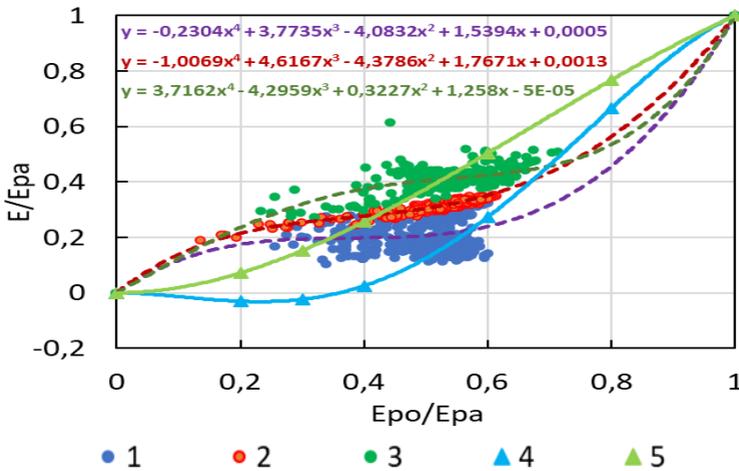


Рис. 5. Зависимость аппроксимации ДС от эффективной шероховатости и влажности набегающего потока.

- 1 — Z_0 задано совпадающим со значениями, принятыми в РКМ, влажность набегающего на неоднородный участок потока, $rb = 0,3$ (относительная влажность 30 %);
- 2 — $Z_0 = 1$ м, $rb = 0,3$; 3 — $Z_0 = 0,5$ м, $rb = 0,7$;
- 4 — расчет по формуле ДС из работы (Crago et al., 2018) при $s = 2$;
- 5 — расчет по формуле ДС из работы (Crago et al., 2018) при $s = 4$

Аналитическое выражение, аппроксимирующее ДС в работе (Brutsaert, 2015), не учитывает неоднородность участка и соответствует экспериментальным данным, полученным в разных

географических зонах. Различия между соотношениями, полученными в (Brutsaert, 2015), и соотношениями, основанными на данных МАПС, наиболее заметны при $E/E_{ра} \leq 0,5$. При выборе аналитического выражения, аппроксимирующего исследуемую зависимость, необходимо принимать во внимание и величину отношения $L1/L$.

Пространственные распределения фактической эвапотранспирации на ЕТР

Анализ чувствительности ДС к параметрам модели и условиям формирования воздушного потока, набегающего на неоднородно увлажненную поверхность, необходимо дополнить рассмотрением деформации пространственных распределений E в зависимости от выбора версии ДС и площади переувлажненных участков поверхности. Приведем примеры таких распределений в лесной зоне ЕТР (рис. 6, 7). Расчетные распределения, показанные на рисунке 6, получены при $S = \sum L1/L = 60\%$ и разных значениях шероховатости подстилающей поверхности.

Все распределения для базового периода характеризуются убыванием E с юго-запада на северо-восток. Значения E в западных регионах южной тайги достигают 600 мм/сезон, на северо-востоке расчетной области характерные значения E находятся преимущественно в диапазоне 250–350 мм/сезон. Пространственные распределения E при использовании разных методов оценки удовлетворительно согласуются (рис. 6). Однако выбор аппроксимирующего выражения для функции $E/E_{ра} = F(E_{ро}/E_{ра})$ оказывает влияние на количественные показатели фактического испарения.

Если рассчитывать E по формуле Брутцаерта (Brutsaert, 2015), используя для оценок $E_{ро}$ формулу Пенмана—Монтейта (Gao Jiaqi et al., 2018; Nan et al., 2021), а для оценок $E_{ра}$ формулу Пристли—Тейлора (Crago et al., 2022; Nan, Tian, 2020), то сезонные значения фактической эвапотранспирации оказываются наименьшими во всей расчетной области.

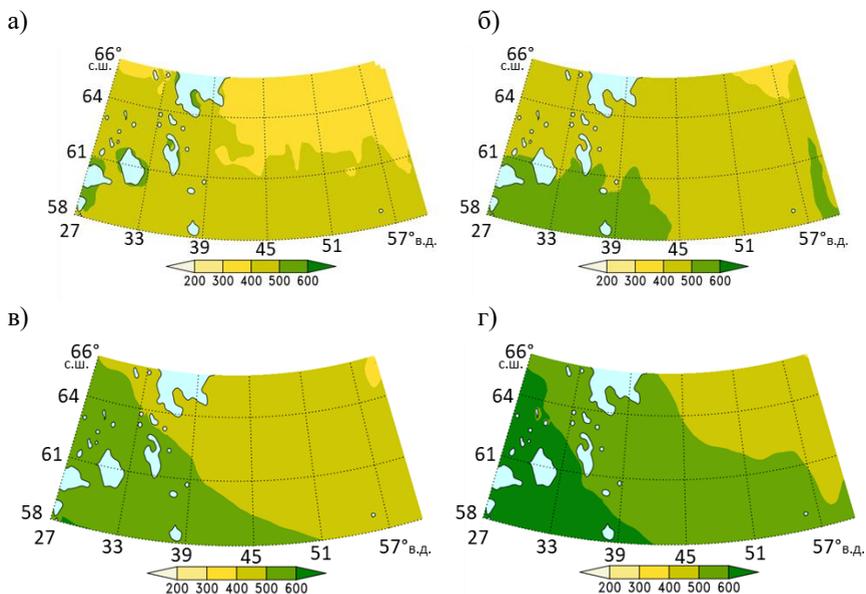


Рис. 6. Пространственное распределение фактического испарения для базового периода:

- а — расчет фактического испарения выполнен по формуле Брутцаерта (Brutsaert, 2015) на основе данных РКМ;
- б — расчет с использованием МСП и $Z_0 = 0,5$ м, $rb = 0,7$;
- в, г — расчет с использованием аппроксимации ДС полиномом третьей (в) и четвертой (г) степени

Расчет с использованием МСП приводит к наибольшим сезонным значениям E на территории ЕТР. Замена метода МСП для расчета E в узлах сетки РКМ на метод расчета с помощью полиномиального алгебраического соотношения существенно не влияет на картину пространственных распределений и количественные оценки E . Таким образом, предложенный учет неоднородности исследуемого полигона путем выбора соответствующей аппроксимации ДС сохраняет основное преимущество метода, которое состоит в использовании стандартной метеорологической информации. Из рисунка б видно, что расчетные величины E оказываются больше, когда ДС аппроксимируется полиномом четвертой степени, по сравнению

с величинами, вычисленными с помощью полинома третьей степени. Модельный анализ изменения аппроксимации ДС в отдельных регионах позволяет уточнить расчетные значения фактического испарения применительно к нуждам практического земледелия и лесопользования. Пространственные распределения E адекватно демонстрируют влияние площади переувлажненных участков поверхности на расчетные величины фактической эвапотранспирации (рис. 7).

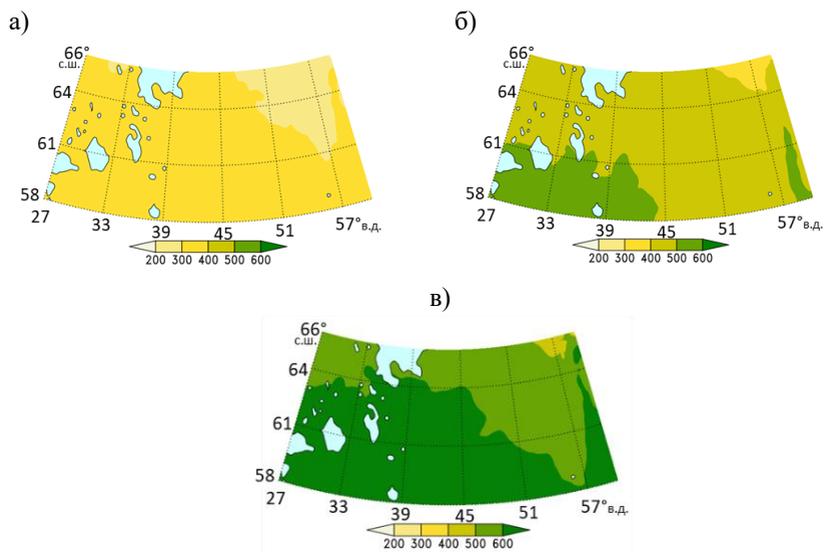


Рис. 7. Пространственное распределение фактического испарения для базового периода при площади увлажнения S 40 (а), 60 (б) и 80 % (в)

Заключение

Расчет фактического испарения для неоднородных участков суши необходим при решении практических задач экологии, гидрологии, водопользования. В настоящей работе анализируются возможности использования данных о структуре пограничного слоя атмосферы над

неоднородной поверхностью для обобщения на случай неоднородной поверхности широко известного дополнительного соотношения, связывающего фактическое (E), потенциальное (E_{po}) и видимое потенциальное испарение (E_{pa}).

ДС удобно для практического использования и прогностических оценок эволюции E , потому что не требует никакой информации, кроме данных стандартных метеорологических наблюдений. С помощью простой мезомасштабной модели атмосферного пограничного слоя в узлах регулярной пространственной сетки климатической модели (здесь использованы результаты расчетов региональной модели ГГО с разрешением 25 км) оцениваются E , E_{po} , E_{pa} и проверяется наличие связи между этими характеристиками. Это позволяет более ясно представить физические основы ДС и его отдельных компонентов. Показано, как неоднородность поверхности влияет на локальные оценки и пространственные распределения фактического испарения на территории ЕТР. Выполненный анализ показывает, как изменяется зависимость E от E_{pa} и E_{po} при разных временных и пространственных масштабах осреднения.

Полученное в работе обобщение дополнительного соотношения для случая неоднородной подстилающей поверхности может быть использовано для оценки испарения в регионах, слабо освещенных данными наблюдений (тундра, лесные массивы, испарение речных водосборов Сибири). Дальнейшие исследования с привлечением достаточного объема статистически надежного экспериментального материала позволят уточнить и оптимизировать ДС с учетом особенностей конкретных регионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Надёжина Е. Д., Школьник И. М., Стернзат А. В., Пикалёва А. А., Егоров Б. Н. (2022). Моделирование эволюции засушливых условий в XXI веке для обоснования мер по адаптации агросектора России к климатическим воздействиям // Метеорология и гидрология. № 5. С. 52–60.

Надёжина Е. Д., Школьник И. М., Стернзат А. В., Пикалёва А. А. (2023). Ожидаемые изменения испарения в XXI веке в зоне тайги Европейской территории России // Водные ресурсы. Вып. 50, № 5. С. 538–541.

Пикалёва А. А., Школьник И. М., Стернзат А. В., Егоров Б. Н., Надёжина Е. Д. (2020). Сценарный ансамблевый прогноз изменений дефицита влаги в аридных регионах в середине XXI века // *Метеорология и гидрология*. № 12. С. 107–121.

Симонов В. В. (1968). О суммарном испарении с водоема при наличии ледяных полей // *Труды ГГО*. Вып. 226. С. 46–56.

Сперанская Н. А. (2016). Испарение с поверхности почвы с травяным покровом: доступные наблюдения и восстановленные данные // *Изв. РАН. Сер. Географическая*. № 2. С. 49–60.

Школьник И. М., Надёжина Е. Д., Стернзат А. В., Пикалёва А. А., Егоров Б. Н. (2020). Моделирование атмосферного пограничного слоя над неоднородно увлажненной поверхностью как инструмент для оценки суммарного испарения // *Метеорология и гидрология*. № 12. С. 27–38.

Aminzadeh M., Or D. (2017). The complementary relationship between actual and potential evaporation for spatially heterogeneous surfaces // *Water Resour. Res.* V. 53. P. 580–601. DOI: 10.1002/2016WR019759.

Bouchet R. J. (1963). Evapotranspiration potentielle, et production agricole // *Annal. Agronom.* V. 14. P. 743–824.

Brutsaert W. (2015). A generalized complementary principle with physical constraints for land-surface evaporation // *Water Resour. Res.* V. 51. P. 8087–8093. URL: <https://doi.org/10.1002/2015wr017720>.

Brutsaert W., Lei C. Heng, Lu Zhang (2020). Spatial Distribution of Global Landscape Evaporation in the Early Twenty-First Century by Means of a Generalized Complementary Relationship. URL: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0208.1>.

Brutsaert W., Stricker H. (1979). An Advection-Aridity Approach to Estimate Actual Regional Evapotranspiration // *Water Resources Research*. V. 15. P. 443–450. URL: <https://doi.org/10.1029/WR015i002p00443>.

Crago R., Qualls R. (2018). Evaluation of the Generalized and Rescaled Complementary Evaporation Relationships // *Water Resour. Res.* V. 54. P. 8086–8102. URL: <https://doi.org/10.1029/2018WR023401>.

Crago R., Qualls R., Szilagyi J. (2022). Complementary Relationship for evaporation performance at different spatial and temporal scales // *Journal of Hydrology*. V. 608. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127575>.

Gao Jiaqi, Miao Qiao, Xinfu Qiu, Yan Zeng, Huanhuan Hua, Xiuzhi Ye, Mustapha Adamu (2018). Estimation of Actual Evapotranspiration Distribution in the Huaihe River Upstream Basin Based on the Generalized Complementary Principle // *Advances in Meteorology*. Article ID 2158168. URL: <https://doi.org/10.1155/2018/2158168>.

Han S., Tian F. (2020). A review of the complementary principle of evaporation: from the original linear relationship to generalized nonlinear functions // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* V. 24. P. 2269–2285. URL: <https://doi.org/10.5194/hess-24-2269-2020>.

Han S., Tian F., Wang W., Wang L. (2021). Sigmoid generalized complementary equation for evaporation over wet surfaces: A nonlinear modification of the Priestley-Taylor

equation // *Water Resources Research*. V. 57 (9). E2020WR028737. URL: <https://doi.org/10.1029/2020WR028737>.

Li T., Xia J., Zhang L., She D., Wang G., Cheng L. (2021). An improved complementary relationship for estimating evapotranspiration attributed to climate change and revegetation in the Loess Plateau // *China Journal of Hydrology*. V. 592. P. 125516. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125516>.

Lintner B. R., Gentine P., Findell K. L., Salvucci G. D. (2015). The Budyko and complementary relationships in an idealized model of large-scale land–atmosphere coupling // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* V. 19. P. 2119–2131. URL: www.hydrol-earth-systsci.net/19/2119/2015/doi:10.5194/hess-19-2119-2015.

Pan S., Tian H., Dangal S. R. S., Yang Q., Yang J., Lu C., Tao B., Ren W., Ouyang Z. (2015). Responses of global terrestrial evapotranspiration to climate change and increasing atmospheric CO₂ in the 21st century // *Earth's Future*. V. 3. P. 15–35. DOI: 10.1002/2014EF000263.

Pan S., Pan N., Tian H., Friedlingstein P., Stith S., Shi H., Arora V. K., Haverd V., Jain A. K., Kato E., Lienert S., Lombardozzi D., Nabel J. E. M. S., Oulé C., Poulter B., Zaehle S., Running S. W. (2020). Evaluation of global terrestrial evapotranspiration using state-of-the-art approaches in remote sensing, machine learning and land surface modeling // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* V. 24. P. 1485–1509.

Pastorello G., Trotta C., Canfora E. et al. (2020). The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data // *Sci. Data* 7 (1). P. 225. URL: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0534-3org/10.5194/hess-24>.

Renhua Yan, Janfeng Gao (2021). Evaluating the complementary relationship to calculate evapotranspiration by using multiple models in a humid lowland region // *Southeast China Agricultural and Forest Meteorology*. V. 310. P. 108645. URL: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108645>.

Shkolnik I., Pavlova T., Efimov S. et al. (2018). Future changes in peak river flows across northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8.5 scenario // *Clim. Dyn.* V. 50. P. 215–230. URL: <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3600-6>.

Tu Z., Yang Y., Roderick M. L., McVicar T. R. (2023). Potential evaporation and the complementary relationship // *Water Resources Research*. V. 59. e2022WR033763. URL: <https://doi.org/10.1029/2022WR033763https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127575tps://doi.org/10.5194/hess-24>.

Vuuren D. P. van, Edmonds J., Kainuma M. et al. (2011). The representative concentration pathways: an overview // *Climatic Change*. V. 109. P. 5–31.

Wang L., Han S., Tian F. (2021). At which timescale does the complementary principle perform best in evaporation estimation? // *Hydrology and Earth System Sciences*. V. 25 (1). P. 375–386. URL: <https://doi.org/10.5194/hess-25-375-2021>.

Wang L., Tian F., Han S., Cui T., Meng X., Hu H. (2022). Determination of the asymmetric parameter in complementary relations of evaporation in alpine grasslands of the

Tibetan Plateau // Journal of Hydrology. V. 605. 127306. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127306>.

Yunfei L., Dongwei G., Changjun Y. et al. (2023). Estimating the Temporal and Spatial Variations in Evapotranspiration with a Nonlinear Evaporation Complementary Relationship Model in Hyper-arid Areas // Water Resources Management. V. 37. P. 521–535. URL: <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03384-x>.

Zhang L., Cheng L., Brutsaert W. (2017). Estimation of land surface evaporation using a generalized nonlinear complementary relationship // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. V. 122 (3). P. 1475–1487. URL: <https://doi.org/10.1002/2016JD025936>.

УДК 504.064

**ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ
МАЛОБЮДЖЕТНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ
В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ**

*М. С. Загайнова¹, К. В. Иванченко¹, С. С. Чичерин¹,
В. П. Челибанов², И. С. Яновский¹*

¹Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, Карбышева, 7

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021 St. Petersburg, Karbysheva st. 7

e-mail: labzag@voeikovmgo.ru

²Приборостроительное предприятие АО «ОПТЭК»
199178 Санкт-Петербург, Малый проспект В.О., д. 58, литер А, пом. 20Н

JSC «ОПТЕС»
199178 Saint-Petersburg, Maly av. V.O., 58A

e-mail: info@optec.ru

Поступила в редакцию 19.10.2023
Поступила после доработки 27.11.2023

Введение

В последние годы на фоне развития информационных технологий возобновился интерес к использованию в области охраны атмосферного воздуха упрощенных средств измерений на основе малобюджетных датчиков, не обладающих характеристиками позволяющими использовать данные измерений для государственного мониторинга и регулирования качества атмосферного воздуха. Известные в настоящее время попытки разных стран мира, включая Российскую Федерацию, обосновать возможность применения таких

упрощенных средств измерений взамен референтных (или доказать их эквивалентность) не увенчались успехом.

Целью настоящей статьи является обобщение мирового и отечественного опыта использования упрощенных средств измерений на основе малобюджетных датчиков и определение их возможного места в области охраны атмосферного воздуха.

Определение термина «малогабаритные (малобюджетные) датчики» законодательно не установлено, сами датчики (сенсоры) являются чувствительными элементами в составе газоаналитического прибора и не могут рассматриваться в качестве самостоятельного средства измерения. Также отсутствует определение термина «высокоплотная сигнальная сеть» и нормативные требования к ней.

В этой связи в рамках данной статьи используются условные термины: «устройство МБД» — устройство на основе малобюджетных датчиков и «ВСС» — высокоплотная сигнальная сеть, оснащенная МБД.

Анализ действующих нормативных правовых актов Российской Федерации

Согласно статье 5 Федерального закона № 113-ФЗ от 19 июля 1998 г. «О гидрометеорологической службе» одним из основных направлений государственного регулирования деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях является обеспечение единства измерений при наблюдениях за состоянием окружающей среды и ее загрязнением в соответствии с законодательством Российской Федерации об обеспечении единства измерений.

Статья 10 ФЗ № 113-ФЗ от 19 июля 1998 г. гласит: «Участники деятельности гидрометеорологической службы обязаны соблюдать законодательство Российской Федерации об обеспечении единства измерений, в т. ч. требования, установленные федеральным органом исполнительной власти в области гидрометеорологии и смежных с ней областях, при проведении наблюдений за состоянием окружающей среды, ее загрязнением, сборе, обработке, хранении

и распространении информации о состоянии окружающей среды, ее загрязнении, а также при получении информационной продукции».

Пунктом 3 статьи 1 Федерального закона № 102-ФЗ от 26.06.2008 г. «Об обеспечении единства измерений» деятельность в области гидрометеорологии, мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды, включающая мониторинг атмосферного воздуха, отнесена к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. В соответствии со статьей 5 указанного Закона измерения должны выполняться по первичным референтным методикам (методам) измерений, референтным методикам (методам) измерений и другим аттестованным методикам (методам) измерений, за исключением методик (методов) измерений, предназначенных для выполнения прямых измерений, с применением средств измерений утвержденного типа, прошедших поверку. Результаты измерений должны быть выражены в единицах, допущенных к применению в Российской Федерации.

Закрепленный российским законодательством подход в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений соответствует международным требованиям в данной сфере.

Постановлением Правительства Российской Федерации № 1847 от 16 ноября 2020 г. «Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений» утверждены обязательные метрологические требования

к измерениям, в т.ч. при проведении измерений содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе.

В соответствии с Федеральным Законом «О лицензировании отдельных видов деятельности» № 28-ФЗ от 13.03.2002 г. и в целях обеспечения основных государственных функций Росгидромета применяется механизм лицензирования деятельности в области мониторинга. Лицензирование регламентировано Постановлением Правительства РФ № 1845 от 16 ноября 2020 г. «О лицензировании деятельности в области гидрометеорологии и в смежных с ней областях (за исключением указанной деятельности, осуществляемой в ходе инженерных изысканий, выполняемых для подготовки проектной

документации, строительства, реконструкции объектов капитального строительства)». Указанное Постановление требует от лицензиатов наличия технических средств и оборудования, принадлежащих ему на праве собственности или на ином законном основании, соответствующих требованиям к средствам измерений, установленным законодательством Российской Федерации об обеспечении единства измерений, и необходимых для выполнения работ (оказания услуг), составляющих деятельность в области гидрометеорологии и в смежных с ней областях. Последнее регламентируется Приказом Минприроды России № 524 от 30.07.2020 г., который утвердил требования к проведению наблюдений за состоянием окружающей среды, её загрязнением, в т. ч. за загрязнением атмосферного воздуха, которые учитывают нормы, предусмотренные законодательством об обеспечении единства измерений, а также устанавливают обязательные требования к условиям их применения, включающим требования к размещению пунктов наблюдения, их количеству (в зависимости от численности населения) и созданию охранных зон.

Приказ Минприроды РФ № 524 от 30.07.2020 года «Об утверждении требований к проведению наблюдений за состоянием окружающей среды, ее загрязнением» для автоматических анализаторов устанавливает требование к обеспечению в диапазоне измерения от 0 до 10 ПДКм.р. (максимальная разовая предельно-допустимая концентрация вредного (загрязняющего) вещества в воздухе населенных мест) величины приведенной погрешности не более 25 %.

В соответствии с п. 181 указанного Приказа средства измерения допускаются к использованию в целях проведения наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха по результатам параллельных наблюдений (измерений) на государственной наблюдательной сети.

Применение средств измерений в сфере государственного мониторинга атмосферного воздуха допускается при выполнении следующих условий:

– соответствие метрологических характеристик средств измерений, внесенных в описание типа СИ, включенного

в Федеральный государственный информационный фонд Росстандарта (ФГИС), требованиям приказа Минприроды № 524 от 30.07.2020 г. «Об утверждении требований к проведению наблюдений за состоянием окружающей среды, ее загрязнением»;

– эквивалентность действующим методикам и приборам, используемым на государственной наблюдательной сети Росгидромета.

К сожалению, характеристики отечественных газоаналитических приборов на основе электрохимических датчиков, внесенные в ФГИС «АРШИН» вызывают определенные сомнения: протоколы метрологических испытаний в свободном доступе отсутствуют, производитель приборов такие документы для ознакомления не предоставлял, а параллельные измерения по требованиям и в объемах РД 52.04.840-15 «Применение результатов мониторинга загрязнения атмосферного воздуха, полученных с помощью методов непрерывных измерений» не проводились (см. раздел «Результаты российских испытаний устройств» настоящей статьи).

Авторами статьи проведена теоретическая оценка предельных возможностей и ограничений по использованию устройств на основе МБД (далее устройств МБД).

Международный опыт использования устройств на основе малобюджетных датчиков

Директива Европейского союза 2008/50/ЕС статья 2 п. 20 и Директива ЕС 2015/1480/ЕС не рекомендуют, хотя и допускают использовать индикативные измерения (с ослабленными требованиями к точности) для качественной (не для госрегулирования) оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха.

Подробный анализ возможностей устройств на основе так называемых малобюджетных датчиков приведен в статье (Sokhi R. S. et al., 2022) основной вывод авторов в которой состоит в том, что они не могут заменять референтные и эквивалентные анализаторы для регуляторного мониторинга загрязнения атмосферы, однако их можно использовать как дополнение в качестве источника

ориентировочных качественных (не обладающих требуемым уровнем достоверности) данных о составе атмосферы. Сообщается, что для исследованных датчиков характерны значительный дрейф чувствительности прибора к измеряемому газу при изменении кросс-влияния неизмеряемых компонентов атмосферного воздуха, а также старение прибора. Характеристики могут варьировать в широких пределах даже среди датчиков одной и той же модели, сделанных на одном заводе.

Авторы статьи (Sokhi R. S. et al., 2022) также указывают, что устройства на основе МБД могут быть использованы в сфере гражданского (частного) применения (не для официальной оценки качества атмосферного воздуха) и для контроля воздуха в помещении (рабочая зона). Предложен вариант на базе большого количества устройств МБД, собирающих большие объемы данных, создать программу более детальной оценки качества воздуха по площади в городских районах. Высокоплотные сети устройств МБД, могут предоставлять пользователям новые персональные характеристики воздействия загрязнителей воздуха, с высоким разрешением по пространству, информацию о наименее загрязненных районах города, динамике и предупреждений об изменениях загрязнения воздуха.

Датчики, имеющиеся на рынке, в основном ориентированы на контроль воздуха для рабочих зон и промышленных выбросов. Производители датчиков пытаются их адаптировать для использования в устройствах, обеспечивающих возможность регистрации низких концентраций газовых и аэрозольных примесей в атмосферном воздухе.

Наиболее важным требованием при возможном развертывании сети устройств МБД в больших масштабах, является обеспечение контроля качества данных. К устройствам МБД следует относиться как к любому аналитическому прибору: для них требуется регулярная, как правило, частая градуировка и коррекция дрейфа точки отсчета, учет изменения чувствительности во времени. ВМО определяет градуировку устройств МБД как установление связи между результатами измерений МБД и эталонном, причем эталоном может

быть либо поверенный эталонный прибор, либо эталонный материал для взвешенных частиц.

Для пользователей устройств МБД желающих проверить соответствуют или не соответствуют полученные ими данные измерениям требованиям директивы ЕС, в объединенном исследовательском центре ЕС разработана специальная (к сожалению, не очень простая) многоуровневая методика (Yatkin S. et al, 2022).

Мероприятия по предварительной и последующей градуировке (калибровке) и проверке работы устройств МБД по-прежнему остаются важной составляющей их эксплуатации, поскольку неадекватная градуировка (калибровка) приводит к получению некачественных данных.

В идеале пользователям следует применять устройства МБД в непосредственной близости от аналогичных эталонных приборов для мониторинга, при этом добиться наилучшего результата сравнения показателей можно в том случае, когда такие приборы работают в условиях окружающей среды, схожих с теми, в которых в итоге предполагается эксплуатировать устройства МБД. Многие устройства МБД поступают от производителей с заводской градуировкой, однако оценку ее качества лучше всего проводить на местах. Такой подход позволит повысить качество данных устройств МБД в целях дальнейшего обеспечения максимально возможной точности и воспроизводимости результатов измерений, снижая их неопределенность (WMO, 2024).

Следует отметить, что вышеприведенные рекомендации могут быть реализованы в рамках действующих национальных метрологических стандартов Российской Федерации исключительно при наличии аттестованной методики измерений, регламентирующей процедуру передачи калибровочного коэффициента (коэффициентов) от одного средства измерения (референтного) к другому (например, к устройству МБД). В определенных случаях калибровочные коэффициенты могут представлять собой и сложную функцию!

Достоверность результатов измерений, получаемых с применением устройств МБД, можно проверить только при выполнении следующих условий:

- организация принудительного (активного), через пробоотборный зонд, нормированного для данного типа МБД отбора проб воздуха для анализа;
- пробоподготовка с применением средств стабилизации температуры и влажности воздуха, подаваемого на вход датчика;
- проведение периодических (регламентированных) калибровок устройств МБД в межповерочном интервале;
- обязательная разработка и утверждение инструкции по градуировке устройств МБД на основе методики поверки;
- для канала измерения массовой концентрации взвешенных частиц PM_{2.5}, PM₁₀ и общей пыли не реже, чем раз в год определение корректировочных коэффициентов по гравиметрической методике измерения.

Следует отметить, что затраты на эксплуатационные расходы (ежемесячная градуировка, техническое обслуживание, ежегодная замена датчиков) ставят под вопрос утверждение «малобюджетный» по отношению к данным устройствам.

Для некоторых датчиков заводские настройки градуировки/калибровки приведены в технических паспортах, для других — применяется модель математического преобразования данных. Однако заводской настройки для многих устройств МБД пока недостаточно для обеспечения надежной и долговременной точности во всем диапазоне внешних условий, в которых может использоваться датчик (WMO, 2024).

Крайне важно наличие исчерпывающей информации о поведении устройства, так как данные низкого или неизвестного качества менее полезны, чем отсутствие данных, поскольку это может привести к неправильным решениям (Snyder E.G. et al, 2013).

Во многих научных исследованиях использовались недорогие датчики мелкодисперсных частиц (PM) и газов в различных мероприятиях по наблюдениям за загрязнением воздуха, но лишь немногие исследователи сообщили о характеристиках работы устройств МБД и соответствующем приемлемом качестве данных.

Многие эксперименты подтверждают, что на результаты измерений устройств МБД в значительной степени влияют условия

окружающей среды (температура и влажность воздуха, скорость ветра), физико-химические характеристики частиц для датчиков мелкодисперсных частиц РМ и перекрестная чувствительность к газам для газовых датчиков.

Ряд исследований показал, что датчики в лабораторных условиях работали лучше, чем в полевых. Каждое устройство МБД должно быть настроено индивидуально на месте его эксплуатации, поскольку даже устройства одного и того же типа могут выдавать разные результаты измерений при одинаковых условиях (Rai A. S. et al, 2017).

В целом при сравнении результатов датчиков, построенных на принципе оптического рассеяния, с эталонными измерениями характерны: значения коэффициента детерминации (R^2) от 0,01 до 0,50; коэффициентов уравнения линейной регрессии (коэффициент наклона линии регрессии) — 0,11–0,45, что говорит о неприемлемом уровне корреляции (Feinberg S. et al, 2018). К датчикам данного типа можно отнести: mod. OPC N2 (Alphasense), mod. Air Quality Egg, mod. Airviz Speck v2, mod. Perkin Elmer Elm, mod. Shinyei PMS-SYS-1, mod. Caipol CairClip PM-prototype.

Значительно лучшими характеристиками обладают датчики твердых частиц, которые определяют количество частиц того или иного размера, по рассеянию света. Коэффициент детерминации достигает для таких датчиков 0,77, а коэффициент уравнения линейной регрессии до 1,2 (Feinberg S. et al, 2018). К датчикам взвешенных частиц (РМ) этого типа можно отнести: mod. PALAS AQ Guard Smart, mod. Dylos, mod.831 MetOne, mod. RTI MicroPEM, mod. TSI Air Assure. В ходе испытаний выяснилось, что даже при относительно нормальной работе датчиков, в концентрациях мелкодисперсных частиц РМ10 и РМ2.5 можно ожидать погрешности достигающие 28 % и более, что недопустимо для требований, предъявляемым к приборам в области мониторинга загрязнения атмосферы (МЗА). Метрологические исследования 3-х сенсоров пыли OPC-N3 (работающих на основе измерения коэффициента рассеяния света на частицах пыли), проведенные в течение 14 месяцев в ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» подтвердили этот неутешительный

и неприемлемый результат. Для более глубокого понимания влияния факторов окружающей среды необходимы дальнейшие исследования.

Стабильность работы устройств МБД также недостаточно изучена. Исследования показали неудовлетворительную сходимостью результатов измерений, получаемых устройствами МБД в сравнении с размещенными в непосредственной близости эталонными приборами ($R^2 < 0,18$) (Williams R. et al, 2017).

Устройства МБД, используемые в настоящее время для измерения газообразных загрязняющих веществ, также имеют недостатки: высокую чувствительность к изменениям условий окружающей среды и мешающих газов.

Например, датчики Alphasens Ltd, MEMBRAPOR, Honeywell International Inc. обладают чрезвычайно высокой перекрестной чувствительностью к неизмеряемым компонентам. Датчики NO₂-B43F, SO₂-B4, NH₃-B1, H₂S-4B и Озона OX-B431 компании Alphasens Ltd также обладают высоким уровнем перекрестной чувствительности.

С целью повышения селективности датчиков используют дополнительные газовые твердотельные фильтры, что сводит на нет такой важный показатель датчика, как долговременная стабильность низкой перекрестной чувствительности.

Другой подход — снижение перекрестной чувствительности датчиков через введение коэффициентов на каждый канал многокомпонентного анализатора также не обеспечивает долговременные метрологические характеристики устройства.

Влияние температуры на качество работы электрохимических датчиков, особенно при ее значениях выше +30 С, оказалось очень значительным. Это обстоятельство требует температурной стабилизации устройств МБД.

В лабораторных условиях в датчиках NO₂ и NH₃ обнаруживается заметное влияние параметра расхода газа на выходной аналитический сигнал, что может приводить к дополнительной погрешности измерения до 50 %.

Таким образом, пользователи должны быть осведомлены о недостатках вышеупомянутых характеристик функционирования и ограничениях на использование устройств МБД при развертывании

сети датчиков. Кроме того, поскольку долговременная (более недели) надежность этих приборов в значительной степени остается неизвестной, пользователю рекомендуется опытным путем определять требуемый период калибровки для каждого типа устройств в реальных условиях эксплуатации.

В случае развертывания масштабной сети на базе устройств МБД с целью получения информации для составления пространственно-временных карт загрязнения воздуха с высоким разрешением частая градуировка на месте может оказаться практически неосуществимой. Производителями устройств МБД предлагается использовать статистические методы для обнаружения неисправностей устройств МБД и анализа качества их данных. Недавние достижения в области анализа данных с использованием статистических методов и машинного обучения могут способствовать разработке алгоритмов корректировки получаемых данных МБД для высокоплотных сетей.

Использование недорогих сенсорных технологий в области контроля загрязнения воздуха (при достижении ими приемлемого уровня качества данных наблюдений) потенциально может привести к информационному всплеску, обеспечивая получение пространственно-временных данных о загрязнении воздуха высокой плотности. Такие данные могут быть использованы для улучшения оценок очертаний зон сверхнормативного воздействия и повышения осведомленности общественности о загрязнении воздуха. Отметим, что потенциальный успех подходов с машинным обучением опирается на наличие достаточного парка «обучающих датчиков», имеющих (что важно!) качество референтных приборов. Однако к настоящему времени подобный подход в Российской Федерации не имеет статуса нормативного и может применяться исключительно в исследовательских целях.

Необходимо признать, что невозможно с использованием эталонного прибора откалибровать устройство МБД для каждого потенциально мешающего параметра, и что некоторые потенциально мешающие параметры могут быть соотнесены с другими неизмеренными параметрами.

Например, изменение потока анализируемого газа в результате возрастания сопротивления пылевых фильтров, установленных на входе устройства МБД может приводить к занижению показаний по измеряемому компоненту. Естественная эксплуатационная выработка химического реагента, который используется в качестве пропитки в буферном фильтре устройства МБД (используется для снижения перекрестной чувствительности датчика) также скажется на метрологических характеристиках устройств.

В ряде исследований было подробно оценено влияние факторов окружающей среды (в основном, относительной влажности и температуры). Например, в одном из них для изучения влияния относительной влажности и температуры на выходные данные трех различных датчиков взвешенных частиц РМ использовалась камера, в которой массовая концентрация частиц поддерживалась постоянной.

Было обнаружено, что выходные параметры датчиков сначала увеличивались, а затем уменьшались по мере увеличения относительной влажности с 20 до 90 %. Влияние температуры на выходные сигналы датчиков в этом эксперименте оказалось заметно меньше. Влияние влажности на выходные сигналы датчиков объясняется поглощением излучения водой, вызывающим завышение концентрации частиц. Принимая во внимание, что рассеяние и поглощение света теоретически не зависят от температуры, можно сделать вывод, что колебания температуры не должны существенно влиять на результаты измерений оптического датчика (Wang Y. et al, 2015).

В одном из исследований показано, что концентрации, измеренные датчиками различных типов при относительной влажности более 90 %, также требуют введения соответствующей поправки (Csongor Bathory et al, 2019).

В докладе Всемирной метеорологической организации (WMO, 2024) также подчеркивается, что недорогие датчики не являются равноценной заменой эталонных приборов, особенно для государственного мониторинга, основной целью которого является контроль соблюдения установленных нормативов качества воздуха (ПДК). Однако они могут использоваться как дополнение

к мониторингу для получения индикативных данных о составе атмосферы (в т.ч. числе парниковых газов). Основные выводы экспертов ВМО заключаются в том, что эти устройства пока не подходят для замены сетей государственного мониторинга. Устройства МБД должны работать в соответствии с протоколом строгого обеспечения и контроля качества, который отвечает целям проведения исследования или превосходит их; почти у всех устройств МБД есть как известные, так и до сих пор неизвестные недостатки, которые влияют на корректность их работы и точность измерений. Устройства МБД могут представлять практический интерес для измерения концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе в тех регионах, где качественные наблюдения за составом атмосферы не проводятся.

МБД, по-видимому, работают лучше при высоких концентрациях загрязняющих веществ, что позволяет использовать их в сильнозагрязненных районах для оценочного (косвенного) контроля промышленных объектов (Rai A.S. et al, 2017).

В настоящее время в Евросоюзе устройства МБД не рекомендованы для целей регуляторного мониторинга в странах ЕС, поскольку они, как правило, не соответствуют критериям качества данных, указанным в Директивах 2008/50/ЕС и 2015/1480/ЕС. Агентством по охране окружающей среды США (EPA) устройства МБД ни одного из производителей не включены в перечень, допущенных к регуляторному мониторингу в США.

Конструктивные особенности электрохимических устройств МБД и их применение в задачах определения загрязнения воздуха

В настоящее время известно несколько типов сенсорных устройств МБД, которые могут применяться для измерения или регистрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и воздухе рабочей зоны. К ним относятся устройства:

– на основе датчиков, работающих на принципе изменения электрического сопротивления (либо импеданса), которое возникает

на толстостенных металлооксидных, металлических или полимерных пленках;

– на основе амперометрических и потенциометрических датчиков, сигнал с которых снимается в форме изменяющегося электрического тока;

– на основе датчиков измерения электрической емкости металлооксидного полупроводника, которая изменяется при взаимодействии с молекулами газа-загрязнителя;

– на основе полевых транзисторов, работа которых основана на изменении поляризации активного слоя под действием анализируемого газа;

– на основе датчиков–пеллисторов, термисторов или термобатарей, температура (аналитический сигнал) которых изменяется как функция взаимодействия молекул газа с поверхностью;

– на основе оптических датчиков, связывающих измеряемое оптическое поглощение с концентрацией молекул, которые находятся между источником и приемником излучения;

– на основе датчиков поверхностного плазмонного резонанса, в которых измеряется угол падения оптической волны при появлении поверхностного плазмона из-за изменения показателя преломления среды, содержащей анализируемый газ.

Наибольшее применение для работы в устройствах МБД нашли амперометрические и потенциометрические датчики, оказавшиеся эффективными для обнаружения и измерения токсичных газов. Они работают в режиме топливных элементов, а их характеристики относительно стабильны в течение длительного времени.

Самый простой датчик для аналитического использования состоит из двух электродов: чувствительного и компенсирующего, между которыми находится тонкий слой электролита. Указанные электроды помещают в небольшую цилиндрическую емкость (как правило, выполненную из пластмассы), с капиллярным отверстием, через которое анализируемый газ поступает к чувствительному электроду. Электроды через контактные разъемы соединены с нагрузочным резистором, падение напряжения, на котором в результате протекания тока и представляет собою

аналитический сигнал, пропорциональный концентрации газа. Молекулы целевого газа диффундируют в датчик и далее окисляются либо восстанавливаются на чувствительном электроде. На электроде происходит соответственно обратная реакция восстановления или окисления, и как результат — во внешней электрической цепи возникает ток.

Количество газа, поступающего в датчик, определяется параметрами капиллярного диффузионного барьера. Ток пропорционален концентрации газа, при этом парциальное давление газа существенно не сказывается на изменении аналитического сигнала в отличие от количества или концентрации молекул газа, поступивших в датчик. Таким образом, важнейшей (ключевой) особенностью датчика данной конструкции является капиллярный диффузионный барьер, роль которого — контролировать ограничение газа, поступающего на чувствительный электрод.

Реакции, протекающие на электродах датчика под действием газового потока, содержащего целевой компонент (например, окись углерода) могут быть записаны следующим образом:

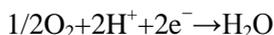


Схема процесса для обнаружения иного вещества в воздухе, который может быть окислен электрохимическим способом, аналогична.

Из уравнений химических реакций следует важное обстоятельство. Для образования электрического тока на втором электроде необходим кислород. Как правило, поток пробы газа всегда содержит некоторое количество кислорода из воздуха. Воздействие же анаэробного (бескислородного) газа на датчик может приводить к сильному дрейфу аналитического сигнала. Это важно понимать для того, чтобы

не допускать погружения электрохимических датчиков в анаэробную газовую смесь.

Возможны ситуации, когда при анализе на вход датчика поступают достаточно высокие концентрации анализируемого газа. В этом случае необходимо обеспечивать дополнительное количество кислорода возле второго электрода датчика.

Известный недостаток двухэлектродного датчика — возможная поляризация второго электрода, приводящая к ограничению диапазона измерения газа, устраняется применением третьего электрода — электрода сравнения. Этот третий электрод сравнения поддерживают при постоянном электрическом потенциале. При этом даже в случае поляризации на втором электроде не будет наблюдаться нежелательное влияние на работу чувствительного электрода датчика. Однако наличие третьего электрода сравнения может приводить к иным изменениям, ухудшающим качество работы датчика по таким характеристикам, как, например, перекрестные интерференционные влияния газов на сигнал от целевого анализируемого компонента, или температурная зависимость смещения отсчетного уровня сигнала датчика при нулевом значении концентрации газа.

Такой важный параметр датчиков, как перекрестная чувствительность к другим газам, может быть значительно снижена введением в конструкцию электрохимического датчика четвертого электрода. Например, сенсорные реакции, которые участвуют в датчиках окиси углерода, с точки зрения электрических явлений на электродах подобны тем, что наблюдаются при регистрации атомов водорода. По этой причине, если водород присутствует в содержащей окись углерода газовой смеси, реакция с водородом нарушает корректность измерения CO. В этом случае четвертый вспомогательный электрод играет роль датчика измерения водорода в то время, как CO и часть водорода реагируют на основном чувствительном электроде. Как итог, сигнал от четвертого электрода как компенсационная подставка вычитается из сигнала чувствительного электрода, формируя корректный выходной сигнал от оксида углерода в присутствии водорода в смеси.

На работу датчика существенное влияние также оказывает изменение температуры. Например, повышение температуры среды всего на 10 градусов фактически в два раза повышает базовый сигнал очень многих электрохимических датчиков. Эти эффекты оказались весьма значительными, что особенно важно при измерениях низких концентраций таких газов, как озон и оксид углерода. Предполагая, что температурная зависимость сигналов от чувствительного и вспомогательного электродов близка, сигнал от вспомогательного электрода вычитают из сигнала чувствительного электрода. Такая компенсация, вероятно, может снизить температурный эффект.

Для обеспечения удовлетворительной работы датчиков необходимо:

- использовать напряжение питания с высоким уровнем стабилизации;
- корректно поддерживать тот диапазон эксплуатационных температур, который приводится в спецификации на данный тип датчика, исключить даже кратковременное воздействие экстремальных (отрицательных и положительных) температур;
- использовать стабилизатор влажности в тракте забора анализируемого воздуха;
- исключить загрязнение датчика;
- исключить любые механические удары и повреждения датчиков;
- предусмотреть возможность достаточно частой калибровки датчиков как по целевому компоненту, так и при подаче на датчики нулевого воздуха.

К сожалению, даже при выполнении всех вышеперечисленных требований, электрохимические датчики не могут быть использованы для целей мониторинга загрязнения атмосферы из-за их низкой селективности. Задача исключения или приемлемого снижения кросс-влияния неизмеряемых газов на целевой компонент воздуха на сегодня все еще не решена.

Оценка метрологических характеристик устройств МБД. Методы количественного анализа, используемые в датчиках

Наиболее полно разработаны и широко используются в устройствах МБД электрохимический метод детектирования в атмосферном воздухе низких концентраций оксида углерода, оксида и диоксида азота, аммиака, диоксида серы, сероводорода, озона, формальдегида, оптический метод измерения концентраций фракций пыли PM2.5 и PM10 и термокаталитический и фотоионизационный методы для измерения концентрации летучих органических соединений (ЛОС). Последние методы реализуются с использованием датчиков на основе полупроводниковых сенсоров.

Достоинства электрохимических датчиков:

- малые габариты и энергопотребление – важные параметры для создания сетей МБД;
- быстроедействие до нескольких секунд – важный параметр для оперативного контроля.

Недостатки электрохимических датчиков:

- малый срок службы (9–36 месяцев) независимо от того, эксплуатируется датчик или находится на хранении;
- наличие зависимости от температуры и влажности воздуха;
- зависимость от стабильности газового потока, проходящего через датчик;
- перекрестная чувствительность, влияющая на селективность измерений;
- значительный дрейф нуля и чувствительности, требующий проведения частой градуировки с использованием эталонов или референтного анализатора, что значительно увеличивает затраты на эксплуатацию при использовании большого количества датчиков.

Электрохимический принцип измерения концентраций основных газовых примесей в атмосферном воздухе широко используется в МБД отечественного производства, однако, следует отметить, что в Российской Федерации датчики с требуемыми характеристиками не производятся, все имеющиеся устройства (газоаналитические

приборы) используют сенсоры производства Alphasense (UK) и «Membrapor» (Швейцария).

Известны различные иностранные МБД, такие как:

- станция мониторинга окружающего воздуха AQM65 производства фирмы «Aeroqual, Ltd» (Новая Зеландия);
- мультисенсорная мини-станция мониторинга качества воздуха AQMesh фирмы Environmental Instruments Ltd (Великобритания);
- автономная сетевая мини-станция Cairnet V3 фирмы Envea (Франция);
- мини-станция качества атмосферного воздуха AQMS-3000 фирмы Focused Photoniks Inc. (Китай).

В вышеперечисленном оборудовании используются, в основном, электрохимические сенсоры ведущих зарубежных фирм, таких как «Honeywell International Inc» (США), «Membrapor» (Швейцария), «Cubic Sensor and Instrument Co» (Китай), «Figaro Engineering Inc» (Япония), «Alphasense Inc» (Великобритания), «Dräger Safety AG & Co.KGaA» (Германия).

Отечественные производители (ООО «Унискан», ООО «СитиЭйр», ООО «Р-Нокс» (Беларусь), ООО "Тингеникс"), используют в своих газоаналитических приборах датчики только двух зарубежных фирм «Alphasense Inc» (Великобритания) и «Membrapor» (Швейцария), что облегчает авторам статьи проведение оценки предельных возможностей этих газоаналитических приборов, предлагаемых для решения задач контроля загрязнения атмосферного воздуха.

Оптический принцип применяется в оптических сенсорах, созданных для измерения концентраций пыли различных фракций (PM2.5, PM10). Этот принцип детектирования взвешенных частиц используется в сенсорах пылемеров CityAir Dust (ООО «Унискан», Новосибирск) и мобильных измерителей концентрации пыли фракций PM10 и PM2.5 AirExpert Mini PM (ООО «Союзатомприбор», Москва).

В стандарте Европейской организации по стандартизации (CEN) рассматривается вопрос о метрологических требованиях к газоаналитическим приборам этого класса. В частности, предлагается установить погрешности для устройств МБД,

выполняющих ориентировочные измерения, не более 25% для каждого вида газообразных загрязнителей и 50 % для PM10 и PM2.5 (CEN/TS 17660-1 Air quality). Это контрастирует со значениями 15 % для газовых и 25 % для аэрозольных примесей при измерениях эталонными приборами или эквивалентными анализаторами. Поэтому в указанном стандарте CEN прошедшие тестирование датчики классифицируются с отсылкой к директиве Евросоюза 2008/50/EC как индикативные.

В связи с наличием существенной перекрестной чувствительности электрохимических датчиков, когда в устройствах, созданных на их основе, используется значительное количество датчиков на разные вещества, результаты их совместных измерений подвергаются математической обработке. Использование как отдельных датчиков или их ограниченного (измененного) количества в составе устройства МБД формально недопустимо. Указанная особенность метрологической аттестации также существенно повышает стоимость поверки устройств МБД, т. к. необходимо проведение поверки всех датчиков устройства по отдельности и в совокупности.

Результаты российских испытаний устройств МБД

Сертифицированные в Российской Федерации мини станции (на базе МБД) не соответствуют требованиям Приказа Минприроды РФ от 30.07.2022 № 524 «Об утверждении требований к проведению наблюдений за состоянием окружающей среды, её загрязнением».

Однако ФГБУ «ГГО» был проведен анализ результатов параллельных измерений указанных средств измерений, выполнявшихся в 2020–2024 гг. по неполной программе на станциях мониторинга загрязнения атмосферы в городах Москва, Челябинск, Томск, Казань, Мурманск, Новосибирск. Измерения проводились по каналам оксида углерода, диоксида азота, диоксида серы и озона.

Рассматривались основные параметры статистики параллельных измерений прибора-кандидата и эквивалентного средства измерения, в частности, оценивался коэффициент корреляции (допустимый интервал 0,75–1,0), наклон линии регрессии (допустимый интервал

0,8–1,2), среднее квадратическое отклонение (СКО) массива данных (допустимо не более 50 % от среднего значения). Кроме указанных статистических характеристик для оценки сходимости рядов тестируемых анализаторов использовались критерии Стьюдента и Фишера (РД 52.04.840-2015 «Применение результатов мониторинга качества атмосферного воздуха, полученных с помощью методов непрерывных измерений»).

Так как большинство этих параллельных измерений проводилось не на сети Росгидромета и не было верифицировано, по результатам анализа можно сделать только краткие предварительные выводы:

- содержание примесей в атмосферном воздухе за время эксперимента не выходило за уровни выше 1 ПДК_{СС} (среднесуточная предельно-допустимая концентрация), что недостаточно для полной оценки сходимости данных в диапазоне измерения датчиков;

- в диапазоне концентраций, ограниченном уровнем 2 ПДК_{СС}, получены удовлетворительные результаты по каналам измерения оксида углерода и озона и неудовлетворительные — по каналу диоксида серы;

- не исследован и не определен показатель надежности и долговременной стабильности метрологических характеристик в течение периода эксплуатации устройств МБД.

Таким образом, имеющиеся в свободном доступе данные опытной эксплуатации устройств МБД в Российской Федерации не позволяют сделать вывод об эквивалентности полученных измерений результатам наблюдений средствами и методами, допущенными к применению на государственной наблюдательной сети.

Тем не менее, устройства МБД, возможно, смогут найти применение при решении задач охраны атмосферного воздуха вне лицензируемой области мониторинга загрязнения атмосферного воздуха (МЗА). Ниже рассматриваются возможные варианты такого использования устройств МБД.

Обоснование целей и задач развертывания высокоплотной сигнальной сети состояния атмосферного воздуха

Устройства МБД могут помочь в решении ряда специальных и вспомогательных задач вне сферы государственного мониторинга атмосферного воздуха, в т. ч. в составе высокоплотных сигнальных сетей (ВСС). Они позволяют создавать сигнально-индикативные сети для решения прикладных задач в режиме реального или близкого к реальному времени, осуществлять предварительное оповещение и помогать принимать некоторые природоохранные решения.

Как правило, состояние загрязнения воздуха контролируется с помощью регуляторного мониторинга загрязнения воздуха, выполняемого на стационарных пунктах наблюдений. Автоматические станции мониторинга обычно имеют высокую закупочную стоимость и относительно невысокую стоимость ежегодного обслуживания. При этом такие станции отличаются высокой надежностью, точностью получаемых данных и способностью измерять широкий набор загрязняющих веществ как с помощью автоматических аналитических приборов, газоанализаторов так и посредством отбора проб с их последующим анализом в лабораторных условиях.

Недавние исследования показывают важность получения информации о загрязнении на микроуровне, включая индивидуальное воздействие на человека. Поэтому в настоящее время в разных странах идет развитие таких технологий.

Для увеличения пространственно-временного разрешения информации о загрязнении воздуха исследователи изучают возможности объединения данных со стационарных станций и устройств МБД в единую систему. Ожидается, что информация о загрязнении воздуха с высоким пространственно-временным разрешением сможет помочь населению принять надлежащие поведенческие меры в соответствии с их индивидуальными потребностями в области сохранения своего здоровья (например, астматики могут выбрать альтернативный, более здоровый маршрут, чтобы свести к минимуму воздействие загрязненного воздуха), а также

в целом повысить осведомленность общественности о загрязнении воздуха.

В связи с дороговизной автоматических станций мониторинга и ограниченностью возможностей по их размещению в условиях плотной застройки на территории города, решение указанных задач возможно только вне лицензируемой области мониторинга загрязнения атмосферного воздуха, за счет использования большого количества относительно дешевых устройств МБД, хотя и финансово затратных при их ежегодном обслуживании) в составе высокоплотных индикативных (сигнальных) сетей (ВСС), формируемых без учета требований Приказа Минприроды РФ от 30.07.2020 г. № 524 «Об утверждении требований к проведению наблюдений за состоянием окружающей среды, ее загрязнением».

ВСС, являясь индикативной системой, позволяет получить качественную оценку уровня загрязнения воздуха для последующего стандартизированного реагирования, например, выезда передвижной экологической лаборатории, учащения отбора проб, проверки поднадзорных предприятий. При этом официальное информирование населения возможно только на основании административных данных со станций государственного мониторинга загрязнения атмосферного воздуха (в т.ч. лабораторных анализов проб). Рекомендуется предусмотреть возможность информирования населения об уровне загрязнения воздуха, в т.ч. по результатам выездных проверок, и публикацию результатов с информацией о подтверждении или опровержении сигналов датчиков МБД.

Итак, по отношению к системе мониторинга высокоплотная сеть является по сути только индикатором наступления неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) или сверхнормативного загрязнения атмосферы линейными, площадными и локальными источниками, в т.ч. аварийного происхождения, а также от лесных пожаров. Высокоплотную сигнальную сеть, состоящую из устройств МБД, следует рассматривать как источник оперативной сигнальной (сопутствующей) информации для приблизительной оценки загрязнения атмосферного воздуха города, а также вероятной тенденции развития ситуации.

При разработке проекта ВСС для города необходимо установить регламент реагирования на нештатные ситуации в части использования передвижных лабораторий для выезда в контрольные точки, учащение отбора проб воздуха, проверки поднадзорных предприятий, появление НМУ.

При промышленной эксплуатации ВСС авторы (Yatkin S. et al, 2022) рекомендуют установку устройств у каждого пункта наблюдений со станциями действующей сети мониторинга в режиме параллельных (синхронных) измерений для корректировки данных на основании информации, получаемой с автоматических газоанализаторов.

Однако даже для применения такого подхода необходима разработка аттестованной, занесенной в Федеральный информационный фонд Росстандарта, методики проведения корректировки данных МБД.

Предварительно следует разработать и согласовать регламент обслуживания устройств МБД, входящих в состав ВСС.

В составе ВСС возможно создание следующих подсистем:

- уплотнение информационного покрытия на выделенных территориях в зонах превышений ПДК, определяемых по результатам сводных расчетов выбросов загрязняющих веществ;

- регулирование дорожного движения по экологическим параметрам (перераспределение транспортных потоков, изменение режима светофорных постов, ограничение движения групп транспорта);

- корректировка технологических режимов летней уборки автомобильных дорог (по параметру запыленности атмосферного воздуха);

- оперативный контроль санитарно-защитных зон (СЗЗ) объектов промышленности и энергетики;

- оперативный контроль расчетной зоны поражения аварийно-опасных объектов (хранилища аммиака, ГСМ и т.п.), техногенных аварий — по согласованию с МЧС;

- инструментальная инвентаризация парниковых газов (метан и диоксид углерода);

– выборочный контроль состояния воздуха на землях природно-заповедного фонда.

Для развертывания ВСС и эффективного использования большого объема генерируемых МБД данных высокого разрешения по времени и пространству, важно сформулировать рекомендации для определения функционирования, сбора, обработки информации и представления результатов, в том числе рекомендации по оценке качества краткосрочного и долгосрочного функционирования используемых МБД. Поскольку данные измерений МБД имеют более высокую степень неопределенности и ряд ограничений, связанных с мешающими влияниями загрязняющих веществ и их соединений в атмосферном воздухе, чем средства измерений в области регуляторного мониторинга, они не подходят в качестве автономного инструмента для оповещения общественности о сверхнормативном загрязнении. Алгоритмы интерпретации и процедура представления результатов измерений МБД и соответствующих метаданных для информационного обслуживания населения также требует регламентации.

При построении ВСС необходимо учитывать отличия имеющихся МБД для измерения концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе от референтных и эквивалентных методов и средств измерений, применяемых в МЗА.

Требуемая частая градуировка и регулировка с использованием традиционных методов технического обслуживания средств измерений невозможны или крайне затруднены в случае развертывания большого количества МБД.

МБД, как правило, имеют короткий срок службы, требуется частая их замена, в связи с чем для получения продолжительных рядов наблюдений и оценки изменения состояния воздуха требуются дополнительные усилия и значительные ежегодные затраты и эксплуатационные расходы, сопоставимые с закупочными ценами МБД¹.

¹ По состоянию цен на 2024 год, стоимость 8 (восьми) МБД, (например, на 5–7 каналов измерения), сопоставима с закупочной ценой автоматической станции

Перечень отслеживаемых загрязняющих веществ для программы работ на пунктах наблюдений устанавливается и уточняется на основе сведений о составе и характере выбросов, в соответствии с данными инвентаризации источников выбросов, результатами расчетов рассеивания загрязняющих веществ от отдельных предприятий и в целом по городу (сводные расчеты), а также на основе результатов предварительных обследований состояния загрязнения атмосферного воздуха в городе. При этом перечень загрязняющих веществ, доступных для определения МБД ограничен. Он, как правило, включает только основные загрязняющие вещества: диоксид азота, оксид углерода, диоксид серы, а также озон, метан, диоксид углерода, взвешенные частицы PM10 и PM2.5 (у разных производителей МБД состав датчиков может различаться). Количество пунктов и место для размещения МБД в составе ВСС зависит от решаемых системой задач.

Для контроля режима выбросов источников антропогенного воздействия в атмосферном воздухе МБД должны быть расположены таким образом, чтобы иметь возможность характеризовать состояние воздуха в связи с преобладающим направлением атмосферного переноса воздушных масс в наветренной и подветренной точках не менее чем с четырех сторон. Для пространственного анализа распространения продуктов горения при природных пожарах требуется более плотное секторальное расположение МБД на границах города и в ближайших пригородных зонах.

Выводы

В настоящее время известные и доступные на отечественном рынке устройства МБД не удовлетворяют нормативным требованиям,

атмосферного мониторинга, имеющей 10 каналов измерения загрязняющих веществ и метеоконцентрации, отвечающей всем необходимым нормативным требованиям и законодательству РФ. Исходя из учета стандартных 6 лет эксплуатации станции, следует отметить, что стоимость 4-х таких МБД, включая их ежегодное обслуживание, будет равноценно стоимости одной стандартной станции мониторинга атмосферного воздуха (10 каналов измерения загрязняющих веществ и метеоконцентрации), в том числе с учетом расходов на ее обслуживание и поверку.

установленным в Российской Федерации в области мониторинга загрязнения атмосферного воздуха. В странах ЕС и США МБД не рекомендованы для использования в области госрегулирования.

Анализ предельных возможностей электрохимических датчиков на примере сенсоров «Membrapor» (Швейцария) и «Alphasense Inc» (Великобритания), используемых в отечественных МБД, показал, что достижение метрологических характеристик сравнимых с характеристиками референтных или эквивалентных автоматических анализаторов МЗА невозможно, а существенные эксплуатационные затраты нивелируют их относительную закупочную дешевизну.

Информирование населения, как важной части лицензионной деятельности, возможно только с использованием средств измерений, отвечающих требованиям нормативно-методических документов Росгидромета, имеющих положительную экспертизу головной организации Росгидромета и допущенных к применению на сети наблюдений приказом Росгидромета.

В перспективе, использование устройств МБД может быть полезным для следующих целей:

- для дополнения к государственному (регуляторному) мониторингу загрязнения воздуха;
- для обнаружения и отслеживания вероятных источников выбросов и принятия мер реагирования в чрезвычайных ситуациях;
- в исследованиях, в т. ч. при проектировании или оптимизации сети стационарных постов наблюдения, определения территорий с однородным качеством воздуха, измерений на территориях, где не существует риска превышения предельно допустимых значений;
- для предварительной оценки загрязнения от одиночных источников (дорожное движение, промышленные объекты).

Легитимизация в системе Росстандарта Российской Федерации подходов к повышению информативности ВСС, предлагаемых экспертами ВМО, за счет применения методов совместной обработки информации автоматических станций опорной (государственной) сети мониторинга загрязнения атмосферного воздуха и данных, получаемых с устройств МБД системы ВСС, потребует разработки и аттестации соответствующей методики измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Báthory C., Kiss M.L., Trohá A., Dobó Z. Preliminary research for low-cost particulate matter sensor network. // E3S Web of Conferences (<https://doi.org/10.1051/e3sconf/2019>).

CEN/TS 17660-1 Air quality — Performance evaluation of air quality sensor systems — Part 1: Gaseous pollutants in ambient air [WWW Document], 2021. (<https://www.en-standard.eu/pd-cen-ts-17660-1-2021-air-quality-performance-evaluation-of-air-quality-sensor-systems-gaseous-pollutants-in-ambient-air/>).

DRAFT Roadmap for Next Generation Air Monitoring. U. S. Environmental Protection Agency. March 2013.

Integrating Low-cost Sensor Systems and Networks to Enhance Air Quality Applications. Edited by Malings C. World Meteorological Organization, GAW Report № 293, 2024.

Feinberg S., Williams R., Gayle S. W. Hagler, Rickard J., Brown R., Garver D., Harshfield G., Stauffer P., Mattson E., Judge R. Long-term evaluation of air sensor technology under ambient conditions in Denver, Colorado. // Atmospheric Measurement Techniques., 11, 4605–4615, 2018.

Karagulian F., Barbieri M., Kotsev A., Spinelle L., Gerboles M., Lagler F. et al. 2019. Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. Atmosphere-Basel 10.

Rai A. C., Kumar P., Pilla F., Skouloudis A.N., Di Sabatino S., Ratti C., Yasar A., Rickerby D. End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring. // Science of the Total Environment 607–608, 2017.

Sokhi R. S. et al. Advances in air quality research – current and emerging challenges. // Atmos. Chem. Phys., 22, 4615–4703, 2022.

Snyder E.G., Watkins T.H., Solomon P.A., Thoma E.D., Williams R.W., Hagler G.S., et al. 2013. The changing paradigm of air pollution monitoring. ACS Publications. // Environ. Sci. Technol. 2013, 47.

Wang Y., Li J., Jing H., Zhang Q., Jiang J., Biswas P. Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle sensors for particulate matter measurement. // Aerosol Sci. Technol. 49, 2015.

Williams D.E., Henshaw G.S., Bart M., Laing G., Wagner J., Naisbitt S., Salmond J.A. Validation of low-cost ozone measurement instruments suitable for use in an air-quality monitoring network. // Meas. Sci. Technol. 24, 2013.

Williams R., Conner T., Clements A. Performance Evaluation of the United Nations Environment Programme Air Quality Monitoring Unit. National Exposure Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency. EPA 600/R-17/171, 2017.

Yatkin S., Gerboles M., Borowiak A., Davila S., Spinelle L., Bartonova A., Dauge F., Schneider P., Van Poppel M., Peters J., Matheussen C., Signorini M. Modified Target Diagram to check compliance of low-cost sensors with the Data Quality Objectives of the European air quality directive. // Atmospheric Environment 273, 118967, 2022.

**ЭФФЕКТИВНЫЕ СХЕМЫ РАСЧЕТА МАКСИМАЛЬНЫХ
РАЗОВЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ
И АСИНХРОННОСТИ ВЫБРОСОВ ИСТОЧНИКОВ
И С УЧЕТОМ ДВИЖУЩИХСЯ ИСТОЧНИКОВ**

А. Д. Зив

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

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021 St. Petersburg, Karbysheva st., 7

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
197376 Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

Saint Petersburg Electrotechnical University
197376 St. Petersburg, Prof. Popova st., 5

E-mail: sasha-ziv@mail.ru

Поступила в редакцию 9.10.2023
Поступила после доработки 11.12.2023

Введение

Расчеты концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе являются неотъемлемой частью мероприятий по охране окружающей среды. В Российской Федерации используются три нормативные модели расчета: расчет максимальных разовых концентраций (МРК), концентраций, осредненных за длительный период времени, и среднесуточных концентраций. Основные положения соответствующих методик изложены в документе (Методы расчетов рассеивания выбросов..., 2017), далее в тексте — МРР.

Исходными данными для всех моделей являются параметры источников выбросов загрязняющих веществ, включая координаты, технические параметры и интенсивность эмиссий вредных веществ. В расчетах также используется специально подготовленная метеорологическая информация. Особенность российских моделей состоит в получении требуемых характеристик загрязнения воздуха путем выполнения вычислительных процедур, которые не связаны напрямую с перебором имевших место сочетаний метеорологических параметров в определенные моменты времени. Эффективность такого подхода продемонстрирована на результатах целого ряда экспериментальных исследований (Генихович и др., 1999). Однако при этом нет возможности напрямую учитывать временную изменчивость выбросов, их асинхронность и изменение положения источников

в пространстве с течением времени. При расчете средних концентраций эта проблема не возникает, поскольку используются годовые валовые выбросы, но для максимальных разовых концентраций может оказаться существенным препятствием. Возможны многовариантные расчеты, в результате которых определяется конфигурация источников, дающая наибольшее значение концентрации в конкретной расчетной точке (под конфигурацией понимается не только изменение параметров источников во времени и пространстве). Однако даже при небольшом числе источников многовариантные расчеты могут требовать значительного времени. К последнему классу источников можно отнести в первую очередь перемещающиеся источники, не относящиеся к автотранспорту, например, внедорожные машины. Основная тема публикаций по таким источникам — расчет их выбросов (Chapter 12. Air Quality; Lončarević et al., 2022), и лишь в нескольких работах при моделировании загрязнения воздуха непосредственно учитываются внедорожные машины.

Нужно отметить, что суда в акваториях также относят к внедорожной технике и рассматривают отдельно с учетом их пространственно-временного положения (Rittner et al., 2020). При этом мелкие суда учитывают наряду со строительной

и сельскохозяйственной техникой в сельском хозяйстве. Непосредственно при моделировании выбросы внедорожной техники, за исключением крупных судов и самолетов, аппроксимируются линейными или площадными источниками, в редких случаях — точечными, если какие-то машины находятся практически на месте (Teodora Milošević et al., 2020). Очевидно, что не все детали расчетов публикуются, но автору не удалось найти какие-либо рассуждения по поводу, например, передвижения строительной техники по площадке и вызванных этим сложностей с расчетами. Возможно, отчасти это объясняется тем, что использовались в первую очередь модели, в которых можно явно учесть временную изменчивость и выбросов, и условий рассеяния.

В данной работе рассматриваются варианты упрощения расчетов для некоторых случаев переменных источников, т. е. источников, выбросы которых могут изменяться во времени (нестационарность) и/или в пространстве. Рекомендации по учету нестационарности представлены, например, в (Методическое пособие..., 2012), где предлагается выбирать такую комбинацию выбросов, которая соответствовала бы наибольшему возможному воздействию. В частности, поскольку стандарт максимальной разовой концентрации относится к 20-минутному осреднению, выбросы меньшей продолжительности приводятся к этому интервалу в соответствии с формулой:

$$M_{20} = M \frac{t}{t_{20}}, \quad t_{20} = 1200 \text{ с}, \quad (1)$$

где M_{20} — выброс, приведенный к 20 мин, M — исходный выброс, t — продолжительность исходного выброса.

Выбор какой-то одной комбинации выбросов, соответствующей наихудшему воздействию, часто оказывается практически невозможным, поскольку имеется несколько групп источников, которые не могут работать одновременно в силу используемых технологических процессов, а определить заранее, которой из групп соответствует максимальный выброс, не представляется возможным.

Однако какие-то практические приемы расчетов в условиях тех или иных нестационарностей внедрены и успешно используются.

Таким примером может служить расчет рассеивания выбросов от автостоянок (Методическое пособие..., 2012).

В статье будут рассмотрены несколько подходов, позволяющих при незначительном увеличении используемых ресурсов (в первую очередь времени вычисления) учесть изменчивость источников при расчете максимальных разовых концентраций. При этом там, где это возможно, принимается, что два источника, работа которых происходит в течение промежутков времени, отстоящих более, чем на 20 минут, могут рассматриваться по отдельности без суммирования их вкладов в расчете МРК. В одном расчете участвует один из источников, в другом расчете — другой, окончательным результатом является максимальная из двух концентраций.

Расчет максимальных разовых концентраций

Стандартная схема

Для удобства дальнейшего изложения приведем описание стандартной процедуры расчета МРК в самой общей форме, не рассматривая все детали, которые несущественны для дальнейшего изложения.

Целью расчета для некоторой расчетной точки R является вычисление концентрации $c(R)$, обусловленной работой N источников по формуле:

$$c(R) = \max_{u,d} \sum_{n=1}^N M_n C_{n,m} f_n(R, u, d), f_n(R, u, d) \leq 1,0, \quad (2)$$

где $c(R)$ — концентрация в точке R ; M_n — мощность выброса n -го источника; $C_{n,m}$ — максимально возможная концентрация, обусловленная работой n -го источника при единичной мощности, зависящая только от его технических параметров; $f_n(R, u, d)$ — функция влияния n -го источника при фиксированных скорости ветра u и его направлении d .

Произведение $C_{n,m} \cdot f_n(R, u, d)$ является вкладом n -го источника при единичной мощности. В практических расчетах поиск максимума обычно осуществляется перебором конечного множества скоростей $\{u_i\}_{i=1,\dots,I}$ и направлений ветра $\{d_j\}_{j=1,\dots,J}$. Дискретизация при этом может быть достаточно подробной. Таким образом, в некоторой расчетной точке данной конфигурации источников сопоставляется матрица:

$$C_{i,j} = \sum_{n=1}^N M_n C_{n,m} f_n(R, u_i, d_j), \quad (3)$$

и $c(R) = \max_{i,j} \{C_{i,j}\}$. В дальнейшем предполагается именно такая схема расчетов. Вычисление $f_n(R, u, d)$ является элементарным шагом расчета.

При рассмотрении переменных источников мы фактически предполагаем наличие некоторого множества их конфигураций, и к выбору максимума по скоростям и направлениям ветра добавляется выбор максимума по конфигурациям. Выбор максимума по скоростям, направлениям и конфигурациям можно переставлять в произвольном порядке, однако «неблагоприятная» конфигурация может зависеть от расчетной точки, в этом заключается дополнительная сложность при рассмотрении внедорожных подвижных источников. Последнее более подробно будет обсуждаться ниже.

Мажорантная оценка максимальных разовых концентраций

Обычно расчеты по формуле (2) делаются на некотором множестве расчетных точек, и их результаты сравниваются с определенным критическим уровнем концентрации, который, вообще говоря, может зависеть от расчетной точки, часто это просто предельно допустимая концентрация (ПДК). Если такое сопоставление является целью расчета, имеют смысл мажорантные оценки результатов расчетов во всех или некоторых расчетных точках.

Самая простая оценка следует из того, что в (2) $f_n \leq 1$, и, таким образом,

$$\forall N_1 < N \quad c(R) \leq \max_{u,d} \sum_{n=1}^{N_1} M_n C_{n,m} f_n(R, u, d) + \sum_{n=N_1+1}^N M_n C_{n,m}.$$

Вариант $N_1 = 0$ не требует вычислений, кроме второй суммы, и эта оценка была популярна, когда ЭВМ были не такими развитыми, как сейчас. В современных условиях даже при $N_1 \neq 0$ она может быть полезна, когда речь идет об источниках с переменным положением, например, о внедорожной технике, которая как-то передвигается по промплощадке (см. раздел «Нестационарность в рамках стандартного подхода»).

Вторая мажорантная оценка основана на том, что $f_n(R, u, d) \leq f_n(R, u, d_{S_n \rightarrow R})$, где $d_{S_n \rightarrow R}$ — направление ветра от источника на расчетную точку:

$$c(R) \leq \hat{c}(R) = \sum_{n=1}^N M_n C_{n,m} \max_u f_n(R, u, d_{S_n \rightarrow R}), \quad (4)$$

и расчет можно проводить в два этапа с существенной, как правило, экономией времени счета. На первом этапе находят $\hat{c}(r)$ на всем множестве расчетных точек, а на втором — $c(r)$, но только для точек, для которых $\hat{c}(r) > \text{ПДК}$.

Соотношение $c(r)$ и $\hat{c}(r)$ и времени счета зависит от конфигурации источников. Если, например, 6 источников равномерно располагаются по кругу вокруг расчетной точки, мы получим примерно в 6 раз большую концентрацию, если, наоборот, источники сконцентрированы на небольшой площади, а расчетная точка достаточно удалена от них, завышение будет не очень большим. Это следует из того, что функция f_n убывает с увеличением угла α между направлением факела и линией «источник–точка», примерно как $\exp(-\sigma \cdot \text{tg}^2(\alpha))$, $5 \leq \sigma \leq 50$, и $c(r)$ равна вкладу одного из источников, тогда как $\hat{c}(r)$ равна вкладу всех шести.

В существующих в настоящее время программах расчета загрязнения воздуха, разработанных на основе МРР, присутствует обычно блок упрощенного расчета средних концентраций (п. 10.6 МРР), в котором вычисляется:

$$\bar{c}(R) = 0,1 \sum_{n=1}^N M_n C_{n,m} \max_u f_n(R, u, d_{Sn \rightarrow R}) \max\{p(d_{Sn \rightarrow R})/p_0, 1, 0\},$$

где $p(d_{Sn \rightarrow R})$ — повторяемость направления ветра от источника к расчетной точке, а p_0 — повторяемость, соответствующая круговой розе ветров, $p_0 = 1/2\pi$. В результате, если в исходных данных задается круговая роза ветров, то $\hat{c}(R)$ получается из $\bar{c}(R)$ умножением на 10.

В качестве подтверждения эффективности комбинированного расчета приведем пример сводного расчета для Санкт-Петербурга, проведенного для одного из веществ, содержащихся в базе инвентаризации, использованной в (Зив и др., 2020). При 1219 источниках и 20550 узлах расчетной сетки непосредственный расчет максимальных концентраций продолжался 75 мин, расчет по формуле (4) с использованием вышеупомянутой программы — 7 мин. В результате последнего расчета процент расчетных точек с концентрацией больше 1 ПДК оказался 0,27 %, для точного расчета он был 0,21 %. Таким образом, если нас интересует доля площади города с концентрацией больше ПДК, точный расчет достаточно провести в 0,27 % точек = 55 точек.

Вероятностная интерпретация нестационарности выбросов

При расчете максимальных разовых концентраций предполагается, что расчет дает оценку 0,98-й квантили концентрации в рассматриваемой точке. Формально это нигде не закреплено в нормативных документах, включая МРР. В то же время в (Генихович и др., 1999) на основе обработки данных экспериментов делается вывод, что предсказывается 0,98-я квантиль с погрешностью 20 %. Косвенным подтверждением является рекомендация в (Правила..., 2019) сопоставлять результаты расчетов МРК с 0,98-й квантилью измеренных концентраций. В (Генихович, Кириллова, 2019), в частности, на этом основана оценка эффективности нормирования выбросов.

Если рассматривать выбросы как случайную величину (СВ), то случайными величинами будут и расчетные результаты. По-видимому, можно предполагать, что и в данном случае требуется оценивать 0,98-ю квантиль, только при этом вероятностная интерпретация выбросов имеет смысл. Заметим, что ни в одном нормативном документе вероятностная интерпретация выбросов не рассматривается, хотя понятно, что приближенное определение «наихудшего» сочетания выбросов включает случайную ошибку с большой вероятностью.

В (Зив, 2012) уже рассматривался вопрос об асинхронных выбросах. Они предполагались независимыми и принимающими лишь два значения 0 и M с вероятностями, которые вычислялись как отношение среднегодового и максимального разового выбросов. В той же статье приводится достаточно экономичная схема расчета, использующая, однако, вычисление 0,98-й квантили случайной величины, равной сумме вкладов источников со случайными выбросами.

Развивать вероятностный подход можно по крайней мере по двум направлениям: во-первых, перейдя к нормально распределенным мощностям выбросов, во-вторых, сохраняя представление о выбросах как о дискретных СВ, увеличивать число этих дискретных значений.

В первом случае существует возможность воспользоваться известным свойством независимых нормальных СВ, их сумма есть также нормально распределенная СВ с суммарным средним и суммарной дисперсией. Если выброс каждого n -го источника распределен по закону $N(M_{cp,n}, \sigma^2 n)$, суммарный вклад источников при фиксированных u и d есть $N(M_{\Sigma}, \sigma^2_{\Sigma})$, где:

$$M_{\Sigma} = \sum_{n=1}^N M_{cp,n} f_n(R, u, d), \sigma^2_{\Sigma} = \sum_{n=1}^N \sigma^2_n f_n^2(R, u, d). \quad (5)$$

Понятно, что использование (5) незначительно увеличивает время расчета, а 98-я квантиль вычисляется далее с использованием функции Лапласа (Гмурман, 1999). Полученное значение просто прибавляется к вкладу, обусловленному действием стационарных источников.

Второй вариант состоит в развитии подхода, приводимого в (Зив, 2012), и переходе к дискретным случайным величинам, принимающим более двух значений. В упомянутой работе для фиксированной пары (U, D) использовалась гистограмма на основе разделенного на N частей интервала $(0, \Sigma C(U, D, M_{\max}))$. Ее обновление при добавлении очередного источника сводится к суммированию двух независимых дискретных величин, одна из которых (очередной источник) принимает лишь два значения. При двух значениях такое суммирование требует два «прохода» гистограммы, при трех — три и т. д. Таким образом, трудоемкость возрастает линейно.

В последующих пунктах вероятностный подход не рассматривается, а в рамках традиционного предлагаются экономичные схемы «обработки» нестационарности.

Нестационарность в рамках стандартного подхода

Предположим, что у нас имеется возможность отследить временной график функционирования источников в течение года. По-видимому, это не реализуемо в схеме больших сводных расчетов, однако вполне применимо для отдельных предприятий. Затем эти частные результаты могут быть включены в сводные расчеты.

В рамках модели MPP необходимо вычислить максимальную концентрацию для каждого 20-минутного интервала и затем выбрать из них максимум. Прямой перебор, очевидно, не осуществим, поэтому необходимо найти алгоритм, позволяющий оптимизировать выбор групп синхронно функционирующих источников. Формально всё можно свести именно к разным группам, в которых источник работает по схеме «да – нет», даже если конкретный источник меняет режимы, этот источник может быть «размножен». Последнее замечание основывается на том, что режимы работы источника дискретны, однако, если это не так, режимы могут быть преобразованы в дискретные с некоторой точностью.

Рассмотрим схему применительно к отдельному предприятию, на котором осуществлен временной график учета выбросов, и схему

для сводного расчета, которая уже использует результаты анализа для отдельных предприятий. Обе они фактически заключаются в разделении источников на несколько, возможно много, групп, одна из которых состоит из постоянно действующих источников (базовая группа), и остальных.

Отдельное предприятие

Пусть G_0 — базовая группа источников, которые можно считать функционирующими всегда, и G_1, G_2, \dots, G_K — остальные группы, из которых любые две не работают одновременно. Таким образом, необходимо для каждой расчетной точки найти максимальную концентрацию, суммируя при этом вклады каждой из групп отдельно, но совместно с группой $G_0, G_0 \cup G_1$, или $G_0 \cup G_2, \dots$, или $G_0 \cup G_K$.

Способов группировки источников может быть много. И, конечно, следует в каждом конкретном случае использовать свой, который может оказаться более выгодным, чем прямолинейный, который здесь приводится. Функционирование источника по 20-минутным интервалам можно представить как последовательность 0 и 1, в которой каждому 20-минутному интервалу соответствует 1, если источник работает, и 0 — в противном случае. Если имеется K источников и N 20-минутных интервалов (за год это $N = 3 \cdot 24 \cdot 366 = 26352$), все совместные расписания можно объединить в $(0, 1)$ — матрицу Z размером $N \times K$. Выделение интересующих нас групп осуществляется с помощью простого алгоритма. Пусть S_n — сумма элементов в n -й строке матрицы Z , а $n^{(1)}$ — номер строки, для которой эта сумма максимальна (если таких строк несколько, берется любая). Первая группа источников соответствует номерам столбцов в этой строке, в которой стоят 1:

$$S_n = \sum_{k=1}^K Z_{n,k}, n^{(1)}: S_{n^{(1)}} = \max_n \{S_n\}, G_1 = \{k\}_{Z_{n^{(1)},k}=1}. \quad (6)$$

Первая группа источников, таким образом, выделена. Уберем из матрицы Z все выделенные источники, например, следующим преобразованием:

$$Z_{n,k} = Z_{n,k} \cdot Z_{n^{(1)},k}. \quad (7)$$

При этом строка, соответствующая $n^{(1)}$, окажется нулевой. Повторим (6), получив при этом $n^{(2)}$ и G_2 . Снова сделаем преобразование (7) и так далее, пока в матрице Z не останется ненулевых элементов. Оптимизация алгоритма не является целью статьи, однако, даже в случае матрицы Z размерностью 26352 на 1000 время разбиения на группы оказывается в пределах нескольких минут, что ничтожно в сравнении со временем расчета концентраций. Для численных экспериментов использовалась генерация матрицы Z с помощью случайных чисел. Количество выделенных групп увеличивается с уменьшением наполненности матрицы.

После разбиения на группы собственно расчет концентраций может реализовываться следующим образом. Для единственной группы заполняется двумерный массив $C_{i,j}$, где первый индекс соответствует номеру расчетной скорости, а второй — номеру расчетного направления. Затем из полученных результатов выбирается максимум. Это не единственный способ нахождения максимума по скоростям и направлениям ветра, однако, как показывает опыт автора, такой способ в некоторых случаях достаточно эффективен. Если групп несколько, вначале $C_{i,j} = 0,0$. Далее для каждой последующей из M имеющихся групп положим:

$$C_{i,j} = \max\{c^{(m)}_{i,j}, C_{i,j}\}, \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (8)$$

где $c^{(m)}_{i,j}$ — вклад m -й группы при i, j .

Если теперь обозначить $c^{(0)}_{i,j}$ вклад основной группы G_0 , то окончательным результатом будет:

$$\max\{c^{(0)}_{i,j}, C_{i,j}\}. \quad (9)$$

Из приведенной схемы следует, что наличие нескольких групп лишь незначительно усложняет расчет.

Пример расчета

В следующем искусственном примере источники разделены на 11 групп (одна базовая и 10 остальных), из которых в любой момент времени может работать только одна группа. Всего 110 источников по 10 в каждой группе. Источники случайным образом распределены в квадрате 10×10 км, их параметры одинаковы за исключением высот, которые также случайным образом выбраны в диапазоне 2–20 м. 100 расчетных точек взяты также случайно в том же квадрате.

На рисунке 1 показаны результаты в виде отношений концентраций с учетом групп источников к концентрациям, полученным в предположении одновременного функционирования всех источников.

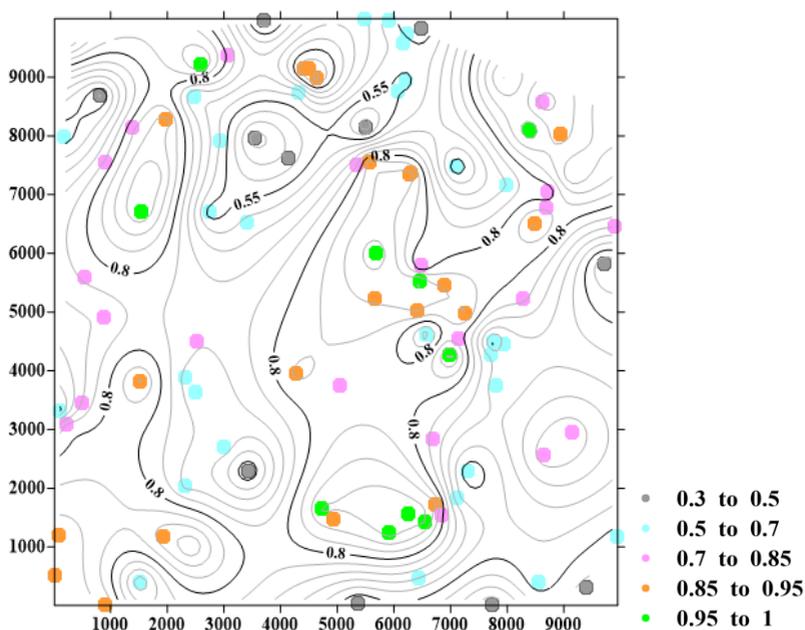


Рис. 1. Отношения концентраций в расчетных точках с учетом разделения на группы и без учета.

Разноцветные кружки соответствуют положению расчетных точек

Результат показан по точкам и в виде проведенных линий уровня. Шкала в легенде выбрана таким образом, что число точек в каждой градации примерно одинаково, 20 %. Таким образом, учет разделения на группы дает существенно меньшие значения концентраций. Время счета для данного примера 63 с при разделении источников на группы и 55 с без разделения, что и подтверждает высказанное ранее утверждение о незначительном увеличении времени счета.

Сводный расчет

Переход к сводному расчету от уровня предприятий возможен в двух вариантах. Первый заключается в том, что каждое предприятие предоставляет для сводного расчета результаты своих частных расчетов в узлах сетки сводного расчета, например, в виде вышеупомянутого массива $C_{i,j}$. Во втором предприятие представляет базу данных по выбросам, поделенную на группы. В первом случае скорость выполнения сводного расчета существенно сокращается, однако многократно увеличивается объем используемой информации. Во втором случае несколько меняется структура исходных данных по выбросам, объем данных также увеличивается, однако сам расчет будет занимать примерно столько же времени, как занимал бы, если бы все выбросы считались синхронными.

Расчет максимальных концентраций для движущихся источников и связанные с этим проблемы

Движущиеся источники являются нестационарными, причем как по времени, так и по пространству, а при наличии нескольких движущихся источников необходимо учесть еще и асинхронность их движения. С учетом того, что при расчете максимальных разовых концентраций используется 20-минутный интервал осреднения, можно разделить движущиеся источники на «быстрые» и «медленные». К первым отнесем те, которые совершают свой «маневр» в течение времени t , не превосходящем 20 мин. С поправкой на время осреднения такой источник можно рассматривать, как обычный линейный или совокупность таковых (ломаная линия).

Другие движущиеся источники можно назвать медленными: например, суда в акватории.

При рассмотрении в числе прочих движущихся источников (ДИ) схема расчета усложняется. Если «быстрые» ДИ включаются в стандартные схемы достаточно просто, то «медленные» целесообразно рассматривать отдельно.

Концентрация в некоторой точке, обусловленная движущимся источником и отнесенная к 20-минутному интервалу осреднения (1200 с), выражается или как интеграл по времени, или как интеграл по траектории, что обеспечивается заменой переменной:

$$t(l) = \int_0^l \frac{ds}{v(s)}. \quad (10)$$

В (МРР, формула (62)) предлагается интегрирование по траектории L :

$$C(x) = \frac{1}{1200} \int_L \frac{M(l)c(l,x)}{v(l)} dl, \quad (11)$$

где $x \in R^3$ — расчетная точка, $M(l)$ — мощность выброса, $c(l, x)$ — вклад в точку x единичного источника, находящегося в точке l траектории, $v(l)$ — скорость источника в точке l .

Для «быстрого» ДИ формула (6) оптимальна, по-видимому, однако в случае «медленного» ДИ имеет смысл перейти к интегрированию по времени:

$$C(x) = \frac{1}{1200} \int_0^T M(t)c(t, x) dt, \quad (12)$$

где T — время движения, $M(t)$ — мощность выброса в момент t , $c(t, x)$ — концентрация в расчетной точке от источника единичной мощности, находящегося в некоторой точке траектории, соответствующей времени t .

Формула (12) имеет несколько преимуществ. Во-первых, она позволяет рассматривать «в одном стиле» те участки траектории, на которых движение не осуществляется, $c(t + \Delta t, x) = c(t, x)$, и те,

на которых оно осуществляется. Во-вторых, когда рассматриваются несколько ДИ, формула (12) позволяет выделить периоды их синхронного движения и соответствующее при этом положение.

Если движение по траектории осуществляется за время T , большее 20 мин, мы должны рассматривать меняющийся во времени ДИ, который движется в течение 20 мин и начинает движение в промежутке $(0, T - 1200)$:

$$C(x, t) = \frac{1}{1200} \int_t^{t+1200} M(\tau) c(\tau, x) d\tau, 0 \leq t \leq T - 1200. \quad (13)$$

Поскольку целью наших расчетов в точке является выбор максимума по скоростям и направлениям ветра, парам (U, D) , и при каждом t вклад ДИ должен суммироваться со вкладами остальных стационарных источников, $S(U, D)$, задача максимизации выглядит как:

$$\begin{aligned} & \max_{(U,D),t} \{C(x, t, U, D) + S(U, D)\} = \\ & \max_{(U,D),t} \left(S(U, D) + \frac{1}{1200} \int_t^{t+1200} M(\tau) c(\tau, x, U, D) d\tau \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Последовательность выбора максимума $((U,D), t$ или $t, (U,D))$ может быть существенной с точки зрения оптимизации вычислений, это касается в первую очередь вычислений интегралов в (14).

Можно надеяться, что в случае «медленных» движущихся источников в отличие от «быстрых» в формуле (13) изменение подынтегральной функции достаточно медленное и на основе некоторых предварительных вычислений можно выбрать фиксированную дискретизацию по времени (не обязательно равномерную). Мы рассмотрим далее два варианта вычисления интеграла в (13) с соответствующей организацией вычислений, позволяющей минимизировать и объем хранимой информации, и объем вычислений.

Первый состоит в использовании матрицы $C_{i,j}$ из (3), которая уже использовалась в предыдущих разделах статьи. Предположим теперь,

что интегрирование в (10) осуществляется с помощью квадратурной формулы с M узлами и коэффициентами, которые, вообще говоря, могут зависеть от t . Произведение под интегралом в правой части (13) можно рассматривать как матрицу, аналогичную $S(U, D)$, и аппроксимировать интеграл с помощью квадратурной формулы:

$$\int_t^{t+1200} M(\tau)c(\tau, x, U, D)d\tau \cong \sum_{j=0}^M \omega_{j,t}C(t_{j,t}, U, D). \quad (15)$$

Заметим теперь, что, введя наряду с массивом C_{ij} массив Ct_{ij} и обнулив его предварительно, мы можем записать в него последовательно накапливаемую сумму в (15). Затем при первом суммировании просто пересылаем $Ct > C$, а при последующих суммированиях $C_{ij} = \max \{C_{ij}, Ct_{ij}\}$. После завершения всех интегрирований дополняем массив C вкладами остальных источников и завершаем вычисления выбором максимума по i, j .

Существенным является вопрос дискретизации по времени: как часто следует «сдвигать» 20-минутные интервалы? Дискретность в 20 мин вряд ли достаточна в некоторых ситуациях, поскольку за 20 мин даже корабль,двигающийся со скоростью 5 м/с, пройдет 6 км. В (Rittner et al., 2020), где рассматривается передвижение судов в акватории, дискретизация по пространству осуществляется с шагом 50 м, что при упомянутой скорости составляет 10 с. Если общая протяженность траектории 20 км, придется выполнить 400 интегрирований (11), т. е. рассчитать концентрацию от 400 источников. Обратим, однако, внимание на то, что в (15) одни и те же $C(t_{j,t}, U, D)$ попадают в несколько временных интервалов длиной T и их повторное вычисление избыточно. Такого двойного вычисления можно избежать, если использовать простые квадратурные формулы на равномерной сетке узлов. Например, формула трапеций может быть записана для последовательного сдвига (переменная S введена для сокращения изложения):

$$\int_{t_0}^{t_N} S(t)dt = \Delta t(S_0 + S_N) \cdot 0,5 + \Delta t(S_1 + S_2 + \dots + S_{N-1})$$

$$\int_{t_0+\Delta t}^{t_N+\Delta t} S(t)dt = \Delta t(S_1 + S_{N+1}) \cdot 0,5 + \Delta t(S_2 + S_2 + \dots + S_N),$$
(16)

и при переходе к следующему шагу нужно вычислить две новые матрицы и запомнить две с предыдущего шага, включая ту, в которой накапливается сумма.

Подобное возможно также и при интерполяции сплайнами. Конструкция оказывается более сложной, однако можно надеяться на увеличение шага разбиения по времени. Покажем, что при переходе к такой интерполяции методология расчетов может остаться почти прежней. Напомним, что широко распространенные кубические сплайны (Завьялов и др., 1980) обычно задаются значениями интерполируемой функции в узлах интерполяции t_j $y_j = y(t_j)$, $j = 0, 1, \dots, N$, и значениями вторых производных сплайна M_j в тех же точках. Последние находятся, как решение трехдиагональной системы линейных уравнений, дополненной граничными условиями, часто в форме $M_0 = M_N = 0$:

$$\frac{h_j}{6} M_{j-1} + \frac{h_j + h_{j+1}}{3} M_j + \frac{h_{j+1}}{6} M_{j+1} = \frac{y_{j+1} - y_j}{h_{j+1}} - \frac{y_j - y_{j-1}}{h_j},$$

$$h_j = t_{j+1} - t_j, j = 1, 2, \dots, N - 1.$$
(17)

Представив систему (17) в матричной форме:

$$A \cdot M = D \cdot y,$$
(18)

запишем ее решение:

$$M = A^{-1} \cdot D \cdot y.$$
(19)

Интеграл по промежутку (t_0, t_N) от полученного сплайна S выражается через y и M :

$$\int_{t_0}^{t_N} S(t)dt = \frac{1}{2} \sum_{j=0}^{N-1} h_j (y_j + y_{j+1}) - \frac{1}{24} \sum_{j=0}^{N-1} h_j^3 (M_j + M_{j+1}). \quad (20)$$

Правая часть (19) записывается в виде двух скалярных произведений:

$$\int_{t_0}^{t_N} S(t)dt = (\mathbf{u}, \mathbf{y}) - (\mathbf{v}, \mathbf{M}), \quad (21)$$

где векторы \mathbf{u} , \mathbf{v} очевидным образом получаются из (19).

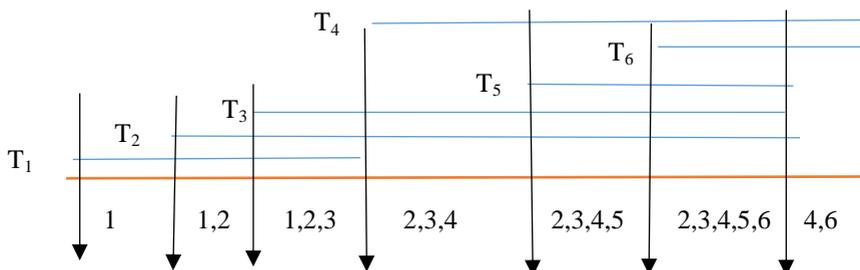
Теперь (17)–(20) позволяет свести интеграл от сплайна к скалярному произведению, в котором вектор \mathbf{w} зависит только от значений t_j , и может быть вычислен один раз для рассматриваемой траектории и дискретизации независимо также от расчетной точки:

$$\int_{t_0}^{t_N} S(t)dt = (\mathbf{w}, \mathbf{y}), \quad \mathbf{w} = \mathbf{u} - \mathbf{D}^T (\mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{v}. \quad (22)$$

Если рассматривать h_j как промежутки времени между последовательными расчетами матриц концентраций, то (22) и представляет интересующий нас интеграл по времени, где в качестве y_i могут выступать матрицы $C(t_{j,b}, U, D)$. При интегрировании с помощью сплайна и равномерном разбиении отрезка ($h_j = const$), компоненты вектора \mathbf{w} достаточно быстро становятся равными, если мы отступаем немного от концов интервала. Действительно, первое слагаемое в правой части (20) — это та же формула трапеций. Второе слагаемое, имея порядок h^3 , влияет лишь на самом краю интервала интегрирования. Таким образом, если для некоторого k , $k \ll N$, $w_k = w_{k+1} \dots = w_{N-k+1}$, при переходе к следующему шагу нужно вычислить две новые матрицы и запомнить $2k$ с предыдущего шага.

Рассмотрим теперь ситуацию нескольких движущихся источников с пересекающимися временными интервалами движения. В приведенном выше алгоритме расчета не составляет труда учитывать вклад нескольких движущихся источников, если в некоторые моменты времени t_j они двигаются одновременно.

При этом количество одновременно двигающихся источников может быть и переменным.



Будем считать, что движению рассматриваемых источников соответствуют отсортированные по времени начала отрезки $\{T_n = (t_{n,1}, t_{n,2})\}$, $n = 1, \dots, N$, некоторые из которых пересекаются. Разобьем весь отрезок $(\min\{t_{n,1}\}, \max\{t_{n,2}\})$ на K непересекающихся интервалов, сопоставив каждому из них те ДИ, периоды движения которых включают данный интервал. Таким образом получается K групп движущихся источников, периоды работы которых не пересекаются. При этом в каждом периоде все источники работают одновременно в течение всего периода. Далее можно следовать вышеизложенному алгоритму для «закрепленных» источников с той лишь разницей, что для каждой группы из J движущихся источников при фиксированных скорости и направлении ветра расчет осуществляется с помощью несколько модифицированной формулы:

$$C_{max}(L) = \max_{0 \leq t \leq T-1200} \frac{1}{1200} \int_t^{t+1200} \sum_{j=1}^J M_j(\tau) c_j(x_j(\tau)) d\tau \quad (23)$$

Источники с неопределенным положением

Стандартные расчеты максимальных (и средних) концентраций предполагают, что их локализация известна. Однако в некоторых случаях это не так. Примером источников, положение которых не фиксировано в пределах некоторой ограниченной области, могут

служить различные транспортные средства, передвигающиеся по промышленной площадке, например, строительная или сельскохозяйственная техника. Такие источники можно разделить на два типа. Первый тип — движущиеся источники, для которых известен набор возможных траекторий, но в пределах этого множества траекторий одновременное движение может осуществляться только по части из них и их совокупность невозможно описать заранее. Второй тип — квазиточечные источники, передвижение которых если и имеет место, то с такой медленной скоростью, что изменение их положения за 20-минутный интервал достаточно мало. Их положение в пределах промышленной площадки также не может быть заранее определено. В обоих случаях необходимо осуществить расчет максимальных разовых концентраций с учетом работы «обычных» стационарных источников с известным положением. Основная проблема таких расчетов состоит в том, что из возможных конфигураций источников с неопределенным положением нужно выбрать такую, при которой концентрация в выбранной расчетной точке будет наибольшей. Рисунок 2 поясняет сказанное для простейшей ситуации одного источника A с переменным положением и одного источника B фиксированного положения.

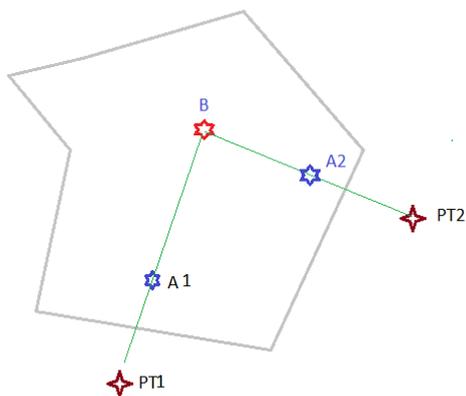


Рис. 2. Положения двух расчетных точек (PT1, PT2) и соответствующие «неблагоприятные» положения источника A: A1 и A2

Для первой расчетной точки (РТ1) «неблагоприятное» положение A -источника находится в некоторой точке на линии B -источника и РТ1, для РТ2 — на линии B – РТ2. Поскольку мы предполагаем любые положения источников группы A , для разных расчетных точек они могут быть разными, в частности, для разных сочетаний «скорость –направление ветра».

Движущиеся источники с несколькими возможными траекториями

Рассмотрим еще один пример подобного экономичного алгоритма, позволяющего избежать многовариантных расчетов. Предположим, что наряду с группой стационарных «обычных» источников имеется группа из M источников, из которых одновременно работают только K . Если осуществлять прямой перебор, требуется реализовать C_M^K расчетов, C_M^K число сочетаний из M по K , выбрав таким образом комбинацию с наибольшей концентрацией, что может потребовать достаточно большого времени. Проведем расчеты по-другому. Для каждой расчетной точки и каждой пары (U, D) вычислим концентрацию от стационарных источников и добавим расчет от всех M источников, считая, что они работают одновременно. Отсортируем M вкладов и выберем K наибольших, сложив их сумму с вкладом стационарных источников. Запомним полученное значение и перейдем к следующей паре (U, D) . Теперь повторим ту же процедуру. Если вновь полученная концентрация больше, запомним ее, если нет, оставим предыдущее значение. Перебирая так все сочетания скорости и направления ветра (а этот перебор мы должны сделать в любом случае), мы получим максимальное значение концентрации в данной расчетной точке. Эта концентрация соответствует работе только K источников. При этом, конечно, может оказаться, что эти K источников отличаются для разных пар (U, D) . Однако это не нарушает логики расчетов максимальных концентраций. В основу методики фактически положено предположение о независимости сочетаний метеопараметров и режимов работы источников. Более того, может оказаться, что

и разным расчетным точкам соответствуют разные наборы из K источников, что также ничему не противоречит.

Рассмотренная ситуация и предлагаемый алгоритм могут использоваться, например, при расчетах с участием работы подвижных источников на промышленной площадке. Типична ситуация, когда несколько специальных транспортных средств (ТС) в течение рабочего дня перемещаются по ограниченной территории по разным траекториям. Траекторий при этом может быть много больше, чем транспортных средств, и проследить соответствие ТС и траекторий практически невозможно. Заметим при этом, что расчет концентраций от движущихся источников достаточно затратный по времени. Если, например, имеется 10 траекторий и 3 ТС, возможных комбинаций будет 120. Таким образом, использование предлагаемого алгоритма позволяет для каждой пары «скорость – направление» делать только 10 расчетов вместо 120.

Точечные источники с неопределенным пространственным положением

Предположим, что есть полигон, в пределах которого могут работать K источников (группа A источников), положения которых могут постоянно меняться, и группа B стационарных источников с фиксированным положением. Для данной расчетной точки, находящейся, как правило, вне полигона, необходимо найти такую локализацию A -источников, при которой концентрация в этой точке с учетом вклада B -источников была бы наибольшей.

Задача может решаться в два этапа. Сначала сделаем оценку сверху концентрации в РТ, вычислив максимальную концентрацию, обусловленную вкладом B -источников, и прибавим максимальный вклад A -источников (см. подраздел «*Мажорантная оценка максимальных разовых концентраций*»). Если для группы B это обычный расчет, то в случае группы A нам заранее не известна локализация A -источников, соответствующая наибольшему вкладу. Чтобы ее найти, воспользуемся следующим соображением. Концентрация в точке T_0 , обусловленная работой источника в точке T ,

равна концентрации в точке T , обусловленной работой источника в точке T_0 . Запишем это в виде:

$$c(T \rightarrow T_0) = c(T_0 \rightarrow T). \quad (24)$$

Отсюда следует, что искомым положением точечного источника внутри полигона, «дающим» наибольший вклад в РТ, есть положение точки максимума концентрации внутри полигона, если поместить такой же источник в расчетной точке. Действительно, для данной расчетной точки T_0 наиболее неблагоприятное положение T источника внутри полигона Π находится с учетом (24):

$$\max_{T \in \Pi} \{c(T \rightarrow T_0)\} = \max_{T \in \Pi} \{c(T_0 \rightarrow T)\}. \quad (25)$$

Следуя стандартному приему вычисления максимума по некоторой области, введем внутри полигона равномерную сетку и, получив концентрацию в каждом из узлов сетки, определим затем максимум. Для оценки сверху, о которой говорилось выше, представляет интерес только значение самой максимальной концентрации по полигону для каждого из K источников. Вклад группы A — это сумма этих концентраций. Если оценка сверху, которая может быть достаточно грубой, нас удовлетворяет с точки зрения выполнения норматива величины концентрации, таким расчетом и ограничиваемся. Если нет, реализуем следующий более точный расчет. Для каждой пары «скорость – направление ветра» и для каждого из K источников группы A определяется положение, соответствующее максимальному вкладу при рассматриваемых скорости и направлении ветра. Оно находится на основе того же принципа «взаимности», который был рассмотрен в предыдущем параграфе. Если при этом возможно описать ограничение, в силу которого источники не могут располагаться ближе некоторого расстояния, для каждого из K источников находим K «наихудших» положений, получив таким образом $K \times K$ матрицу. Упорядочим затем каждый ее столбец по убыванию. Интересующие нас концентрации будут располагаться в первой строке.

Выводы

Рассмотренные приемы вычислений максимальных разовых концентраций позволяют расширить возможности применяемых в настоящее время стандартных подходов к таким расчетам. Методология упрощения многовариантных расчетов основывается фактически на двух приемах: использование матрицы концентраций, в которой каждый элемент соответствует определенному сочетанию «скорость – направление ветра», и использование временных графиков. Представляются также эффективными в некоторых случаях мажорантные оценки концентраций, тем более что соответствующий «инструмент» для этого уже существует.

Естественным является вопрос о том, насколько проста реализация предлагаемых методов и какой дополнительной информации они требуют? Насколько известно автору, в настоящее время нигде в существующих программах не используются временные графики, хотя время работы источников иногда указывается. При задании движущихся источников задается траектория движения, но при этом он считается как бы «стационарным» движущимся источником. Это две связанные проблемы, решение которых, по-видимому, позволит реализовать многое из вышеизложенного, по крайней мере, с точки зрения обеспечения входной информацией. Собственно вычислительные процедуры не представляют больших сложностей, хотя в некоторых случаях требуют существенной перестройки программы расчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Генихович Е. Л., Берлянд М. Е., Оникул Р. . (1999). Развитие теории атмосферной диффузии как основы для разработки атмосфероохранных мероприятий // В кн.: Современные исследования ГГО. Т. 1. — СПб: Гидрометеиздат. С. 99–126.

Генихович Е. Л., Кириллова В. И. (2019). Мониторинг загрязнения воздуха как инструмент оценки эффективности нормирования выбросов и их регулирования в периоды неблагоприятных метеорологических условий // Труды ГГО. Вып. 593. С. 85–98.

Гмурман В. Е. (1999). Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. — М.: Высшая школа. 479 с.

Завьялов Ю. С., Квасов Б. И., Мирошниченко В. Л. (1980). Методы сплайн-функций. — М.: Наука. 352 с.

Зив А. Д. (2012). Моделирование асинхронности выбросов источников с помощью дискретных случайных величин // Труды ГГО. Вып. 565. С. 103–114.

Зив А. Д., Двинянина О. В., Соловьева Е. А. (2020). Взвешенные вещества и диоксид азота в атмосфере Санкт-Петербурга: субъективные оценки, измерения и расчеты // Труды ГГО. Вып. 597. С. 135–161.

Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов (загрязняющих) веществ в атмосферу (дополненное и переработанное) (2012). — СПб: ОАО «НИИ Атмосфера». 224 с.

Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе (2017). Утверждены приказом Минприроды России от 06.06.2017 г. № 273, зарегистрированным Минюстом РФ 10.08.2017 г., регистрационный № 47734.

Правила проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха, включая их актуализацию (2019). Утверждены приказом Минприроды России от 29.11.2019 г. № 813.

<http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=102059495&backlink=1&nd=102676602&rdk=>

Chapter 12. Air Quality. URL: https://www.nyc.gov/assets/planning/download/pdf/applicants/env-review/1752_shore_pkwy/12_feis.pdf.

Lončarević Š., Ilinčić P., Šagi G., Lulić Z. (2022). Problems and Directions in Creating a National Non-Road Mobile Machinery Emission Inventory: A Critical Review // Sustainability. 14 (6):3471. URL: <https://doi.org/10.3390/su14063471>.

Rittner R., Gustafsson S., Spanne M. et al. (2020). Particle concentrations, dispersion modelling and evaluation in southern Sweden // SN Appl. Sci. 2, 1013. URL: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2769-1>.

Teodora Milošević, Lado Kranjčević, Stjepan Piličić, Marko Čavrak, Igor Kegalj, Luka Traven (2020). Air Pollution Dispersion Modeling in Port Areas. Journal of Maritime & Transportation Sciences, Vol. Special edition №. 3. P. 157-170

**ВОЗМОЖНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОЗОНОВОГО СЛОЯ
И ДРУГИХ ПАРАМЕТРОВ СТРАТОСФЕРЫ АНТАРКТИДЫ
ПО ДАННЫМ МОДЕЛИ SOCOL V4**

А. С. Иманова¹, С. П. Смышляев^{1,2}, Е. В. Розанов^{1,3}, В. А. Фролькис^{4,5}

¹ Лаборатория исследований озонового слоя и верхней атмосферы,
Санкт-Петербургский государственный университет,
198504 Петергоф, Ульяновская улица, 1
Laboratory for Research of the Ozone Layer and Upper Atmosphere
St. Petersburg State University,
Peterhof, Ulyanovskaya street, 1

² Российский государственный гидрометеорологический университет,
192007 Санкт-Петербург, Воронежская улица, 79
Russian State Hydrometeorological University,
St. Petersburg, Voronezhskaya street, 79

³ Физико-метеорологическая обсерватория Давоса/Всемирный радиационный центр,
CH-7260, Швейцария, Давос, Davos Dorf, Dorfstrasse 33
Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center,
CH-7260, Switzerland, Davos, Davos Dorf, Dorfstrasse 33

⁴ Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова,
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7
Voeikov Main Geophysical Observatory
St. Petersburg, Karbysheva st., 7

⁵ Санкт-Петербургский государственный экономический университет
191023 Санкт-Петербург, наб. канала Грибоедова, д. 30-32, литер А.
St. Petersburg State Economic University
191023 St. Petersburg, Griboedov canal emb., 30-32
E-mail: a.imanova@spbu.ru

Поступила в редакцию 9.11.2023
Поступила после доработки 11.12.2023

Введение

Истощение озонового слоя Земли является важной экологической проблемой, поскольку озоновый слой образует эффективный естественный биологический щит против жесткого солнечного

УФ-излучения (см., например, Van der Leun et al., 1995). В настоящий момент оценка восстановления озонового слоя Земли с помощью химико-климатических моделей является целью многих международных исследований (см., например, Dhomse et al., 2018; Krzyściński, Czerwińska, 2024). Прогнозируемое состояние озонового слоя и, следовательно, оценки будущих уровней приземного УФ-излучения сильно зависят от применяемых сценариев выбросов парниковых газов (Butler et al., 2016). Межправительственной группой экспертов по изменению климата (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)) в рамках 6 фазы проекта взаимного сравнения совместных моделей (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)) (см. Eyring et al., 2016) были разработаны сценарии выбросов парниковых газов, основанные на общих социально-экономических траекториях (Shared Socioeconomic Pathways (SSP), учитывающих экономические, демографические и технологические факторы (см., например, O'Neill et al., 2016). В работе Shang et al. (2021), проведено сравнение результатов расчетов по трем моделям с использованием нескольких сценариев CMIP6 (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5) и показано увеличение содержания озона в глобальной стратосфере для всех использованных сценариев.

Особый интерес представляет восстановление озонового слоя в Антарктиде так как, появление отрицательных аномалий озона в больших масштабах влияет на изменение циркуляции атмосферного воздуха и приземной температуры, а также на таяние льдов (Александров и др., 1992). В работе (Revell et al., 2022) показана важность точного моделирования стратосферного озона для прогнозов изменения климата в Южном полушарии.

Области с общим содержанием озона (OCO) ниже уровня 220 единиц Добсона (е. Д.) принято называть озоновыми дырами. Такие области регулярно наблюдаются над Антарктидой в весенний период в течение 2–3 месяцев, особенно в сентябре и октябре. Аномалии могут наблюдаться на площади более 20 млн км².

Формирование озоновой аномалии начинается с начала образования циркумполярного вихря в начале зимы (в мае).

Он образуется в результате увеличения меридионального температурного градиента, приводящего к образованию интенсивного зонального ветра (циркумполярного вихря) на границе средних и полярных широт (примерно 60° ю. ш.), изолирующего полярную область (Harvey et al., 2002). Внутри вихря наблюдаются низкие температуры (ниже 200 К), что приводит к появлению полярных стратосферных облаков (ПСО) и ускорению гетерогенных реакций на частицах стратосферного аэрозоля (Hamil, Toon, 1991). Активация хлор- и бромсодержащих газов в течение полярной ночи происходит в результате гетерогенных реакций на поверхности или в объеме ПСО и жидкого серосодержащего аэрозоля. По окончании полярной ночи высвобождается большое количество галогенных радикалов, участвующих в каталитических циклах разрушения озона (Solomon, 1999). Таким образом, основными причинами возникновения озоновых аномалий можно считать два фактора — химический и динамический. Изоляция полярного вихря является ключевым динамическим фактором потери озона, так как богатый озоном воздух из средних широт не поступает в полярные районы, а следовательно, образование озоновых дыр зависит от устойчивости циркумполярного вихря. Устойчивость вихря определяется скоростью зонального ветра: чем выше скорость зонального ветра, тем больше степень изолированности полярного воздуха. На устойчивость циркумполярного вихря могут влиять локальные явления, в частности, волновая активность на границе полярного вихря, ослабляющая зональный поток, а также явления в других районах земного шара, такие как внезапные стратосферные потепления, квазидвухлетние колебания, Южное колебание и Эль-Ниньо (Погорельцев и др., 2014; Shindell et al., 1997; Garfinkel et al., 2013).

Количество хлорных и бромных малых газовых компонентов в стратосфере, накопленных в течение полярной ночи, определяет количество галогенных радикалов, в активной форме разрушающие озон. Источниками хлорных и бромных составляющих в атмосфере могут быть как природные (испарение морских аэрозольных частиц или разложение морских водорослей), так и антропогенные процессы

(производство хлорорганических газов, воспламенение бытовых и промышленных свалок, сжигание биомассы в тропиках и дезинфекция сельскохозяйственных почв) (Мак-Ивен, Филлипс, 1978).

Целью работы является анализ изменения ОСО за 2015–2099 гг., а также влияющих на его изменчивость параметров стратосферы таких как температура, скорость зонального ветра и содержание хлорных и бромных компонентов на основе модельных данных в Антарктическом регионе.

Методика исследования

Исследование проводилось с использованием модели системы Земли (МСЗ) SOCOLv4.0 (Solar Climate Ozone Links, версия 4) (далее SOCOLv4). Модель используется для расчета характеристик озонового слоя и климата с 1970 по 2100 год. Полученный результат позволяет характеризовать поведение озонового слоя в периоды глобального истощения, связанного с производством галогенсодержащих разрушающих озон субстанций, и его восстановления, обусловленного ограничениями, введенными Монреальским протоколом и его дополнениями. Разработанная модель учитывает влияние различных антропогенных и естественных факторов (таких как выбросы парниковых и озоноразрушающих газов, вулканические извержения и изменения солнечной активности) на состояние климата. Данные модели SOCOLv4 используются для исследований озонового слоя в прошлом и будущем (Karagodin-Doyennel et al., 2023; Vargin et al., 2023).

SOCOLv4 содержит блок общей циркуляции для расчета атмосферного переноса и переноса радиации, модель океана, химический модуль, позволяющий учитывать 100 химических соединений и 216 газофазных, 72 фотохимических и 16 стратосферных гетерогенных реакций на частицах полярных стратосферных облаков и в водных аэрозолях серной кислоты,

и микрофизический модуль для определения размера сульфатного аэрозоля.

SOCOLv4 разработана на основе горизонтального разрешения T63, которое соответствует $\sim 1,9^\circ \times 1,9^\circ$ и использует 47 вертикальных уровней давления между поверхностью Земли и 0,01 гПа (80 км). Для описания динамических процессов в SOCOLv4 используется 15-минутный временной шаг, при этом химические и радиационные расчеты выполняются каждые 2 часа. Подробное описание модели можно найти в работе (Sukhodolov et al., 2021).

Результаты

На рисунке 1 приведены осредненные для Антарктического региона изменения параметров стратосферы в 2015–2099 гг. для сентября и октября. Показано, что температура на уровне 70 гПа имеет в эти месяцы тенденцию к повышению, однако положительный тренд в октябре более выражен и характеризуется ростом температуры стратосферы на 0,9 К за 10 лет.

Такое увеличение температуры в октябре в Антарктическом регионе, связанное с выбросами парниковых газов и глобальным изменением климата, может оказывать влияние на изменение скорости зонального ветра. Поскольку разница температур между полярной областью и средними широтами будет уменьшаться, то скорость зонального потока также будет уменьшаться. Уменьшение скорости зонального потока нарушает устойчивость циркумполярного вихря и, следовательно, изолированность антарктической зоны, что приводит к увеличению поступления в полярную стратосферу теплого и богатого озоном воздуха средних широт. Однако тренды скорости зонального ветра хоть и визуально имеют тенденцию к понижению, но малые значения коэффициента детерминации не позволяют однозначно прогнозировать уменьшение зональной скорости. Кроме того, данные показывают заметную межгодовую изменчивость с высокими амплитудами, особенно в октябре, т. е. при распаде полярного вихря.

Несмотря на то, что нельзя однозначно констатировать ослабление устойчивости полярного вихря в будущем, ОСО имеет статистически значимый положительный тренд для обоих месяцев, который характеризуется увеличением общего содержания озона на 15 е. Д. за 10 лет. Согласно модельным данным, можно ожидать, что с 2060-х озоновые аномалии не будут образовываться в весенней Антарктиде.

Поскольку рассмотренные выше динамические факторы не дали однозначной оценки, то рост озона в Антарктиде прежде всего связан с ролью химического фактора, обуславливающего образование озоновых аномалий, т.е. с содержанием хлорных и бромных компонент в атмосфере.

На рисунке 2 приведены данные о содержании Cl_2 и Br, усредненные для Антарктического региона за три месяца: август, сентябрь, октябрь. Из рисунка видно, что содержание хлора и брома падает в течение исследуемого периода и этот отрицательный тренд является статистически значимым. С начала 2000-х и до 2060-х годов содержание хлорных и бромных компонент, несмотря на ярко выраженную тенденцию к понижению, имеют довольно большую межгодовую изменчивость, а после 2060 г. наблюдается плавное уменьшение, что объясняет прекращение образования озоновых аномалий согласно графику изменения ОСО (рис. 1). Такое поведение исследуемых параметров связано главным образом с тем, что в данный момент содержание хлорных и бромных составляющих взято под контроль, благодаря Монреальскому протоколу, принятому в 1987 г.

Чтобы оценить влияние антропогенных источников хлора и брома, были рассмотрены среднегодовые значения отношений смеси озоноразрушающих веществ, содержащих хлор и бром, которые использовались для проведения расчетов. Их значения задаются в виде среднемесячных концентраций в приземном слое. Результаты представлены на рисунке 3.

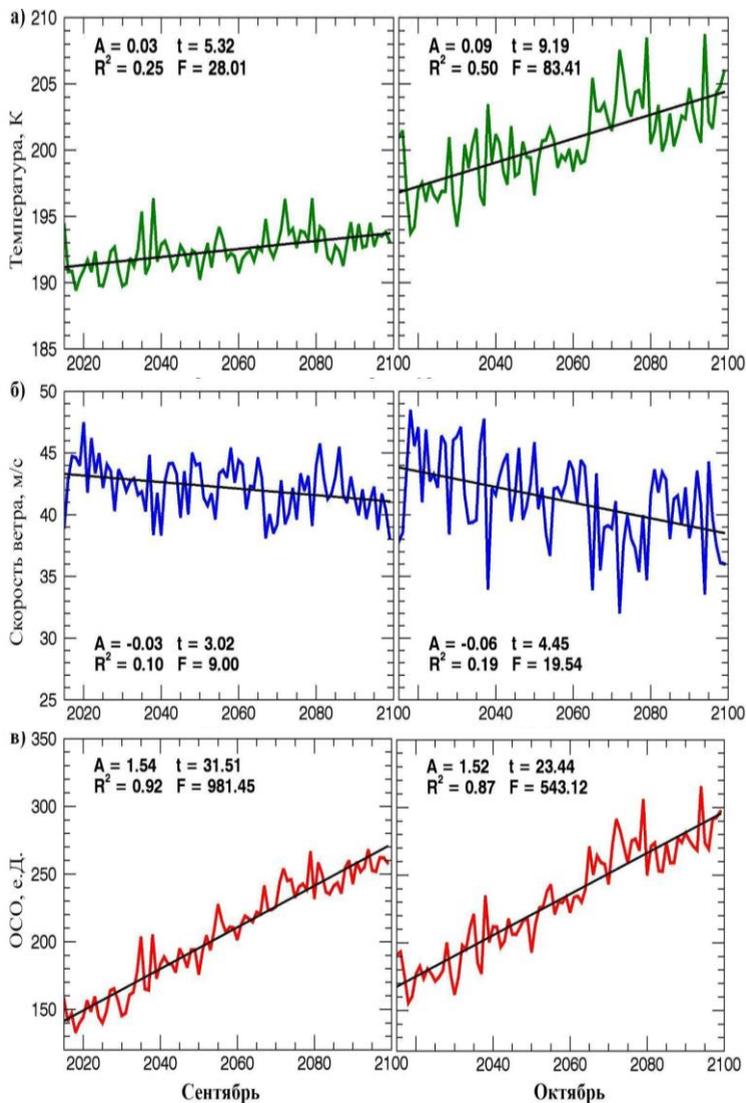


Рис. 1. Изменение параметров стратосферы Антарктиды с 2015 по 2099 гг. в сентябре и октябре:

- а) температура на уровне давления 70 гПа, в регионе 60°–90° ю. ш.
- б) скорость зонального ветра на уровне 70 гПа на 60° ю. ш.
- в) общее содержание озона в регионе 60°–90° ю. ш.

Как того и требуют Монреальский протокол и соответствующие ему поправки, озоноразрушающие вещества с содержанием хлора и брома имеют тенденцию к уменьшению. Линейные тренды рассматриваемых параметров статистически значимы.

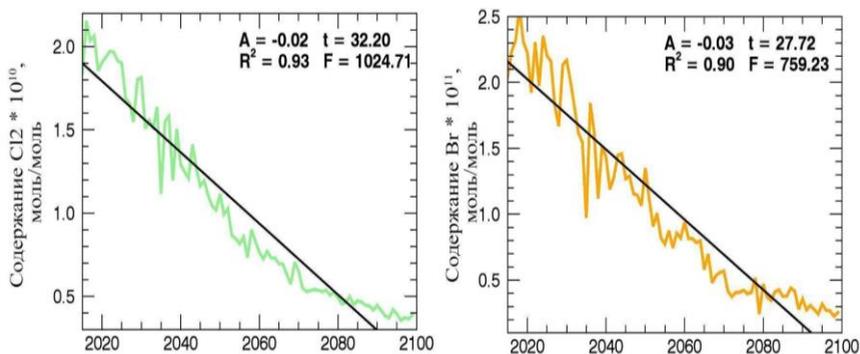


Рис. 2. Изменение среднего за три месяца (август, сентябрь, октябрь) содержания Cl_2 и Br на уровне 70 гПа в Антарктическом регионе с 2015 по 2099 гг.

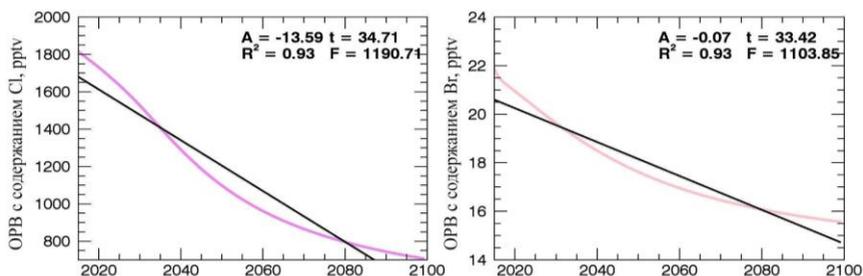


Рис. 3. Изменение среднегодового значения озоноразрушающих веществ, содержащих Cl и Br , с 2015 по 2100 гг.

Заключение

Согласно результатам расчетов по модели SOCOLv4, прогнозируемое общее содержание озона в стратосфере Антарктиды в сентябре–октябре имеет ярко выраженную тенденцию

к увеличению. Можно ожидать прекращения образования озоновых аномалий и постепенное восстановления озонового слоя до уровня 1980-х годов к 2060 г. Температура стратосферы имеет значимый положительный тренд в октябре, в период распада полярного вихря. Поскольку тренд изменения скорости зонального ветра значим, но коэффициент детерминации мал, то нельзя прогнозировать уменьшение зонального потока и, как следствие, нарушение устойчивости полярного вихря над Антарктидой, что могло бы привести к сокращению времени его существования. Содержание хлорных и бромных компонент, взятых под контроль Монреальским протоколом, имеет ярко выраженный отрицательный тренд, что главным образом обуславливает рост содержания озона.

Исследование выполнено в «Лаборатории исследования озонового слоя и верхних слоев атмосферы» при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (проект номер 116234986).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александров Э. Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Л., Хргиан А.Х. (1992). Озонный щит Земли и его изменения. — Л.: Гидрометеоиздат. С. 31.

Мак-Ивен М. Д., Филлипс Л. (1978). Химия атмосферы; Пер. с англ. А. В. Михайлова; Под ред. Л. Данилова, М. Власова. — М.: Мир, С. 187.

Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н., Перцев Н.Н. (2014). Внезапные стратосферные потепления: роль нормальных атмосферных мод // Геомагнетизм и аэрономия, Т. 54. № 3. С. 387–403.

Butler A. H., Daniel J. S., Portmann R. W., Ravishankara A. R., Young P. J., Fahey D. W., Rosenlof, K. H. (2016). Diverse policy implications for future ozone and surface UV in a changing climate // Environ. Res. Lett. 11. 064017.

Dhomse S. S., Kinnison D., Chipperfield M. P., Salawitch R. J., Cionni, I., Hegglin M. I., Abraham N. L., Akiyoshi H., Archibald A. T., Bednarz E. M., Bekki S., Braesicke P., Butchart, N. Dameris, M. Deushi, M. Frith, S., Hardiman S. C., Hassler B., Horowitz L. W., Hu R.-M., Jöckel P., Josse, B., Kirner, O., Kremser S., Langematz U., Lewis, J., Marchand M., Lin M., Mancini E., Marécal V., Michou M., Morgenstern O., O'Connor F. M., Oman L.,

Pitari G., Plummer D. A., Pyle J. A., Revell L. E., Rozanov E., Schofield R., Stenke A., Stone K., Sudo K., Tilmes S., Visionsi D., Yamashita Y., and Zeng G. (2018). Estimates of ozone return dates from Chemistry-Climate Model Initiative simulations // *Atmos. Chem. Phys.* 18. P. 8409–8438.

Engel A., Rigby M., Burkholder J. B., Fernandez R. P., Froidevaux L., Hall B. D., Hossaini R., Saito T., Vollmer M. K., Yao B. (2018). Update on Ozone-Depleting Substances (ODSs) and other gases of interest to the Montreal Protocol, Chapter 1 in *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018, Global Ozone Research and Monitoring, Project-Report № 58* — World Meteorological Organization. Geneva. Switzerland

Eyring V., Bony S., Meehl G. A., Senior C. A., Stevens B., Stouffer R. J., Taylor K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // *Geosci. Model Dev.* 9. 1937–1958.

Garfinkel C.I., Waugh D.W., Oman L.D., Wang L., Hurwitz M. M. (2013). Temperature trends in the tropical upper troposphere and lower stratosphere: Connections with sea surface temperatures and implications for water vapor and ozone // *J. Geophys. Res.* V. 118, № 17. P. 9658–9672.

Hamil P., Toon O.B. (1991). Polar stratospheric clouds and the ozone hole // *Physics today*, V. 44. № 12. P. 34–42.

Harvey V.L., Pierce R.B., Hitchman M.H. (2002). A climatology of stratospheric polar vortices and anticyclones // *J. Geophys. Res.* V. 107. № D20. P. 4442

Karagodin-Doyennel A., Rozanov E., Sukhodolov T., Egorova T., Sedlacek J., Peter T. (2023). The future ozone trends in changing climate simulated with SOCOLv4 // *Atmos. Chem. Phys.* 23. P. 4801–4817.

Krzyścin J., Czerwińska A. (2024). Signs of Slowing Recovery of Antarctic Ozone Hole in Recent Late Winter–Early Spring Seasons (2020–2023) // *Atmosphere.* 15. P. 80

O'Neill B. C., Tebaldi C., van Vuuren D. P., Eyring V., Friedlingstein P., Hurtt G., Knutti R., Kriegler E., Lamarque J.-F., Lowe J., Meehl G. A., Moss R., Riahi K., Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6 // *Geosci. Model Dev.* 9. P. 3461–3482.

Revell L. E., Robertson F., Douglas H., Morgenstern O., Frame, D. (2022). Influence of Ozone Forcing on 21st Century Southern Hemisphere Surface Westerlies in CMIP6 Models // *Geophys. Res. Lett.* 49. P. 1–9.

Riahi K., van Vuuren D. P., Kriegler E., Edmonds J., O'Neill B. C., Fujimori S., Bauer N., Calvin K., Dellink R., Fricko O., Lutz W., Popp A., Cuaresma J. C., KC S., Leimbach M., Jiang L., Kram T., Rao S., Emmerling J., Ebi K., Hasegawa T., Havlik P., Humpenöder F., Da Silva L. A., Smith S., Stehfest E., Bosetti V., Eom J., Gernaat D., Masui T., Rogelj J., Strefer J., Drouet L., Krey V., Luderer G., Harmsen M., Takahashi K., Baumstark L., Doelman J. C., Kainuma M., Klimont Z., Marangoni G., Lotze-Campen H., Obersteiner M.,

Tabeau A., and Tavoni M. (2017) The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, *Global Environmental Change*, 42. P. 153–168.

Shang L., Luo J., Wang C. (2021). Ozone Variation Trends under Different CMIP6 Scenarios // *Atmosphere*. 12. 112.

Shindell D.T., Wong S., Rind D. (1997). Interannual variability of the Antarctic ozone hole in a GCM. Part 1: The influence of tropospheric wave variability // *J. Atmos. Sci.* V. 54. № 18. P. 2308–2319.

Solomon S. (1999). Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history // *Reviews of Geophysics*. 37(3). P. 275–316.

Sukhodolov T., Egorova T., Stenke A., Ball W. T., Brodowsky C., Chiodo G., Feinberg A., Friedel M., Karagodin-Doyennel A., Peter T., Sedlacek J., Vattioni S., Rozanov E. (2021). Atmosphere-ocean-aerosol-chemistry-climate model SOCOLv4.0: description and evaluation // *Geoscientific Model Development*. 14. P. 5525–5560.

Van der Leun J., Tang X., Tevini M. (1995). Environmental effects of ozone depletion // *Ambio*. 14. 138.

Vargin P., Kostrykin S., Koval A., Rozanov E., Egorova T., Smyshlyayev S., Tsvetkova N. (2023). Arctic stratosphere changes in the 21st century in the Earth system model SOCOLv4.4 // *Front. Earth Sci.* 11:1214418

КРИТЕРИИ ВЫБОРКИ ДАННЫХ ОБ АТМОСФЕРНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ ДЛЯ ПОЛЯРНЫХ РЕГИОНОВ В ЦЕЛЯХ АВТОМАТИЗАЦИИ ИХ ОБРАБОТКИ И КОНТРОЛЯ

Б. Г. Зайнетдинов

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

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021, St. Petersburg, Karbysheva st., 7

E-mail: bulatoss@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.11.2023
Поступила после доработки 4.12.2023

Введение

В период с 2013 по 2015 гг. сеть станций Росгидромета, выполняющих наблюдения за электрическими характеристиками атмосферы (ЭХА), была существенно расширена и полностью переоснащена. Взамен старого аналогового оборудования на станциях были установлены автоматизированные атмосферно-электрические измерительные комплексы (АЭИК), включающие измеритель напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы «Поле-2М» и измеритель электрической проводимости воздуха «Электропроводность-2М». Количество станций увеличилось с 4 до 10 (Зайнетдинов, Соколенко, 2018).

При наблюдениях с использованием аналоговых средств контроль и обработка получаемой информации проводилась непосредственно сотрудниками метеостанций. АЭИК позволяет проводить отсчеты параметров атмосферно-электрических характеристик с частотой 1 Гц. Средние за минуту значения передаются на сервер «Атмосферное электричество» Главной геофизической обсерватории

им. А. И. Воейкова (ГГО). Обработка, контроль и анализ информации, поступающей со всех станций, осуществляются специалистами ГГО с использованием специализированного программного обеспечения.

При изучении ЭХА, а именно напряженности электрического поля атмосферы (E), принято в качестве отдельной категории рассматривать так называемое электричество «хорошей погоды». Термин «хорошая погода» характеризует условия проведения измерений и определяется по следующим критериям: отсутствие облаков нижнего яруса при общем количестве облаков не более 2 баллов, скорость ветра не более 5 м/с, отсутствие метеорологических явлений (Атмосфера, 1991; Чалмерс, 1974).

Однако в процессе подготовки раздела «Электрические характеристики приземного слоя атмосферы» для ежегодно публикуемых Росгидрометом Обзоров о состоянии и загрязнении окружающей среды в Российской Федерации, было решено отказаться от критериев «хорошей погоды», которые вносят лишь незначительные искажения в значения E (Соколенко, Зайнетдинов, 2019).

По теоретическим оценкам В. Н. Морозова (2015) аэрозольные частицы, к которым могут относиться и облачные слои, приводят к увеличению E лишь на 8–10 %. В работе (Зайнетдинов и др., 2020) показано, что скорость ветра влияет не на величину E , а исключительно на смещение вечернего максимума ее унитарной вариации (т. е. суточного хода). При обобщении данных многолетних наблюдений на станции Воейково было установлено, что заметное воздействие на вариации напряженности электрического поля оказывают далеко не все метеорологические явления (Попов, 2008). Помимо этого, в некоторых регионах, где проводятся наблюдения за ЭХА, ввиду климатических особенностей, выборка, отвечающая критериям «хорошей погоды», оказывается недостаточной для оценки фоновых изменений. К таким регионам в первую очередь относятся высокоширотные области Российской Федерации, на территории которых расположены гидрометеорологическая обсерватория Тикси, станции остров Диксон и Зашеек, а также научно-исследовательский стационар «Ледовая база Мыс Баранова».

С учетом сказанного при проведении фонового мониторинга было решено отказаться от использовать термина «хорошая погода», заменив его понятием «нормальные часы». Под данным термином подразумеваются периоды без гроз и метелей разной степени интенсивности, несущих в себе объемный заряд, а также жидких и твердых осадков, которые вносят значительное искажение в вариации E .

В данной работе представлены результаты анализа по выявлению статистически обоснованных критериев фильтрации данных наблюдений за E на станциях Крайнего Севера.

Постановка вопроса и статистическое обоснование критериев для «нормальных часов» на полярных станциях

В настоящее время из 10 станций сети наблюдения за ЭХА 4 расположены к северу от Северного полярного круга, из которых 3 — на побережье Северного Ледовитого океана (Зайнетдинов, Соколенко, 2018). В работе рассматриваются станции Тикси, Диксон и мыс Баранова, общие сведения о которых приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики станций, выполняющих наблюдения за ЭХА на побережье Северного Ледовитого океана

Станция	Регион	Координаты	Высота над ур. м.	Высота установки измерителей
Тикси	Берег моря Лаптевых, Республика Саха (Якутия)	128,9 в.д. 71,6 с.ш.	3	5
о. Диксон	п-ов Таймыр (Красноярский край)	80,5 в.д. 73,5с.ш.	10	8
мыс Баранова	архипелаг Северная Земля (Красноярский край)	101,5 в.д. 79,2 с.ш.	6	5

Данные станции Зашеек в данной работе не рассматривались поскольку изменение места установки АЭИК привело к нарушениям ряда E .

Выносные блоки «Поле-2М» на станциях Тикси и мыс Баранова установлены на одной высоте. Модули для их размещения близки по размерам, а близлежащие окрестности идентичны по рельефу и закрытости горизонта, что может приводить к схожим искажениям векторов электрического поля. Поскольку данные о сопутствующих метеоявлениях по станции мыс Баранова отсутствуют, то для обработки информации с этой станции использовались критерии, полученные для станции Тикси. На метеостанции Диксон, в окрестностях которой рельеф неоднороден, выносной блок размещен на крыше здания, в условиях заметно отличающихся от станций Тикси и мыс Баранова.

В ГГО на сервер «Атмосферное электричество» со станций поступают данные о напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы с минутным разрешением: средние (E_{cp}), максимальные (E_{max}) и минимальные (E_{min}), по которым дополнительно определяется параметр $\Delta E = E_{max} - E_{min}$, характеризующий максимальный «минутный шум» приборного и погодного характера. Последний возникает за счет попадания гидро- и литометеоров на пластины (экранирующую или измерительные) измерителя «Поле-2М», а также при сильных порывах ветра, приносящих объемный заряд. Сопутствующую метеорологическую информацию срочных наблюдений в формате ПЕРСОНА-МИС станции или УГМС присылаю в ГГО раз в месяц (Методические указания, 2005).

Накопленные за 2014–2019 гг. данные непрерывных наблюдений позволяют провести анализ распределения рядов E_{cp} и ΔE при различных метеорологических явлениях.

Объем выборки минутных значений для каждого метеоявления, зафиксированного в анализируемый период на обеих станциях, код явления в формате ПЕРСОНА-МИС, приведен в таблице 2.

Таблица 2

**Количество случаев метеорологических явлений,
наблюдавшихся в период с 2014 по 2018 гг.**

Явление		Количество случаев	
код	Наименование	<i>Тикси</i>	<i>о-в Диксон</i>
0	Нет явлений	475293	574236
10	Роса	3275	240
11	Иней	108425	47976
12	Гололед	1424	2711
13	Изморозь кристаллическая	103459	87453
14	Изморозь зернистая	3960	760
21	Дымка	26787	58289
22	Туман	9516	36963
23	Туман просвечивающий	4427	2357
24	Туман поземный	560	—
28	Туман в окрестности станции	320	—
29	Туман поземный в окрестности станции	327	—
31	Мгла	1771	—
40	Мгла снежная	—	100
41	Поземок	178948	225263
42	Метель низовая	48612	102032
44	Метель общая	5093	31172
50	Иглы ледяные	10621	1325
51	Ледяной дождь	—	271
53	Крупа снежная	1146	36
54	Зерна снежные	32871	—
62	Морось	32820	3975
63	Дождь	65971	16088
64	Дождь ливневый	11976	21321
70	Снег	443942	101601
71	Снег ливневый	22162	93756
72	Снег мокрый	4865	2277

Явление		Количество случаев	
код	наименование	Тикси	о-в Диксон
73	Снег ливневый мокрый	4671	11818
80	Гроза	483	141
82	Полярное сияние	48631	10008

В работе (Попов, 2008) предложено обоснование статистически значимых процентилей для вариационного ряда E_{cp} , которые равны 5% и 95%. Для станций Тикси и Диксона диаграммы распределения E_{cp} при различных метеоявлениях представлены в форме «ящиков с усами» рис. 1 и 2). Верхняя и нижняя границы «ящиков» соответствуют $E_{5\%}$ и $E_{95\%}$, «усы» — $E_{2\%}$ и $E_{98\%}$, линиями внутри «ящиков» обозначены медианы, точками — экстремальные значения.

Поскольку количество случаев по некоторым явлениям на станции Диксон достаточно мало, они были объединены в колонку «Иные явл.» куда вошли: мгла снежная, ледяной дождь и крупа снежная. Для станции Тикси в категорию «туман» были объединены туман и туман в окрестностях станции, в категорию «туман просвечивающий» — туман поземный, туман поземный в окрестностях станции; в категорию «снег» были добавлены крупа снежная и зерна снежные. Также, для обеих станций в категорию «изморозь» были объединены изморозь кристаллическая и изморозь зернистая.

Из диаграмм видно, что наибольший разброс E_{cp} приходится на такие явления, как метели (низовая и общая) и грозы. В меньшей степени на E_{cp} влияют туман и жидкие и твердые осадки. Роса, иней, гололед, ледяные иглы и полярное сияние на E_{cp} как правило не влияют. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами, полученными для станции Воейково ранее в работе И. Б. Попова (2008).

Оценка ΔE проводилась эмпирически. Нижнее значение ΔE_{min} не может быть меньше паспортных значений «шума» прибора, которые составляют ± 3 В/м для идеальных условий.

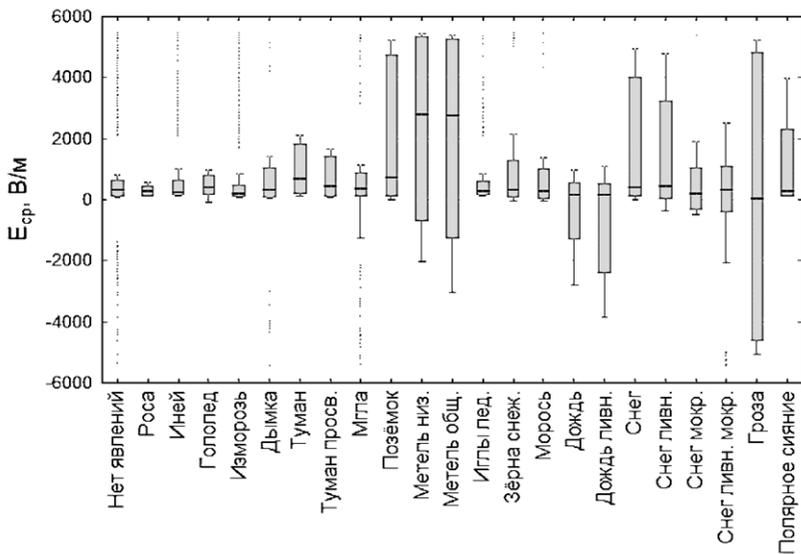


Рис. 1. Статистическое распределение E_{cp} при различных метеорологических явлениях на станции Тикси

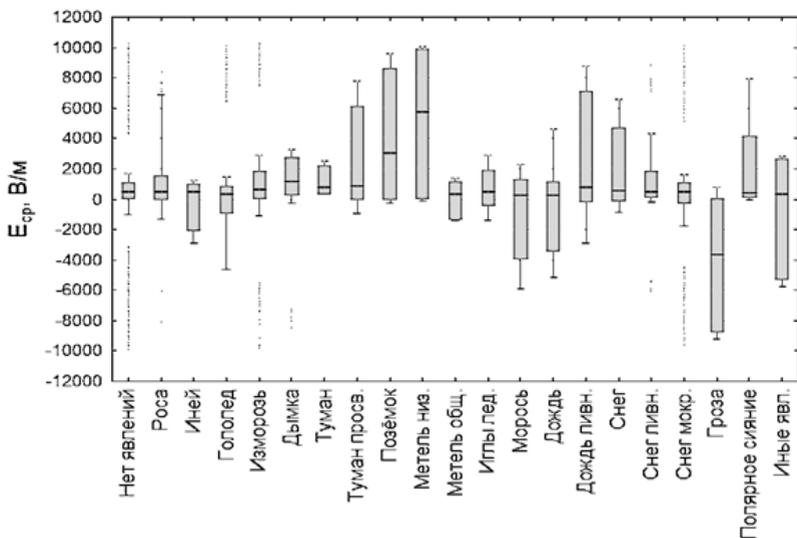


Рис. 2. Статистическое распределение E_{cp} при различных метеорологических явлениях на станции Диксон

В реальной атмосфере данное значение не опускается ниже ± 5 В/м, как следствие, $\Delta E_{min} = 10$ В/м для обеих исследуемых станций.

Как показывает практика для верхнего предела ΔE_{max} , в условиях невозмущенной атмосферы разброс значений лежит в пределах ± 10 %, таким образом, значения ΔE_{max} будут рассчитаны в ходе дальнейшего анализа.

По итогам исследования были получены величины E_{cp} для процентилей, представленных на рисунках 1 и 2, точные значения E_{cp} указаны в таблице 3.

Таблица 3

Значения E_{cp} различной обеспеченности

Станция	$E_{2\%}$	$E_{5\%}$	Медиана	$E_{95\%}$	$E_{97\%}$
Тикси	89	138	307	634	821
о-в Диксон	-991	42	492	1096	1724

Обращает на себя внимание большой разброс значений E_{cp} для станции Диксон, в Тикси это не наблюдается. Данная особенность может быть связана с несколько неточным временем фиксации метеоявлений, которые оказывают влияние на электрическое поле, вызывая искажение в положительную или отрицательную сторону.

Полученные на основе проведенного анализа значения для $E_{5\%}$ и $E_{95\%}$ были округлены. В качестве критериев для формирования выборки E были приняты:

для станции Тикси

$$\begin{cases} 140 \leq E_{cp} \leq 630 \\ 10 \leq \Delta E \leq 130 \end{cases}$$

для станции Диксон

$$\begin{cases} 40 \leq E_{cp} \leq 1100, \\ 10 \leq \Delta E \leq 220. \end{cases}$$

Проверка полученных критериев

Для станций Диксон, Тикси и м. Баранова были рассчитаны среднечасовые значения E по выборке, сформированной по критериям

и выборке, содержащей результаты наблюдений при отсутствии метеорологических явлений («нормальные часы»). Поскольку условия установки измерителей «Поле-2М» на м. Баранова и Тикси идентичны, для обеих станций были использованы критерии, установленные для Тикси. Результаты представлены в виде графиков на рисунке 3.

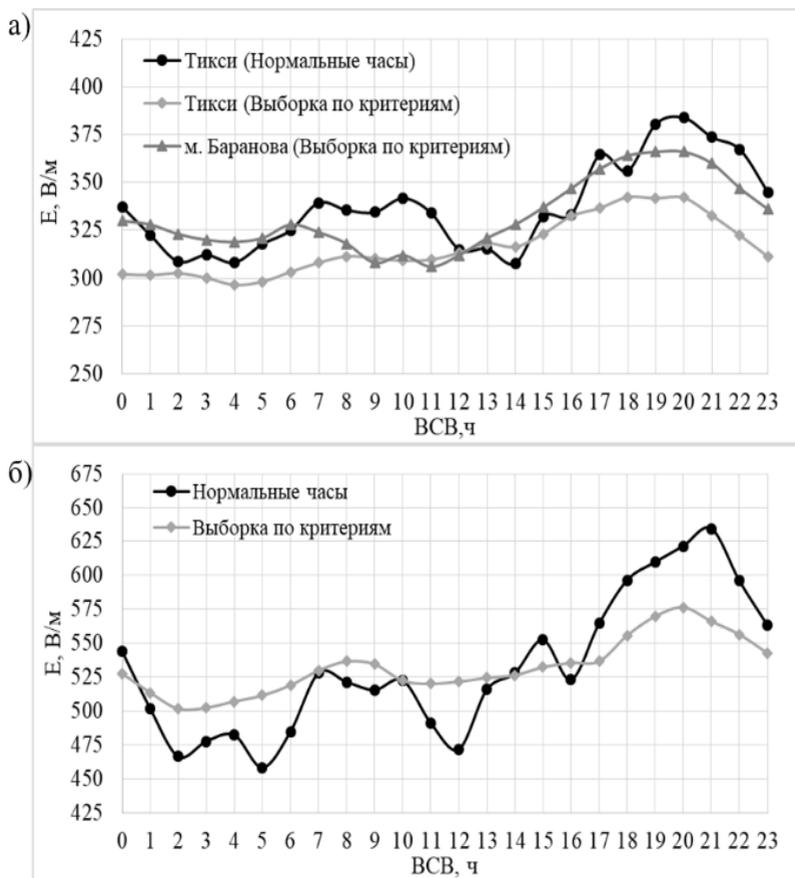


Рис. 3. Суточный ход E по выборке для «нормальных часов» и выборке данных при отсутствии явлений (выборка по критериям): а) Тикси и мыс Баранова; б) Диксон

Суточный ход E в «нормальные часы» имеет несколько локальных максимумов и минимумов, тогда как в выборке «по критериям» он более плавный. На всех станциях, включая мыс Баранова, наблюдается унитарная вариация (суточный ход), которая является основным показателем наличия глобальной электрической цепи в атмосфере (Чалмерс, 1974).

На станциях Тикси и Диксон по результатам выборки в «нормальные часы» амплитуда E ($E_{\max} - E_{\min}$) примерно в два раза больше, чем для случая выборки «по критериям». Средние значения E на станции Тикси выше для «нормальных часов», тогда как на станции Диксон средние значения для обеих выборок совпадают (см. табл. 4). Корреляция между рассмотренными выборками высокая для Тикси ($R = 0,77$) и очень высокая для Диксон ($R = 0,94$).

высокую (Тикси) и очень корреляционные связи.

Таблица 4

Характеристики суточного хода E

Станция	Тип выборки	E , В/м		
		среднее	max	min
Тикси	Норм. часы	337	384	308
	По критериям	316	342	296
о-в Диксон	Норм. часы	532	635	458
	По критериям	532	576	502
мыс Баранова	По критериям	332	366	306

Выборки значений E , сформированные с учетом установленных критериев, по объему оказываются меньше выборок для «нормальных часов» по всем рассматриваемым явлениям (табл. 5). Но при отсутствии атмосферных явлений выборка «по критериям» составляет более 80 % от объема выборки при нормальных условиях. Применение предложенных критериев практически исключает

из формируемых для анализа выборок случаи с метелями и грозами, но допускает наличие разного рода осадков.

Таблица 5

Количество метеорологических явлений в выборке «по критериям» (Nпо крит.) и их доля в выборке для «нормальных часов» (Nнорм. ч)

Явление	Нпо критериям	Нпо крит./ Nнорм. %	Нпо критериям	Нпо крит./ Nнорм. %
	<i>Тикси</i>		<i>Диксон</i>	
Нет явлений	381362	80,2	478980	83,4
Роса	1883	57,5	—	—
Иней	74075	68,3	22891	47,7
Гололед	879	61,7	2190	80,8
Изморозь	60029	55,9	48192	54,6
Дымка	14414	53,8	40323	69,2
Туман	3411	33,9	15076	40,8
Туман просв.	2166	42,7	1503	63,8
Мгла	1055	59,6	—	—
Поземок	55565	31,1	98896	43,9
Метель низовая	700	1,4	5480	5,4
Метель общая	0	0,0	321	1,0
Иглы ледяные	6928	65,2	622	46,9
Зерна снежные	19921	58,6	—	—
Морось	15705	47,9	3033	76,3
Дождь	24428	37,0	8335	51,8
Дождь ливневой	4838	40,4	11732	55,0
Снег	204069	46,0	38177	37,6
Снег ливневой	8951	40,4	55136	58,8
Снег мокрый	2376	48,8	1879	82,5

Явление	Нпо критериям	Нпо крит./ Ннорм. %	Нпо критериям	Нпо крит./ Ннорм. %
	<i>Тикси</i>		<i>Диксон</i>	
Снег ливн. мокр.	2502	53,6	10006	84,7
Гроза	24	5,0	1	0,7
Полярное сияние	28472	58,5	5222	52,2
Иные явления	—	—	267	35,7

Заключение

По результатам анализа пятилетнего массива минутных данных о напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы двух станций полярного региона Российской Федерации, а также информации о метеорологических явлениях получены статистически значимые критерии для значений E_{cp} и ΔE в условиях отсутствия метеоявлений. Полученные критерии показали возможность их применения в оперативной практике для автоматизации обработки поступающей информации об атмосферно-электрических характеристиках, а также ее контроля на рассматриваемых станциях.

Полученные результаты в дальнейшем могут найти применение при решении обратной задачи, а именно для распознавания таких опасных метеоявлений как метели и грозы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атмосферное электричество (1991) / В кн.: Атмосфера. Справочник. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 395–408.

Зайнетдинов Б. Г., Соколенко Л. Г. (2018). Результаты модернизации и расширения сети наблюдений за атмосферным электричеством // Труды ГГО. № 589. С. 153–166.

Зайнетдинов Б. Г., Клово А. Г., Кудринская Т. В., Куповых Г. В., Тимошенко Д. В. (2020). Формирование суточных вариаций атмосферного электрического поля вблизи поверхности земли в различных метеорологических условиях // Труды военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. S674. С. 176–180.

Методические указания по автоматизированной обработке гидрометеорологической информации. Выпуск 3. Метеорологическая информация неавтоматизированных гидрометеорологических станций и постов. (2005) / Часть 1. Метеорологическая информация станций. Раздел 1. Занесение информации на технический носитель — Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД. 71 с.

Морозов В. Н. (2015). Влияние глобального распределения аэрозольных частиц на электрический потенциал ионосферы // Труды ГГО. № 577. С. 106–112.

Попов И. Б. (2008). Статистические оценки влияния различных метеорологических явлений на градиент электрического потенциала атмосферы // Труды ГГО. 2008. С. 152–161.

Соколенко Л. Г., Зайнетдинов Б. Г. (2019). Электрические характеристики приземного слоя атмосферы / В сб: Обзор состояния окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2018 год. — М.: ИГКЭ. С. 29–31.

Чалмерс Дж. А. (1974). Атмосферное электричество — Л.: Гидрометеиздат. 421 с.

**НОВЫЙ ПОДХОД
К ПЕРЕДАЧЕ ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ
НЕФЕЛОМЕТРАМ**

П. С. Зименков

Главная Геофизическая Обсерватория им. А.И. Воейкова
194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021 St. Petersburg, Karbysheva st., 7

E-mail: pavel_zimenkov@mail.ru

Поступила в редакцию 19.10 2023
Поступила после доработки 22.11.2023

Состояние вопроса

В настоящее время общепризнанным методом контроля нефелометров являются полигонные сравнения, описанные в Руководстве ИКАО (2005). Данный метод предусматривает проведение натуральных сличений эталонной группы трансмиссометров с исследуемыми нефелометрами. Сличения проводятся в течение длительного периода, в котором должны наблюдаться жидкие и твердые осадки и не менее 10 отдельных случаев с метеорологической оптической дальностью (далее S) менее 500 м. Непрерывная регистрация сигналов всех измерителей в процессе сличений выполняется с интервалом 1 мин.

Для анализа выбирают только однородные данные. За показатель однородности $v(S)$ принимается отношение стандартного отклонения к среднему за 10 мин значению S. Пригодными для статистической обработки считаются данные, для которых показатель однородности не превышает 0,1. Отфильтрованные результаты представляют в виде коробчатых диаграмм, отображающих медиану, 50 %, 90 %, 99 %

интервалы, максимальное и минимальное значение в каждом из поддиапазонов 0 – 100, 100 – 200, ... 900 – 1000, 1000 – 1200, 1200 – 1500 и 1500 – 2000 м с указанием количества случаев.

Описанный метод позволяет контролировать не только метрологические характеристики нефелометров, но и корректность измерений S при различных погодных условиях.

Фирма Vaisala является мировым лидером в области производства измерителей видимости. Для сличений на полигоне фирмы используются два трансмиссометра MITRAS, один из которых имеет один передатчик и два приемника с измерительной базой соответственно 20 и 200 м, второй — один приемник с базой 75 м. Принятый фирмой Vaisala метод продолжителен по времени, трудоемок и пригоден только для оценки сопоставимости результатов измерений группы эталонных трансмиссометров и новых типов нефелометров в естественных условиях.

Контроль нефелометров на месте их эксплуатации выполняется с использованием калибровочного набора, имитирующего высокий уровень принимаемого сигнала (малое значение S). Фирма Vaisala производит калибровочные наборы, имитирующие значение $S < 5$ м. Набор состоит из двух круглых светорассеивающих пластин, диаметром 180 мм, и штанги для их крепления на нефелометр. Имитируемое конкретным калибровочным набором значение S определяется на полигоне по показаниям контрольного нефелометра и эталонной группы трансмиссометров. Линейность коэффициента рассеяния (далее σ) у нефелометров подобно измерению линейности коэффициента пропускания (далее τ) трансмиссометров, не определяется, что может привести к снижению достоверности результатов измерений S .

Недостатки представленного метода

Суммарная относительная погрешность передачи единицы величины от трансмиссометров контрольному нефелометру при полигонных сличениях состоит из случайных составляющих:

однородности S ($v(S)$) и относительной погрешности трансмиссометров δS :

$$\delta = \sqrt{(v(S))^2 + \delta S^2} \quad (1)$$

Поскольку в естественных условиях величина S быстро изменяется (особенно при осадках), то повышение требований к критерию однородности (уменьшению его относительно 0,1) существенно (экспоненциально) сократит число пригодных для статистического анализа случаев, что приведет к кратному увеличению периода испытаний. Это делает нецелесообразным повышение требований к критерию однородности при полигонных сличениях.

Погрешность определения S эталонным трансмиссометром может быть оценена следующим образом. В соответствии с законом Бугера—Ламберта (Руководство, 2014) формула для измерения S с помощью трансмиссометра имеет вид:

$$S = -\frac{3l}{\ln(\tau)} \quad (2)$$

где: S — метеорологическая оптическая дальность, м; l — база трансмиссометра, м; τ — коэффициент пропускания.

Продифференцировав уравнение (2) по τ , получим уравнение абсолютной погрешности измерения S трансмиссометром:

$$dS = \frac{3l \cdot d\tau}{\tau \cdot \ln^2(\tau)} \quad (3)$$

Разделив уравнение (3) на S , получим относительную погрешность δS измерения S трансмиссометром:

$$\frac{dS}{S} = -\frac{d\tau}{\tau \cdot \ln(\tau)} \quad (4)$$

Если выразить τ , из уравнения (2) и подставить его в уравнение (4), получим:

$$\delta S = \frac{S}{l} \cdot \frac{\Delta \tau}{3e^{-\frac{3 \cdot l}{S}}} \quad (5)$$

Зависимость δS трансмиссометра с абсолютной погрешностью измерения коэффициента направленного пропускания $\Delta \tau = \pm 0,3 \%$ от значения S , нормированного на базу трансмиссометра, приведено на рис. 1.

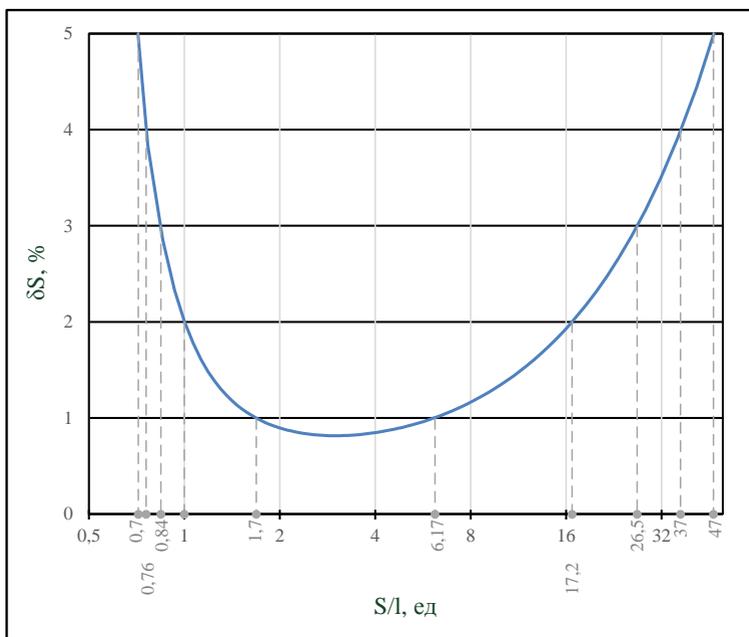


Рис. 1. Зависимость δS трансмиссометра с $\Delta \tau = \pm 0,3 \%$ от значения S , нормированного на длину его базы

Границы измерения нормированных значений S при различных значениях относительной погрешности трансмиссометров приведены

в таблице 1 ($I_{\min} = 20$ м, $I_{\max} = 200$ м), из которой следует, что с погрешностью δS не более 5 % трансмиссометры обеспечивают определение S в диапазоне от 14 до 9400 м.

Суммарная относительная погрешность передачи единицы величины от трансмиссометров контрольному нефелометру при этом составляет

$$\delta = \sqrt{10^2 + 5^2} \approx 11,2 \%$$

Таблица 1

Предельные нормированные значения S при различных значениях относительной погрешности трансмиссометра δS

$\delta S, \%$	1	2	3	4	5
$(S/I)_{\min}$	1,70	1,00	0,84	0,76	0,70
$(S/I)_{\max}$	6,17	17,70	26,50	37,00	47,00

Таким образом, на полигоне Vaisala передать единицу величины S нефелометру в диапазоне S от 14 до 9400 м возможно лишь с погрешностью 11,2 %.

В соответствии с Государственной поверочной схемой (2023) при передаче единицы величины от контрольного нефелометра калибровочному набору и от калибровочного набора рабочему нефелометру соотношение погрешностей должно составлять не более 1:2, тогда относительная погрешность рабочего нефелометра в указанном диапазоне составит не менее 44,8 %.

Представленные расчеты показывают, что полигонные сравнения не обеспечивают условий для проведения поверки рабочих нефелометров. Недостатки, препятствующие поверке рабочих нефелометров на полигоне, состоят в следующем:

- относительная погрешность передачи единицы S нефелометрам при сравнениях на полигоне превышает 10 %;
- база трансмиссометра не оптимальна для измерения величины S , имитируемой калибровочным набором;
- калибровочный набор имитирует лишь одно значение S , определяемое по показаниям контрольного нефелометра.

Концепция поверки

Для устранения указанных недостатков и минимизации погрешности при сличениях предлагается сделать следующее:

– уменьшить базу трансмиссометра до оптимальной для измерения S с минимальной погрешностью в диапазоне 3...5 м;

– сличения эталонного нефелометра с трансмиссометром осуществлять лабораторно в камерах с искусственно созданной устойчивой оптической видимостью $S = 3...5$ м (например, в камерах туманов);

– при поверке рабочих нефелометров рассматривать калибровочный набор, имитирующий высокий уровень сигнала ($\tau = 100\%$), по аналогии с процедурой поверки трансмиссометров (Методика поверки..., 2011);

– осуществлять контроль линейности оптической системы «излучатель – приемник» рабочего нефелометра при помощи светофильтров с известным τ в спектральном диапазоне нефелометра.

Расчет оптимальной базы трансмиссометра

Продифференцировав правую часть уравнения (4) по τ и приравняв ее нулю, получим уравнение, корень которого соответствует минимальной (см. рисунок 1) относительной погрешности измерения S :

$$-\frac{(\ln(\tau)+1)d^2\tau}{\tau^2 \cdot \ln^2(\tau)} = 0 \quad (6)$$

$$\ln(\tau) + 1 = 0 \quad (7)$$

$$\tau = e^{-1} \approx 0,37 \quad (8)$$

Таким образом, трансмиссометр измеряет S с наименьшей относительной погрешностью при $\tau \approx 37\%$ при этом отношение погрешностей S и τ составляет e (из уравнения (3) при $\tau = e^{-1}$) — это

предельно минимальное значение погрешности измерения S , которое может быть достигнуто.

Подставив $\tau = e^{-1}$ в уравнение (1), получим, что измерение S с минимальной относительной погрешностью возможно при длине базы трансмиссометра $l = \frac{S}{3}$.

Устройство контроля линейности оптической системы излучатель-приемник нефелометра

Схема устройства, предлагаемого для контроля линейности оптической системы «излучатель–приемник» нефелометра, приведена на рис. 2.

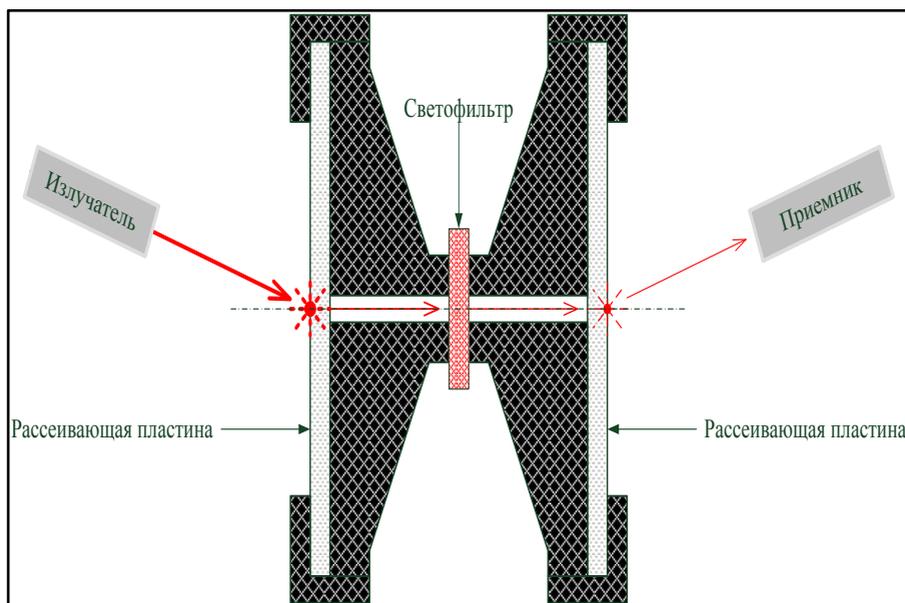


Рис. 2. Устройство для контроля линейности оптической системы «излучатель – приемник» нефелометра

Калибровочный набор нефелометра дополняется устройством из непрозрачного материала с отверстием, диаметр которого в несколько раз меньше толщины вставки. Световой поток (с определенной длиной волны) от инфракрасного излучателя нефелометра, достигнув левой рассеивающей пластины, проходит через отверстие и образует на правой рассеивающей пластине поток излучения, поступающий в приемник. Устройство позволяет устанавливать на пути светового потока светофильтр (светофильтры) с известными коэффициентами направленного пропускания на длине волны излучателя нефелометра (обычно 850 нм).

При отсутствии светофильтров приемник нефелометра регистрирует значение коэффициента рассеяния, эквивалентное мощности принимаемого светового потока P_{100} (световой коэффициент направленного пропускания без установленного светофильтра принимается за 100 %).

При установке светофильтра световой поток P_i ослабляется кратно значению коэффициента пропускания установленного светофильтра на длине волны нефелометра, и пропорционально снижается регистрируемое значение коэффициента рассеяния.

Таким образом, устанавливая светофильтры с различными значениями коэффициентов пропускания, можно оценить соответствие имитируемых и измеряемых значений коэффициентов рассеяния и, соответственно, метеорологической оптической дальности.

Описанная процедура контроля линейности оптической системы «излучатель–приемник» нефелометра по сути является аналогом процедуры определения погрешности светового коэффициента направленного пропускания при поверке трансмиссометра, описанной, например, в документе (Методика поверки..., 2011).

Схема передачи единицы величины рабочим нефелометрам

Резюмируя изложенное, передача единицы S рабочим нефелометрам схематично будет выглядеть следующим образом:

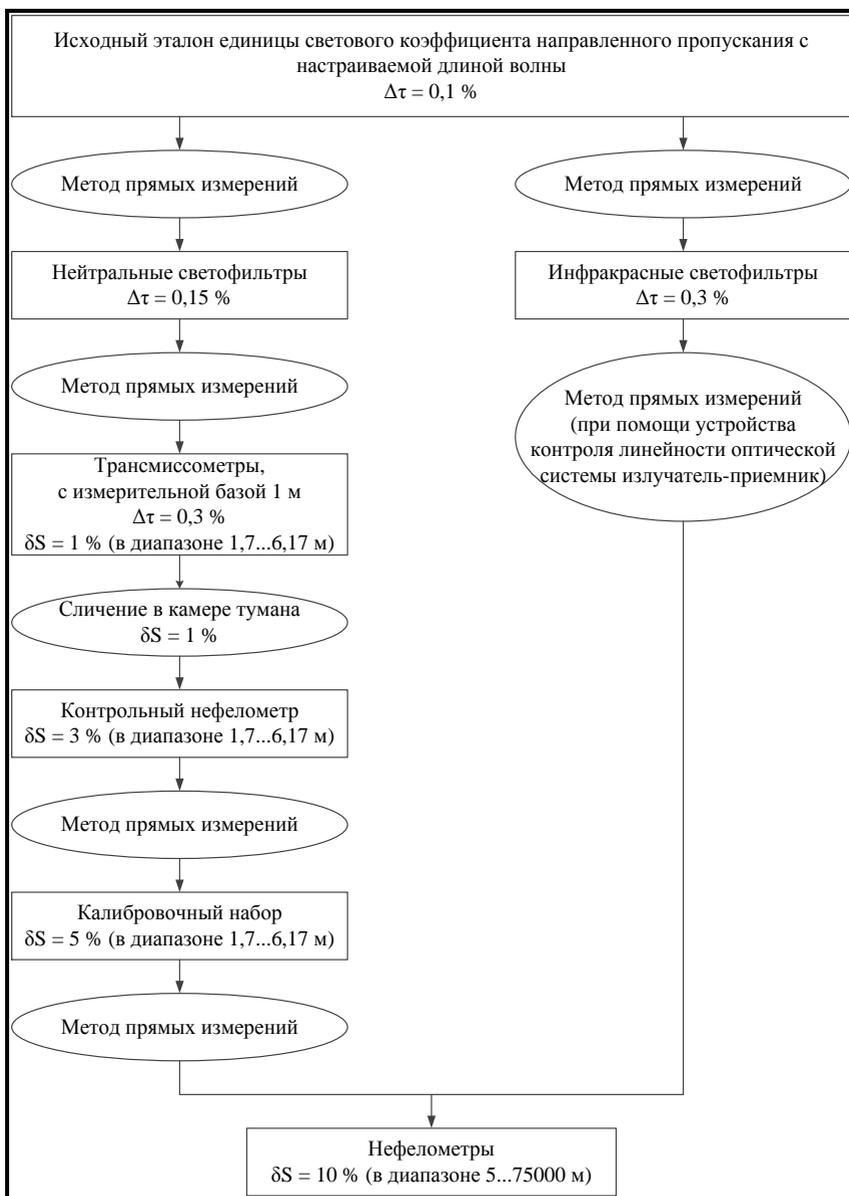


Рис. 3. Поверочная схема для нефелометров

Поверочная схема для передачи единицы S нефелометрам на местах их эксплуатации при помощи штатного калибровочного набора (левая ветвь схемы) и инфракрасных светофильтров с устройством для их установки и применения (правая ветвь схемы) представлена на рисунке 3. В прямоугольниках указаны эталоны и средства измерений с их метрологическими характеристиками, в овалах — метод передачи единицы S . Под методом прямых измерений подразумевается измерение поверяемым средством воспроизведенного эталоном значения S . Под сличением подразумевается сравнение показаний эталона и поверяемого средства в воспроизводимой испытательным оборудованием среде.

Предлагаемая поверочная схема определяет прослеживаемость единицы величины от исходного эталона рабочим нефелометрам. Схемой предлагается традиционная передача единицы S трансмиссометрам при помощи нейтральных светофильтров. Особенность поверки состоит в том, что трансмиссометр имеет сверхмалую базу длиной 1 м и ограниченный диапазон измерения метеорологической оптической дальности 1,7–6,17 м.

Передача единицы S от трансмиссометров контрольному нефелометру, в отличие от описанной в Руководстве (2005) процедуры осуществляется не на полигоне и не во всем диапазоне измерений, а в камере тумана, воспроизводящей высокую оптическую плотность среды и узком диапазоне измерений. Затем, на контрольном нефелометре определяется воспроизводимое калибровочным набором значение S в диапазоне 1,7–6,17 м.

В правой ветви схемы осуществляется измерение спектральных коэффициентов пропускания инфракрасных светофильтров для передачи единицы величины нефелометру, работающему на длине волны 850 нм. Спектральный коэффициент пропускания определяют на этой же длине волны.

Затем с помощью калибровочного набора осуществляют контроль воспроизводимой единицы S на рабочем нефелометре. Для контроля линейности оптической системы «излучатель–приемник» рабочего нефелометра на калибровочный набор устанавливается устройство (см. рис. 2). За уровень измеряемого сигнала в 100 % принимается

значение, измеренное при установленном устройстве контроля линейности без инфракрасных светофильтров. Проверяется пропорциональность ослабления σ значению τ установленного инфракрасного светофильтра. Поочередной установкой инфракрасных фильтров с различными значениями τ , а также их одновременной установкой, осуществляется контроль линейности во всем диапазоне измерения нефелометра.

Выводы

1. Полигонные сличения, описанные выше и в государственной поверочной схеме (2023), не пригодны для передачи единицы величины нефелометрам в натуральных условиях в диапазоне измерения нефелометров.

2. Оптимальная измерительная база трансмиссометра для передачи единицы S в диапазоне значений 1,7...6,17 м составляет порядка 1 метра.

3. Столь малая измерительная база позволяет проводить поверку нефелометров по трансмиссометру в камере тумана.

4. Применение камеры тумана для воспроизведения малых значений S позволит существенно снизить погрешность передачи единицы S контрольному нефелометру за счет создания в ней более однородного тумана, чем в естественных условиях.

5. Для передачи единицы S калибровочному набору не требуется оценивать соответствие метрологических характеристик контрольного нефелометра в полном диапазоне измерений — достаточно передавать единицу величины S (контрольному нефелометру) вблизи номинального (3...5 м) значения S калибровочного набора.

6. Линейность «излучателя–приемника» нефелометра может быть проверена аналогично проверке линейности «излучателя–приемника» трансмиссометра при помощи калибровочного устройства с набором инфракрасных светофильтров;

7. Предлагаемый метод позволит обеспечить передачу единицы величины S рабочим нефелометрам с относительной погрешностью не более 10 %.

Заключение

Предлагаемый метод поверки нефелометров представляет собой модифицированный метод поверки трансмиссометров, с той лишь разницей, что при поверке трансмиссометров за $\tau = 100\%$ принимается текущее значение τ слоя атмосферы, а для нефелометров за 100% принимается значение σ при установленном калибровочном наборе. Проверка линейности излучателя–приемника для обоих типов измерителей осуществляется с помощью светофильтров.

«Привязка» S , имитируемой с помощью калибровочного набора, к трансмиссометру должна проходить в лабораторных условиях (в камере тумана) при низком значении S , что обеспечит наименьшую погрешность передачи единицы нефелометру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Государственная поверочная схема для средств измерений координат цвета, координат цветности, коэффициента светопропускания, белизны, блеска, коррелированной цветовой температуры, индекса цветопередачи, интегральной (зональной) оптической плотности, светового коэффициента пропускания и метеорологической оптической дальности (2023) — Утверждена приказом федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от «07» августа 2023 г. № 1556

Измерители дальности видимости ФИ-4. Методика поверки МП 254-0018-2011 (2011) — Утверждена руководителем ГЦИ СИ ФГУП ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» Н.И. Хановым 05 октября 2011 г.

Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений (2014) — ВМО. № 8.

Руководство по практике наблюдения за дальностью видимости на ВПП и передачи сообщений о ней» (2005) — Дос 9328 Ап/908 ИКАО.

Способ поверки нефелометров - измерителей метеорологической оптической дальности и устройство для его осуществления — заявка на изобретение № 2023109447 от 12.04.2023.

**ИМИТАТОР СВЕТОВОГО ПОТОКА,
РАССЕЯННОГО АТМОСФЕРНЫМ АЭРОЗОЛЕМ,
ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ДАТЧИКОВ
НЕФЕЛОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА**

А.Г. Стародубов, В.С. Яковлев, А.А. Родионов

Главная Геофизическая Обсерватория им. А.И. Воейкова
194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7

Voeikov Main Geophysical Observatory
194021, St. Petersburg, Karbysheva st., 7

e-mail: arkstar12@mail.ru, etalonggo@mail.ru

Поступила в редакцию 28.06.2023
Поступила после доработки 03.11.2023

Методы и средства поверки нефелометров

Для измерения метеорологической оптической дальности (МОД) преимущественно применяются два типа приборов: трансмиссометры и нефелометры (ВМО, 2021; ИКАО, 2005).

В нефелометрах реализован метод, основанный на измерении коэффициента рассеяния σ на небольшом объеме воздуха. В нефелометрическом датчике по данным измерений σ с учетом сопутствующих параметров выполняется расчет МОД.

В государственный реестр средств измерений (ГРСИ) Российской Федерации внесены нефелометры VS20-UMB (Фирма "Lufft Mess und Regeltechnik GmbH", Германия); ПЕЛЕНГ СЛ-03 (ОАО "Пеленг", Беларусь, г. Минск); PWD: PWD10, PWD12, PWD20, PWD22, PWD31, PWD52 (Фирма "Vaisala Oyj", Финляндия); FS11, FS11P (Фирма "Vaisala Oyj", Финляндия); FD12/FD12P (Фирма "Vaisala Oyj", Финляндия); FD70 (Фирма "Vaisala Oyj", Финляндия), также датчики оптической видимости ДОВ-02 (АО "Минимакс-94", Россия).

Методики поверки (или калибровки) перечисленных нефелометров принципиально схожи. В качестве примера, рассмотрим методику калибровки нефелометра FS11 фирмы "Vaisala Oyj" (Vaisala, FS11, 2005).

Методика калибровки нефелометра FS11 предполагает использование калибровочного комплекта FSA11, который входит в комплект поставки нефелометра FS11 (Vaisala, FS11, 2005). Он содержит две рассеивающие матовые пластины и две заглушки: одна для источника, другая — для приемника излучения. Калибровка нефелометра проводится по двум точкам. Первая: источник света и приемник закрыты заглушками, что соответствует состоянию отсутствия рассеяния (высокая видимость). Вторая: между источником света и приемником расположены рассеивающие пластины, что соответствует интенсивному рассеянию (низкая видимость). Схема монтажа пластин для проведения калибровки приведена на рисунке 1.

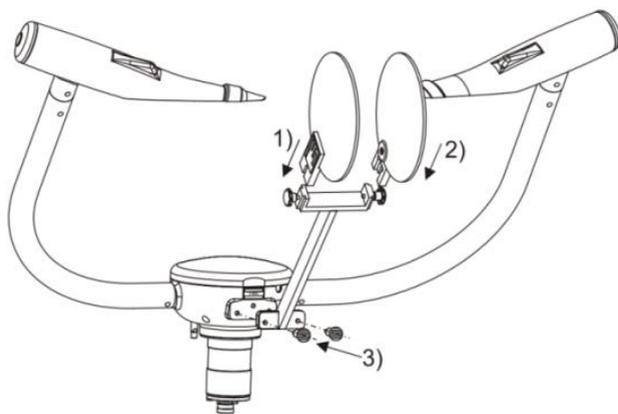


Рис. 1. Схема калибровки нефелометра FS11

1, 2 — рассеивающие пластины из набора FSA11; 3 — кронштейн-держатель пластин, который фиксируется на мачте нефелометра

Рисунок воспроизведен из документа "Vaisala Oyj" (Vaisala, FS11, 2005).

В каждой из двух точек оценивается величина измеренного нефелометром коэффициента рассеяния σ . Результат измерения σ в первой точке (с заглушками) не должен превышать $\pm 0,0001$. Результат измерения σ во второй точке (с рассеивающими пластинами) не должен отклоняться от эталонного значения, указанного на рассеивающих пластинах, более чем на $\pm 3\%$. При этом отклонение определяется по формуле:

$$\delta\sigma = \frac{\sigma_{\text{изм}} - \sigma_{\text{эт}}}{\sigma_{\text{эт}}} \cdot 100\%$$

где $\delta\sigma$ — определяемое отклонение; $\sigma_{\text{изм}}$ — измеренный коэффициент рассеяния; $\sigma_{\text{эт}}$ — эталонное значение коэффициента рассеяния. Эталонное значение коэффициента рассеяния определяется при производстве пластин на заводе-изготовителе.

В процессе совершенствования методов поверки датчиков нефелометрического типа, с целью увеличения точности передачи единицы рабочим средствам измерений (нефелометрам), было разработано устройство задания метеорологической оптической дальности (далее – УСМОД) (Левин и др., 2022; УСМОД, 2022). Оптическая система УСМОД содержит световоды, аттенюаторы, модуляторы сигнала, а также набор специальных оптических фильтров. С помощью различных попарных комбинаций оптических фильтров он воспроизводит различные значения МОД.

Однако УСМОД имеет довольно сложную конструкцию, дорог в изготовлении и эксплуатации. В связи с этим возникает потребность в разработке более простого и доступного устройства, метрологические характеристики которого будут соответствовать уровню рабочего эталона по государственной поверочной схеме (ГПС, 2023).

В данной работе приводится описание и результаты апробации имитатора светового потока, рассеянного атмосферным аэрозолем, для тестирования датчиков нефелометрического типа. Имитатор разработан в ГГО, расширяет возможности существующих средств поверки, позволяет контролировать корректность результатов

измерений нефелометра во всем диапазоне его измерений, и имеет простую в изготовлении конструкцию.

Описание конструкции имитатора

Конструкция имитатора была разработана на основе калибровочных комплектов FSA11 и FDA13, предназначенных для калибровки нефелометров типа FS11 и FD12/FD12P фирмы Vaisala. Схема конструкции имитатора изображена на рисунке 2.

В основу предлагаемой конструкции заложено диафрагмирование (ограничение) диффузного светового потока и ослабление его с помощью нейтральных светофильтров.

Диффузный световой поток формируется из светового потока излучателя (1), который проходит через рассеивающие пластины (3). Имитатор содержит две обоймы (4) для монтажа двух сплошных рассеивающих пластин (3) и двух вставок (6) со сквозными отверстиями по оси, в которые вставляются два цилиндра (10) с осевыми отверстиями меньшего диаметра. Вставка (6) прижимает рассеивающую пластину (3) к внутреннему торцу обоймы (4).

Между вставками располагаются нейтральные светофильтры (5) из набора светофильтров КС-116 с различными интегральными коэффициентами направленного пропускания. В итоге излучение источника (1) нефелометра попадает на рассеивающую пластину (3), далее проходит по каналу (7), ослабляясь светофильтром (5), повторно рассеивается на второй пластине (3) и попадает на приемник нефелометра (2).

Использование предлагаемой конструкции позволяет подразделить диапазон измерений дальности видимости на три части.

Первая часть диапазона, воспроизводится, когда установлены только пластины без установленного на них имитатора (рис.1). В этом случае принимаемый приемником нефелометра рассеянный световой поток высок, что соответствует минимальной дальности видимости.

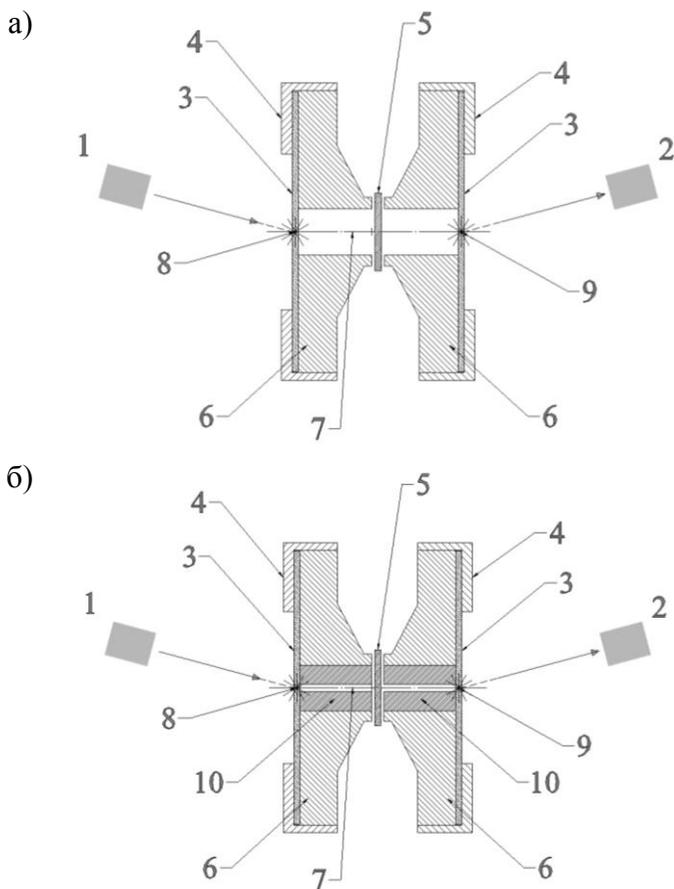


Рис. 2. Устройство имитатора рассеянного потока:

а) — оптический канал (широкий), б) — оптический канал (узкий)

1 — источник излучения, 2 — приемник излучения, 3 — пластины для диффузного рассеяния, 4 — обоймы для монтажа рассеивающих пластин 3,

5 — светофильтр, 6 — вставки со сквозными отверстиями,

7 — оптический канал, 8, 9 — области диффузного рассеяния,

10 — цилиндр с осевым отверстием

Вторая часть диапазона воспроизводится, когда установлено вышерассмотренное устройство, но без цилиндров (10) с осевыми

отверстиями (при этом, оптический канал широкий рис. 2а). Поддиапазон разбивается на 5 значений комплектом КС-116 (в котором 5 светофильтров). Эта вторая часть диапазона соответствует более низким значениям принимаемого рассеянного потока, чем первая часть диапазона, и большей дальности видимости.

Третья часть диапазона воспроизводится, когда установлено вышерассмотренное устройство вместе с цилиндрами (10) (при этом, оптический канал узкий рис. 2б). Этот поддиапазон также разбивается на 5 значений комплектом КС-116. И эта третья часть диапазона соответствует самым низким значениям принимаемого рассеянного потока, и максимальной дальности видимости.

Апробация имитатора и её результаты

В качестве средства измерений для апробации имитатора был выбран нефелометр FS11 фирмы Vaisala. Рассеивающими пластинами (3 на рис.2) в имитаторе были использованы три комплекта пластин: два калибровочных комплекта FSA11, FDA13 фирмы Vaisala и комплект пластиковых пластин, изготовленных в ГГО (с теми же геометрическими размерами, что и у FSA11 и FDA13). В имитаторе был использован комплект нейтральных светофильтров КС-116, его коэффициенты направленного пропускания представлены в таблице 1.

Измерения проводились по следующему алгоритму. Первоначально регистрировался коэффициент рассеяния σ от пластин, установленных на нефелометр без имитатора (как на рис. 1). Затем на пластины устанавливался имитатор, и измерения σ выполнялись при двух вариантах его конфигурации. В первом варианте цилиндры отсутствовали и поочередно устанавливались светофильтры из комплекта КС-116 (канал широкий, рис. 2а). Во втором варианте цилиндры присутствовали и также устанавливались светофильтры (канал узкий, рис 2б). В каждой точке выполнялось по 3 измерения и рассчитывалось среднее их них.

Таблица 1

Таблица 1

Коэффициенты направленного пропускания (τ , %) нейтральных светофильтров из комплекта КС-116

Номер светофильтра	1	2	3	4	5
τ , %	89,5	69,5	49,3	21,7	3,7

Результаты измерений при апробации представлены на рисунке 3 и в таблице 2.

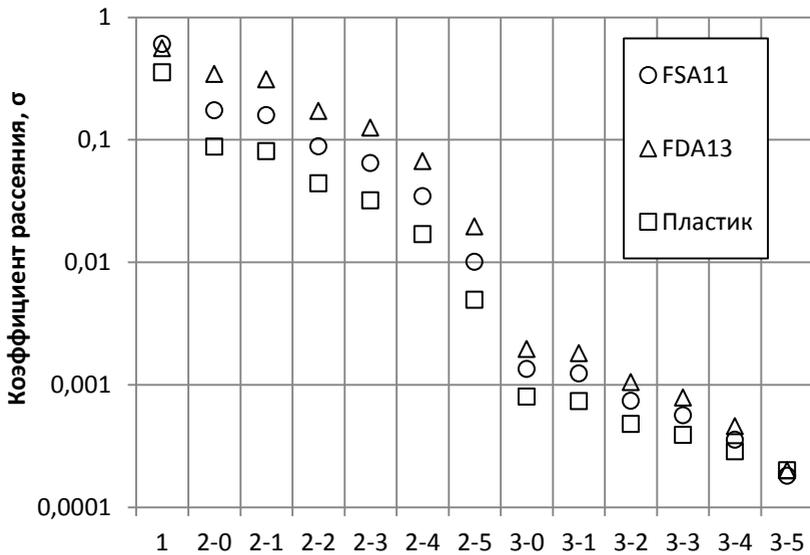


Рис. 3. Графическое представление результатов измерений при апробации имитатора (вертикальная ось в логарифмическом масштабе)

Таблица 2

Результаты измерения коэффициента рассеяния (σ) на нефелометре FS11 с применением имитатора с разными комплектами рассеивающих пластин (FSA11, FDA13 и пластиковыми)

Диапазон		FSA11	FDA13	Пластиковые
Первая часть	1	0,604567	0,559850	0,355827
	2–0	0,174656	0,345611	0,088168
	2–1	0,159453	0,311005	0,080819
Вторая часть	2–2	0,088598	0,171905	0,044143
	2–3	0,064798	0,125788	0,032017
	2–4	0,034648	0,067232	0,017016
	2–5	0,010114	0,019711	0,004965
	3–0	0,001351	0,001965	0,000804
	3–1	0,001244	0,001813	0,000737
Третья часть	3–2	0,000743	0,001053	0,000480
	3–3	0,000567	0,000790	0,000392
	3–4	0,000357	0,000462	0,000288
	3–5	0,000182	0,000201	0,000202

В таблице и на рисунке цифрами обозначены конфигурации имитатора воспроизводящие разные части диапазона: 1 — пластины без имитатора; 2–0 — имитатор с широким оптическим каналом, но без светофильтра; 2–1 — 2–5: имитатор с широким оптическим каналом и со светофильтрами КС-116 (1–5); 3–0 — имитатор с узким оптическим каналом, но без светофильтра; 3–1 — 3–5: имитатор с узким оптическим каналом и со светофильтрами КС-116 (1–5);

На рисунке 3 видно, что описанная выше возможность имитатора воспроизводить множество точек диапазона измерений нефелометра достаточно хорошо реализуется. Также, по рисунку можно судить, что воспроизведение диапазона нефелометра реализуется одинаковым

образом для разных комплектов рассеивающих пластин, однако уровень сигнала для разных пластин на каждой точке разный.

Выводы

Результаты апробации представленного в данной работе имитатора светового потока, рассеянного атмосферным аэрозолем, предназначенного для поверки датчиков нефелометрического типа показали, что его конструкция позволяет имитировать различные значения коэффициента рассеяния в пределах диапазона измерений нефелометром (что и было заложено в идею конструкции имитатора).

Для дальнейшего анализа применимости имитатора в качестве эталона при поверке нефелометров необходимо определить его метрологические характеристики, т. е. определить номинальные значения МОД (или соответствующие им значения коэффициента рассеяния), воспроизводимые имитатором, а также погрешность их воспроизведения. В соответствии с ГПС (ГПС, 2023) для поверки нефелометров применяются рабочие эталоны с диапазоном МОД от 10 до 50000 м и относительной погрешностью от 4 до 10 %. При этом, допускаемое значение соотношения показателей точности рабочих эталонов и поверяемых по ним нефелометров должно составлять не более одного к двум. Следовательно, описанный в данной работе имитатор может быть применим для поверки нефелометров только в том случае, если его метрологические характеристики будут соответствовать приведённым выше характеристикам для рабочих эталонов по ГПС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений. Том I – Измерения метеорологических переменных (2021). — ВМО-№ 8.

Руководство по практике наблюдения за дальностью видимости на ВПП и передачи сообщений о ней (2005) — ИКАО, Doc 9328/AN908.

Государственная поверочная схема для средств измерений координат цвета, координат цветности, коэффициента светопропускания, белизны, блеска, коррелированной цветовой температуры, индекса цветопередачи, интегральной

(зональной) оптической плотности, светового коэффициента пропускания и метеорологической оптической дальности (утверждена приказом Росстандарта № 1556 от 07.08.2023), 2023.

Нефелометр FS11 Руководство пользователя. — Vaisala, 2005.

Левин А.Ю., Сергеев П.К., Ковальков В.П. (2022). Совершенствование метрологического обеспечения средств измерений метеорологической оптической дальности (МОД). / В кн. Сборник тезисов докладов Конференции во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева — СПб: ВНИИМ. С. 105–106.

ИССЛЕДОВАНИЯ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА НА ЧАСТИЦАХ ОКСИДА ЦИНКА

А. Х. Будаев

Высокогорный геофизический институт
360030 Нальчик, пр. Ленина, 2
High-Mountain Geophysical Institute
360030 Nalchik, Lenin Ave., 2

E-mail: budayalim@yandex.ru

Поступила в редакцию 31.10.2023
Поступила после доработки 01.12.2023

Введение

Разработка реагентов для проведения работ по активным воздействиям на градовые процессы требует изучения влияния электрических характеристик конвективного облака на льдообразующие свойства реагентов при их взаимодействии с облачной средой. Электрические поля облаков и заряды отдельных частиц в облаках оказывают существенное влияние на осадкообразование в мощных кучевых и кучево-дождевых облаках (Чалмерс, 1964; Saunders et al, 2006).

Взаимодействие частиц под влиянием электрических сил меняет эффективность столкновения частиц, особенно мелких. В сильных электрических полях практически исчезает область слабой коагуляции. Исследованию взаимодействия облачных частиц в электрическом поле посвящены следующие статьи (Красногорская, Неизвестный, 1973; Левин, Седунов, 1967; Синькевич и др., 2008). Влияние электрического поля на капли и аэрозольные частицы рассмотрено в (Balkarova et al, 2019).

В работах (Шаповалов, 2018; Shapovalov et al, 2020) приводятся

результаты численных экспериментов по влиянию электрических характеристик конвективного облака на процессы осадкообразования и отмечается наличие положительной обратной связи между объемом электрического заряда в облаке и ростом массы ледяных частиц.

Экспериментальные исследования, проведенные в ВГИ, показали, что при термической возгонке цинка в присутствии водяного пара образуются нанотрубки оксида цинка, которые имеют удельный выход льдообразующих ядер выше 10^{11} г^{-1} (Хучунаев и др., 2011; Таппасханов и др., 2014; Хучунаев и др., 2018). Этим обусловлен выбор оксида цинка объектом исследования.

В статье приводится описание комплекса аппаратуры и методики исследования влияния напряженности электрического поля плоского конденсатора на удельный электрический заряд частиц оксида цинка. Представлены результаты лабораторных экспериментов по определению удельного заряда.

Аппаратура для определения заряда на частицах оксида цинка

Для определения электрического заряда на частицах оксида цинка разработан комплекс аппаратуры, в состав которого входят большая облачная камера, устройство для возгонки реагента, плоский конденсатор, источник высокого напряжения, электронные весы, компьютер, видеокамера (см. рис. 1).

Пластины плоского конденсатора, изготовленные из фольгированного гетинакса, устанавливают посередине облачной камеры на определенном расстоянии друг от друга. Пластины подключают к источнику высокого напряжения. На край каждой пластины, обращенный к видеокамере, закрепляют линейки для измерений.

Под конденсатором устанавливают устройство для возгонки реагента так, чтобы графитовая подложка располагалась посередине между пластин. На стене камеры закрепляют видеокамеру, подключенную к компьютеру, с обзором на пластины конденсатора и устройство для возгонки реагента.

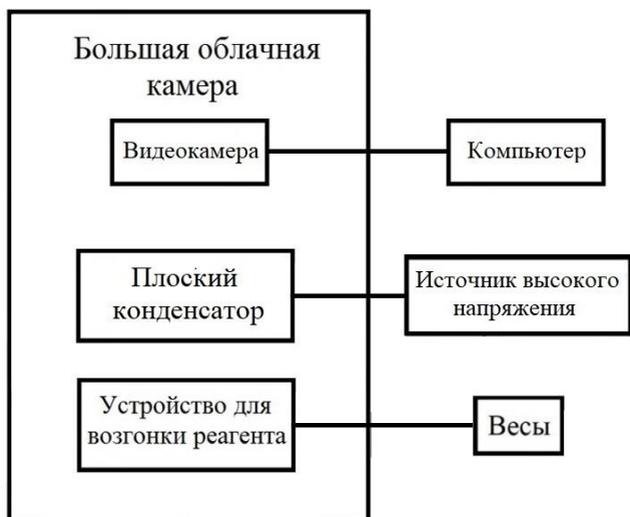


Рис. 1. Комплекс аппаратуры для измерения заряда

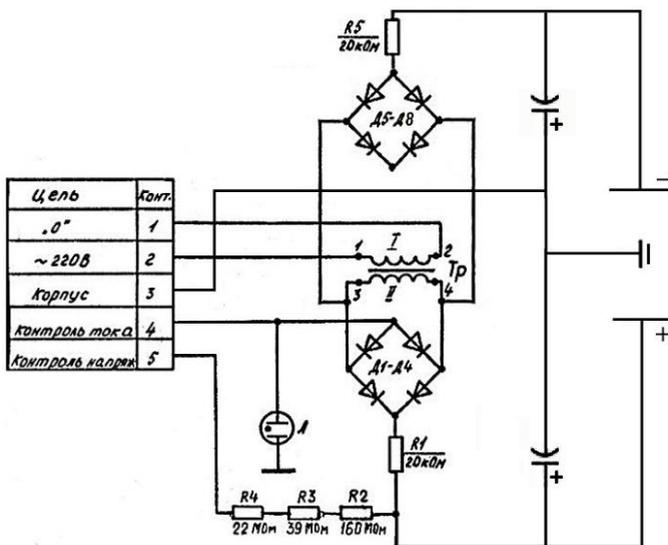


Рис. 2. Схема источника высокого напряжения

На противоположной от видеокамеры стенке облачной камеры закрепляют ширму из черной ткани. Ширма необходима для качественной съемки потока частиц возгонки при проведении экспериментов.

Для создания электрического поля используют источник высокого напряжения различного потенциала. На рисунке 2 представлена схема источника высокого напряжения, который работает в двух режимах: заземление одной пластины конденсатора и подача на другую пластину положительного или отрицательного потенциала.

Методика определения заряда на частицах оксида цинка

В основу проведения лабораторных экспериментов легла методика определения заряда на частицах штатного пиротехнического состава АД-1 (Хучунаев и др., 2021). Предварительно на электронных весах взвешивают исследуемый реагент (цинк) массой 0,01 г и закладывают его на графитовую подложку. От источника высокого напряжения подают напряжение на пластины конденсатора, а на контакты устройства для возгонки реагента — ток порядка 100 А. В результате этого происходит высокотемпературная возгонка и окисление цинка с образованием потока частиц оксида цинка, проходящего между пластин конденсатора. Во время эксперимента ведется непрерывная видеосъемка. Удельный заряд определяют по формуле (1) для расчета заряда частицы, движущейся в электрическом поле плоского конденсатора (Грабовский, 1974; Вольхин, 2012):

$$\frac{Q}{m} = \frac{2xv^2}{y^2E}, \quad (1)$$

где Q — заряд частицы, Кл; m — масса частицы, кг; x — половина расстояния между пластинами конденсатора, м; v — скорость движения частицы вдоль пластин, м/с; y — расстояние, которое прошла частица до столкновения с пластиной, м; E — напряженность электрического поля между пластинами конденсатора, В/м.

Полный заряд частицы $Q = q + \bar{q}$, где q — заряд частицы реагента, $\bar{q} = q_-$ — заряд, приобретенный частицей за счет контактного и диффузионного заряжения при подаче на одну из пластин конденсатора отрицательного потенциала и заземлении другой пластины. При подаче на одну из пластин положительного потенциала и заземлении другой пластины имеем $\bar{q} = q_+$.

Если заряд частицы отрицательный, то суммарный заряд частицы:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= -q + q_- \\ Q_2 &= -q + q_+ \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Если заряд частицы положительный, то:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= q + q_- \\ Q_2 &= q + q_+ \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где Q_1, Q_2 — суммарный заряд частиц возгонки цинка при использовании однополярного источника с подачей на пластины положительного и отрицательного потенциалов соответственно.

Как показано в работе (Гузеева, 2010), подвижность отрицательных ионов на 40 % больше, чем положительных. Поэтому зарядение за счет отрицательных ионов на 40 % больше, т. е. $|q_-| = 1,4|q_+|$.

Если заряд частицы отрицательный, то подставляя это значение в систему уравнений (2), получим:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= -q + 1,4q_+ \\ Q_2 &= -q + q_+ \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Если заряд частицы положительный, то подставляя это значение в систему уравнений (3), получим:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= q + 1,4q_+ \\ Q_2 &= q + q_+ \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Из системы уравнений (4) можно определить заряд на частицах реагента, когда частицы заряжены отрицательно:

$$q = \frac{Q_1 - 1,4Q_2}{0,4}. \quad (6)$$

Из системы уравнений (5) можно определить заряд на частицах реагента, когда частицы заряжены положительно:

$$q = -\frac{Q_1 - 1,4Q_2}{0,4}. \quad (7)$$

Величины Q_1 и Q_2 для продуктов возгонки определяются на основе отклонения частицы в электрическом поле по видеозаписи.

Результаты исследования

Исследованы электрические заряды частиц оксида цинка, приобретенные при термической возгонке цинка в электрическом поле плоского конденсатора. В режиме подачи на одну из пластин конденсатора отрицательного потенциала и заземлении другой пластины поток частиц оксида цинка отклоняется от отрицательно заряженной пластины (рис. 3, А). При возгонке цинка в режиме положительного потенциала и заземлении другой пластины частицы оксида цинка отклоняются от положительно заряженной пластины (рис. 3, Б).

При напряженности электрического поля $1,5 \cdot 10^3$ В/см и выше в процессе подъема потока частиц оксида цинка происходит пробой напряжения (рис. 4).

В таблице 1 и на рисунке 5 показано влияние напряженности электрического поля на удельный заряд на частицах оксида цинка. Каждая точка на графике представляет собой осредненное значение шести экспериментов для каждого значения напряженности электрического поля. Поэтому в таблице приведено среднее значение $Q_{cp}=q/m$ и его стандартное отклонение, демонстрирующее диапазон его разброса.

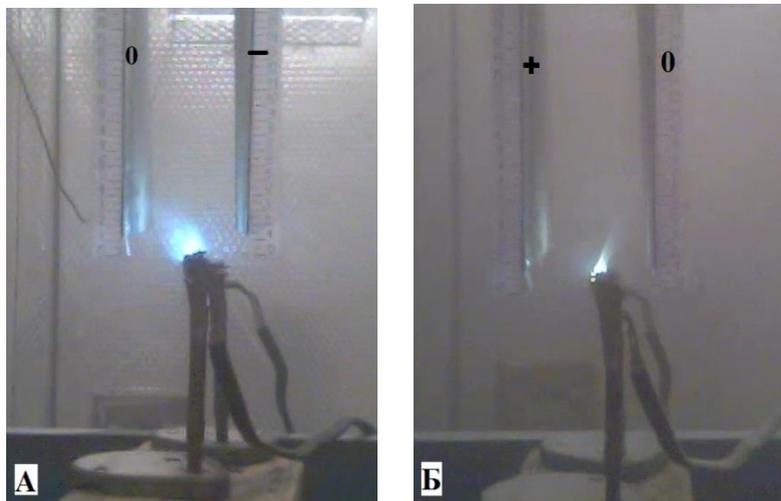


Рис. 3. Движение потока частиц ZnO в электрическом поле (А – режим «0», «-»; Б – режим «0», «+»)

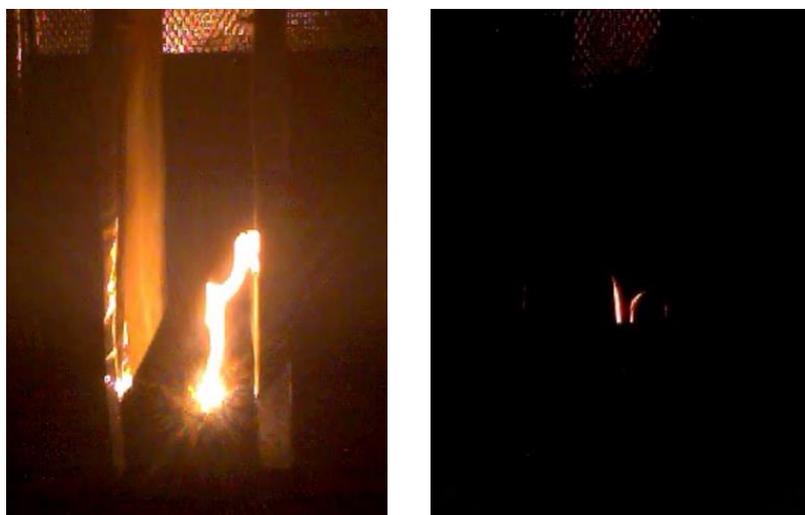


Рис. 4. Пробой высокого напряжения при возгонке цинка

Таблица 1

**Зависимость удельного заряда на частицах ZnO от напряженности
электрического поля**

Напряженность электрического поля, В/см	Удельный заряд (q/m) · 10 ⁻⁵ , Кл/кг	
	<i>Отрицательно заряженные частицы</i>	<i>Положительно заряженные частицы</i>
62,5	4,815	-3,686
62,5	3,686	-23,04
62,5	2,074	-11,29
62,5	4,232	-6,195
$Q_{ср}$ (σ)	3,70 (1,021)	-11,05 (7,443)
187,5	18,96	-2,408
187,5	1,920	-1,673
187,5	1,636	-3,110
187,5	1,229	-18,560
$Q_{ср}$ (σ)	5,94 (7,525)	-6,44 (7,016)
375	4,570	-2,458
375	3,840	-11,28
375	7,526	-3,345
375	1,555	-2,042
$Q_{ср}$ (σ)	4,37 (2,134)	-4,78 (3,784)
562,5	8,091	2,062
562,5	7,840	2,420
562,5	2,969	2,420
562,5	6,195	1,778
$Q_{ср}$ (σ)	6,27 (2,042)	2,17 (0,270)
750	1,778	1,416
750	14,588	5,346
750	17,111	2,047
750	2,178	6,742
$Q_{ср}$ (σ)	8,81 (8,076)	3,89 (2,223)

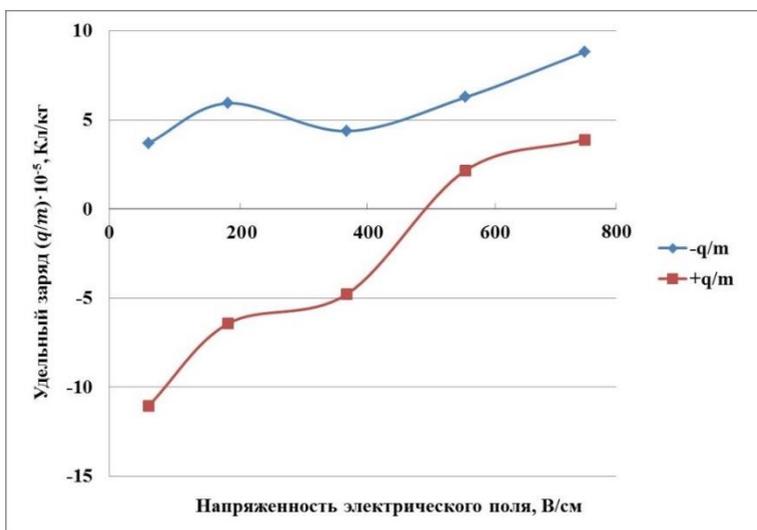


Рис. 5. Зависимость удельного заряда на частицах ZnO от напряженности электрического поля

Как видно из таблицы 1 и рисунка 5, абсолютное значение заряда на отрицательно заряженных частицах больше, чем на положительно заряженных. При напряженности электрического поля 480 В/см происходит переход приобретенного заряда от отрицательного к положительному. При этом наблюдается раздвоение потока частиц оксида цинка на отрицательно и положительно заряженные пластины конденсатора. По-видимому, данные процессы связаны с особенностями образования положительного и отрицательного зарядов на частицах реагента и требуют дальнейших исследований.

Основная погрешность методики складывается из систематической и случайной составляющих. Систематическая составляющая основной погрешности зависит от вида удельного электрического заряда и от скорости движения частиц реагента. Она обусловлена потерями частиц (их коагуляцией и осаждением) во время возгонки в облачной камере. При обычной продолжительности возгонки 1 мин суммарные потери частиц

с начальной концентрацией менее 10^8 см⁻³ и размерами менее $2 \cdot 10^{-5}$ см по экспериментальной оценке не превышают 5 %.

Случайная составляющая основной погрешности складывается из погрешности определения исходной массы переводимого в аэрозоль реагента и погрешности определения скорости потока продуктов возгонки.

Суммарная погрешность составляет ± 10 %. Таким образом, оседание частиц реагента на пластины конденсатора не оказывает существенного влияния на удельный выход реагента.

Выводы

Проведены лабораторные эксперименты по исследованию влияния напряженности электрического поля плоского конденсатора на удельный электрический заряд частиц оксида цинка. Для проведения экспериментов разработан комплекс аппаратуры и методика, которые показали, что абсолютное значение заряда на отрицательно заряженных частицах больше, чем на положительно заряженных.

При напряженности электрического поля 480 В/см происходит переход приобретенного заряда от отрицательного к положительному. При этом наблюдается раздвоение потока частиц оксида цинка на отрицательно и положительно заряженные пластины конденсатора. По-видимому, данные процессы связаны с особенностями образования положительного и отрицательного зарядов на частицах реагента и требуют дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вольхин И.Л. (2012) Физическая электроника: учеб.-метод. пособие / сост.: И.Л. Вольхин, А.С. Ажеганов — Пермь. Перм. гос. нац. иссл. ун-т. 194 с.

Грабовский Р.И. (1974). Курс физики. Учеб. пособие для с/х ин-тов. Изд. 4-е, перераб. и доп. — М.: Высш. школа. 552 с.

Гузеева Т.И. (2010) Основы ядерной физики, радиохимии и дозиметрии: курс лекций. <https://portal.tpu.ru/SHARED/g/GUZEEVA/rabota1/Tab1/lek5-9.doc>

Калов Р.Х. (2001). Исследование влияния электрических зарядов и электрических полей на эффективность льдообразующих реагентов: диссертация ... кандидата физико-математических наук: 25.00.30. Нальчик. 128 с.: ил. РГБ ОД, 61 02-1/421-4.

Красногорская Н.В., Неизвестный А.И. (1973). Экспериментальное исследование эффективности столкновения и слияния заряженных капель равных размеров // Изв. АН СССР. ФАО. Т. 9. № 4. С. 399–410.

Левин Л.М., Седунов Ю.С. (1967). Гравитационная коагуляция заряженных облачных капель в турбулентной среде // Труды ИПГ. Вып. 9. С. 3–16.

Синькевич А. А., Довгалюк Ю. А., Степаненко В. Д. (2008) Результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния коронного разряда на электризацию частиц и фазовые переходы воды в облаках (обзор работ ГГО). 50 лет отделу физики облаков ГГО / Сборник избранных статей ГГО. Вопросы физики облаков. — СПб: Астерион, С. 316–334.

Танахсанов В.О., Хучунаев Б.М., Тлисов М.И., Хучунаев А.Б., Куповых Г.В. (2014). Предварительные результаты исследования конденсационных и льдообразующих свойств нанотрубок AgI и оксида цинка // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. № 6 (184). С. 40–43.

Хучунаев Б.М., Геккиева С.О., Будаев А.Х. (2021) Лабораторные исследования влияния напряженности электрического поля на удельный заряд на частицах реагента, образующихся при возгонке пиротехнических составов // Наука. Инновации. Технологии. № 4. С. 209–226.

Хучунаев Б.М., Куповых Г.В., Ташилова А.А., Теунова Н.В., Хучунаев А.Б., Будаев А.Х. (2018) Исследование льдообразующих свойств нанотрубок оксида цинка // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. № 4 (200). С. 111–115.

Хучунаев Б.М., Степанова С.И., Хучунаев А.Б., Панаэтов В.П. (2011). Исследование льдообразующих свойств кристаллогидратов и нанотрубок оксида цинка / Докл. Всерос. конф. по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы — Нальчик. С. 396–402.

Шаповалов В. А. (2018). Численное моделирование формирования градин в облаках при естественном развитии и активном воздействии кристаллизующим реагентом // Наука. Инновации. Технологии. № 3. С. 227–239.

Shapovalov V.A., Shapovalov A.V., Sherieva M.A. (2020). Three-dimensional mathematical model of a convective cloud with detailed account for the thermodynamic, microphysical and electric processes. 8th All-Russian Conference on Atmospheric Electricity Nalchik, 23-27 сентября 2019. J. of Phys. Conf. Ser. 8. «VIII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity». 2020. 1604. 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/1604/1/012013.

Чалмерс Дж. (1974) Атмосферное электричество. Пер. с англ. — Л.: Гидрометеоиздат. 421 с.

Balkarova S. B., Sozaeva L. T., Gekkieva S. O. (2019) The influence of the electric field on the crystallization of water droplets in the air flow. International Scientific Conference on Construction and Architecture: Theory and Practice for the Innovation Development 2019, CATPID 2019, Kislovodsk, 01-05 октября 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 698 044021. DOI: 10.1088/1757-899X/698/4/044021.

Saunders C. P. R., Bax-Norman H., Emersic C., Avila E. E., Castellano N. E. (2006). Laboratory studies of the effect of cloud conditions on graupel/crystal charge transfer in thunderstorm electrification. Quart 1 // J. Roy. Meteor. Soc. V. 132. P. 2653–2673.

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ПУНКТОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ В СТАВРОПОЛЬСКОЙ ПРОТИВОГРАДОВОЙ СЛУЖБЕ

С. Л. Алута, Ж. Ю. Аннаева, В. А. Шановалов

Высокогорный геофизический институт
360030 Нальчик, пр. Ленина, 2

High-Mountain Geophysical Institute
360030 Nalchik, Lenin Ave., 2

E-mail: conkordya@mail.ru

Поступила в редакцию 27.10.2023
Поступила после доработки 22.11.2023

Введение

Анализ пропусков градобитий в противоградовых службах, использующих ракетную технологию, представленный в работе А. М. Абшаева с соавторами (2014), показал, что причины, приводящие к пропуску града, можно разделить на четыре группы. К первой группе относятся причины, обусловленные техническим несовершенством применяемых средств активных воздействий: недостаточная скорострельность используемых пусковых установок, невозможность внесения в выбранный облачный слой нужного количества реагента (недостаточный коэффициент использования трассы засева противоградовой ракеты), рассеивание противоградовых ракет, приводящее к выходу трассы засева за пределы требуемой площадки засева. Ко второй группе относятся причины, вызванные ошибками персонала при проведении активного воздействия, наиболее характерными из которых являются: позднее начало воздействия, ошибки в выборе площадок засева, недозасевы и т. п. Третью группу составляют причины, обусловленные ошибками

в организации противоградовых работ: отсутствие своевременного согласования проведения противоградовых работ с авиационными службами, отсутствие надежной связи между командным пунктом и пунктами воздействия (ПВ), недостаточное количество противоградовых ракет на ПВ, отказы в работе пусковых установок и/или ракет и т. д. И, наконец, четвертую группу составляют причины, обусловленные недостатками в схеме пространственного размещения ПВ, а именно: наличие больших непростреливаемых участков на защищаемой территории, отсутствие зон предзащиты на наиболее опасных направлениях, недостаточная плотность ПВ, наличие у отдельных ПВ больших запретных секторов. Под большими непростреливаемыми участками понимаются «монолитные» непростреливаемые участки, на которых ПВ отсутствуют. Они обычно возникают на стыке противоградовых отрядов и/или служб. При недостаточной плотности ПВ также возникает множество мелких непростреливаемых участков. Решить эту проблему может только размещение дополнительных ПВ. Наличие запретных секторов исключает пуски ракет в определенных направлениях с определенных ПВ из-за наличия объектов, над которыми запрещен пролет ракет. При необходимости размещение дополнительного пункта воздействия может закрыть конкретный запретный сектор у конкретного ПВ.

В настоящей статье рассматриваются экономические аспекты применения мобильных пунктов воздействия (МПВ) на градовые процессы в Ставропольской противоградской службе в части сопоставления затрат на их развертывание с ущербом от градобитий, возникшим из-за нерационального размещения стационарных ПВ (Алита, 2021). В годовых отчетах всех противоградовых служб указываются причины пропуска града, устанавливаемые в каждом конкретном случае по результатам внутреннего расследования или, в случае крупных градобитий, расследования с привлечением специалистов Высокогорного геофизического института (ВГИ). В данной работе учитывались случаи пропусков града, в отношении которых комиссией были сделаны соответствующие выводы.

Применение МПВ призвано, в первую очередь, ликвидировать либо купировать причины пропусков градобитий четвертой группы,

связанные с недостатками схемы размещения ПВ. Целью данного исследования является оценка рентабельного количества и периода окупаемости затрат на приобретение и эксплуатацию МПВ в Ставропольской противоградовой службе.

Материалы и методика исследований

В процессе исследования были проанализированы причины пропусков града и величине среднегодового ущерба от градобитий, содержащиеся в ежегодных отчетах Ставропольской противоградовой службы за период с 2010 по 2023 г., а также сведения об экономической эффективности противоградовой защиты из статьи (Лиев и др., 2022). Результаты представлены в таблице 1, в первом столбце которой перечислены причины пропуска града, связанные с недостатками в схеме размещения ПВ на защищаемой территории, во втором — количество пропусков града за рассматриваемый период, обусловленных одной из перечисленных причин, в третьем — процент, который это количество составляет от общего числа случаев пропусков града, в четвертом — рассчитанная по формуле величина суммарного ущерба, вызванного конкретной причиной за рассматриваемый период:

$$y_i = \frac{P}{100} \cdot U_{\text{сум}}, \quad (1)$$

где y_i — величина ущерба от i -й причины пропуска града, руб.; P — процент, который составляет число пропусков по данной причине от общего числа пропусков града; $U_{\text{сум}}$ — суммарный ущерб от пропусков града по всем причинам, руб.

Общее число пропусков града в пяти районах Ставропольского края с противоградовой защитой за период 2010–2023 гг. равно 60, их суммарный ущерб оценен в 734 696 594 руб.

Таблица 1

**Пропуски града, вызванные недостатками в схеме размещения пунктов
воздействия в Ставропольской противоградовой службе
за период с 2010 по 2023 г.**

Причина пропуска града	Количество пропусков		Ущерб, руб.
	шт.	%	
Наличие запретных секторов	10	17	124 898 421
Отсутствие зоны предзащиты	17	28	205 715 046
Малая плотность ПВ	3	5	36 734 830

Как видно из таблицы 1, на долю пропусков града, связанных с распределением ПВ по защищаемой территории в Ставропольской противоградовой службе, приходится 50 % от всех случаев градобитий (30 случаев из 60).

Данные о территориальном распределении причин пропусков града по административным районам Ставропольского края, приведены в таблице 2 по отчетам противоградовой службы.

Таблица 2

**Распределение причин пропусков града по административным районам
Ставропольского края, в которых проводится градозащита**

Административный район	Причина пропуска		
	Наличие запретных секторов	Отсутствие зоны предзащиты	Малая плотность пунктов воздействия
Андроповский	3	3	–
Кировский	2	2	1
Кочубеевский	2	9	2
Предгорный	3	3	–
Шпаковский	–	–	–

Проблема, связанная с наличием большого количества запретных секторов, практически в равной степени характерна для Андроповского, Кировского, Кочубеевского и Предгорного районов

Ставропольского края. Отсутствие зоны предзащиты и малая плотность расположения ПВ наиболее значимы для Кочубеевского района.

Методика, по которой оценивалась схема размещения ПВ в Ставропольской противораковой службе, описана в статье (Алита, Борисова, 2020). Данная методика основана на сопоставлении распределения среднегодового расхода ракет на ПВ за последние 10 лет и схемы размещения ПВ с распределением частоты выпадения града по защищаемой территории за тот же период времени. Схема размещения ПВ в Ставропольской противораковой службе приведена на рисунке 1.

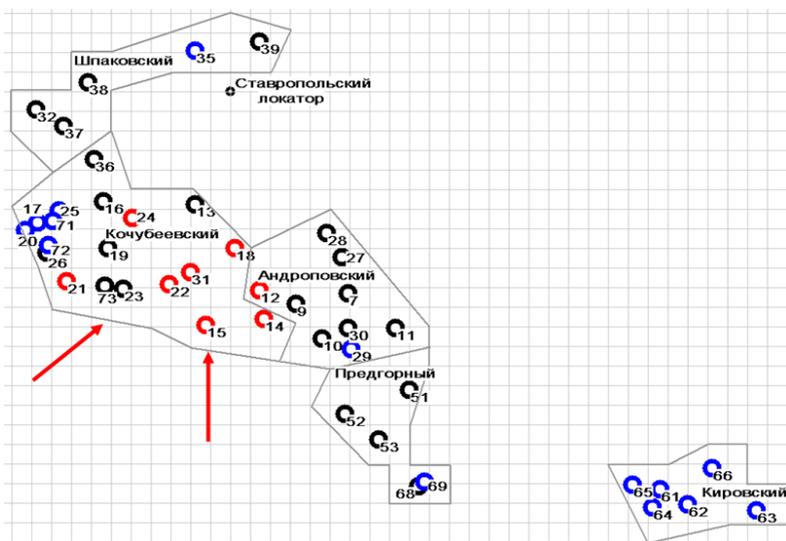


Рис. 1. Распределение пунктов воздействия по административным районам Ставропольского края

Пункты воздействия, работающие с перегрузкой, т. е. имеющие среднегодовой расход ракет более 130 шт., обозначены красным, пункты с годовым расходом ракет в пределах стандартного отклонения от средней величины (100 ± 30) — черным, пункты

со среднегодовым расходом менее 70 ракет — синим цветом. Необходимость размещения нескольких МПВ именно в центральной и восточной частях Кочубеевского района была отмечена в выводах к статье (Алита, Борисова, 2020). Высокая нагрузка на уже существующие в данном районе ПВ в сочетании с низкой плотностью их расположения (рис. 1) и наибольшей частотой выпадения града (табл. 2) свидетельствуют о том, что наиболее вероятным решением данной проблемы является размещение дополнительных МПВ для увеличения плотности расположения пунктов воздействия.

Наряду с этим, в Кочубеевском районе отмечается наибольшая частота градобитий, связанных с отсутствием зоны предзащиты. Как правило, уже сформировавшиеся градовые ячейки входят на защищаемую территорию Кочубеевского района с юга и юго-запада (направление их движения показано на рисунке 1 красными стрелками), поэтому некоторое количество МПВ следует разместить на южных подступах к данной территории, обеспечив тем самым необходимую зону предварительной обработки.

На всей защищаемой территории ПВ должны располагаться в соответствии с требованиями, изложенными в работе (Абшаев и др., 2014), с двойным перекрытием. На практике исходя из финансовых возможностей такую плотность ПВ по всей территории защиты обеспечить невозможно. К достижению нужного показателя следует стремиться только в тех местах, где плотность расположения ПВ не соответствует существующей градовой активности. На выявление таких мест и направлена методика оценки схемы размещения ПВ, описанная в работах (Алита, Борисова, 2020, 2021, 2023) и лежащая в основе разрабатываемой методики применения МВП.

Количество МПВ, которое может быть развернуто Ставропольской противорадовой службой, оценивается по неравенству:

$$N_{\text{МПВ}} < \frac{\bar{Y}}{Z_{\text{МПВ}} + \bar{C}_{\text{ПГР}}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{МПВ}}$ — количество разворачиваемых МПВ; \bar{Y} — среднегодовой ущерб от причин, связанных с нехваткой ПВ и недостатками в схеме их размещения, руб./год; $Z_{\text{МПВ}}$ — затраты на годовое содержание одного МПВ, руб./год; $\bar{C}_{\text{ПГР}}$ — стоимость среднегодового расхода противораковых ракет на одном ПВ, руб./год.

Величину $\bar{C}_{\text{ПГР}}$ можно рассчитать по формуле:

$$\bar{C}_{\text{ПГР}} = \bar{n} \cdot c_{\text{ПГР}}, \quad (3)$$

где \bar{n} — среднегодовой расход ракет на одном ПВ; $c_{\text{ПГР}}$ — стоимость одной противораковой ракеты.

Продолжительность периода, в течение которого величина предотвращенного ущерба превысит затраты на разворачивание дополнительного количества МПВ, можно оценить при помощи соотношения:

$$T = \frac{N_{\text{МПВ}} \cdot C_{\text{МПВ}}}{\bar{Y} - N_{\text{МПВ}} \cdot (Z_{\text{МПВ}} + \bar{C}_{\text{ПГР}})}, \quad (4)$$

где T — продолжительность срока окупаемости, год; $C_{\text{МПВ}}$ — стоимость разворачивания одного МПВ, руб.

Результаты исследований

Согласно данным таблицы 1, оценочную величину среднегодового ущерба от градобитий, вызванного недостатками в схеме расположения ПВ в Ставропольской противораковой службе, можно рассчитать по формуле:

$$\bar{Y} = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{M}, \quad (5)$$

где y_1, y_2, y_3 — суммарные величины ущербов от наличия запретных секторов, отсутствия зон предзащиты, недостаточной плотности расположения ПВ соответственно (см. четвертый столбец табл. 1);

M — число лет в рассматриваемом периоде ($M = 14$). Таким образом, величина среднегодового ущерба по причинам, связанным с недостатками в схеме расположения ПВ в Ставропольской противорадовой службе, составляет $\bar{Y} = 26\,239\,164$ руб./год.

По данным противорадовых служб, в ценах на 2023 г. стоимость разворачивания одного стационарного ПВ в зависимости от региона составляла от 3 до 5 млн руб. В первом приближении можно считать, что стоимость создания одного МПВ будет находиться примерно в этих же пределах. Поскольку при разворачивании МПВ не требуется производить работы по строительству капитального ограждения, а также заливке площадок под пусковые установки и склад, примем эту стоимость равной нижнему пределу: $C_{МПВ} = 3$ млн руб.

Стоимость одной противорадовой ракеты в 2023 г. составляла 27 000 руб. для «Алазань-9» и 30 840 руб. для «Алазань-6». Исходя из того, что при проведении активных воздействий ракеты этих типов расходуются примерно в пропорции 1:1, примем оценочную стоимость одной ракеты равной средней величине $\sim 28\,920$ руб. По данным, представленным в статье (Алита, Борисова, 2020), среднегодовой расход ракет на одном ПВ Ставропольской службы составил ~ 100 ракет, следовательно среднегодовые затраты на закупку ракет для одного МПВ составят: $\bar{C}_{ПГР} = 2\,892\,000$ руб./год.

В таблице 3 представлены данные по затратам на содержание одного ПВ в течение одного года в ценах на 2023 г. В случае с МПВ все статьи расходов будут аналогичными, исключения составляют только статьи расходов на горюче-смазочные материалы (ГСМ) (строка № 9) и электроснабжение (строка № 11). Стационарное электроснабжение для МПВ не предусматривается, так как каждый из них должен быть снабжен автономным электрогенератором. Для стационарного ПВ электрогенератор входит в его состав для обеспечения аварийного питания.

В связи с этим в первом приближении примем, что расходы на электроснабжение обнуляются, а к расходам на ГСМ добавится сумма, входившая ранее в расходы на электроснабжение. Это приведет к тому, что суммарные расходы на ГСМ для МПВ составят

~ 141 290 рублей в год, а общие расходы на содержание одного МПВ в течение года будут аналогичными расходам на содержание стационарного ПВ. Таким образом, затраты на годовое содержание одного МПВ составят: $Z_{МПВ} = 1\ 696\ 733$ руб./год.

Таблица 3

Затраты на содержание пункта воздействия в течение одного года

№	Статья расходов	Сумма, руб.
1	Фонд оплаты труда	1 087 763
2	Начисления на фонд оплаты труда	328 505
3	Полевые	45 811
4	Медицинское освидетельствование	18 400
5	Средства индивидуальной защиты	4 960
6	Мягкий инвентарь	4 933
7	Моющие средства	4 200
8	Электротехнические материалы	18 950
9	Горюче-смазочные материалы для резервного генератора	80 510
10	Хозяйственные товары и материалы	20 000
11	Электроснабжение	60 780
12	Баллонное газоснабжение	7 800
13	Вода питьевая бутилированная	3 120
14	Текущий ремонт имущества	10 000
15	Ремонт и перезарядка огнетушителей	1 000
	ИТОГО	1 696 733

Подставляя значения для \bar{Y} и $Z_{МПВ}$ в формулу (2), получим количество МПВ, которое теоретически может позволить себе развернуть Ставропольская противопожарная служба: $N_{МПВ} \leq 5$.

Срок, в течение которого величина предотвращенного ущерба превысит затраты на разворачивание данного количества МПВ, при $N_{МПВ} = 5$, рассчитанный по формуле (4), составит $T = 4,6$ года.

Заключение

В результате проведенного анализа было установлено, что в Ставропольской противорадовой службе целесообразно развернуть 5 МПВ. Места возможной дислокации МПВ должны находиться в Кочубеевском районе и на южных подступах к нему. Развертывание МПВ позволит увеличить степень перекрытия зон обстрела ПВ в проблемной части Кочубеевского района, более равномерно распределить расход противорадовых ракет между ПВ, а также обеспечить зону предварительной обработки на самом градоопасном направлении.

По проведенной оценке период, по истечении которого величина предотвращенного ущерба сможет превысить затраты на развертывание пяти МПВ, включая затраты на их закупку, приобретение дополнительных ракет и текущие расходы по содержанию МПВ, составит $\sim 4,6$ года.

При существующем уровне затрат на проведение противорадовой защиты и текущем уровне ущерба от градобитий, связанных с недостатками в схеме размещения ПВ, развертывание большего числа МПВ в Ставропольской противорадовой службе представляется нецелесообразным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абшаев А. М., Абшаев М. Т., Барекова М. В., Малкарова А. М. (2014). Руководство по организации и проведению противорадовых работ. — Нальчик: Печатный двор. 508 с.

Алиа С. Л. (2021). Перспективы создания мобильных пунктов воздействия на градовые процессы / Сборник трудов Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на метеорологические процессы. Нальчик. С. 371–375.

Алита С. Л., Борисова Н. А. (2020). Разработка концепции расположения мобильных пунктов воздействия на градовые процессы // Труды ГГО. Вып. 599. С. 151–161.

Алита С. Л., Борисова Н. А. (2021). Анализ схемы расположения пунктов воздействия в Краснодарской противорадовой службе // Труды ГГО. Вып. 602. С. 116–123.

Алита С. Л., Борисова Н. А. (2023). Анализ схемы расположения пунктов воздействия в Крымской противорадовой службе // Труды ГГО. Вып. 608. С. 145–148.

Лиев К. Б., Долова М. Л., Куцев С. А. (2022). Экономическая эффективность противорадовой защиты Ставропольской военизированной службы / Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Шаг в науку». С. 151–154.

О ВОЗМОЖНОМ СПОСОБЕ ПРИМЕНЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ПУНКТОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГРАДОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В КРАСНОДАРСКОЙ ПРОТИВОГРАДОВОЙ СЛУЖБЕ

С. Л. Алита, К. Б. Луев

Высокогорный геофизический институт
360030 Нальчик, пр. Ленина, 2

High-Mountain Geophysical Institute
360030 Nalchik, Lenin Ave., 2

E-mail: alitasergei@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.10.2023
Поступила после доработки 24.11.2023

Введение

В результате анализа пропусков градобитий в Краснодарской противогородовой службе за последние несколько лет были выявлены недостатки в организации и проведении работ по защите территорий от града. Из всех выявленных недостатков системный характер носят недостатки, связанные со схемой размещения пунктов воздействия по защищаемой территории, так как случаи пропусков градобитий по этой причине повторяются из года в год.

Анализа схемы размещения пунктов воздействия по защищаемой территории в Краснодарской противогородовой службе был представлен в работе С. Л. Алиты и Н. А. Борисовой (2021). Авторы рекомендовали провести работы по ликвидации обширной непростреливаемой области, расположенной между Краснодарским краем (Лабинский отряд) и Республикой Адыгея (Западный отряд), а также организовать предзащиту от градобитий при вторжении на защищаемую территорию уже сформированных градовых облаков,

воздействие на которые требовало прерывания уже выпадающего града.

Задача настоящей работы — разработка варианта улучшения схемы размещения пунктов воздействия в Краснодарской противорадовой службе за счет применения нескольких мобильных пунктов воздействия (Алита, 2021).

Методика и материалы исследований

Методика применения мобильных пунктов воздействия, в дополнение к уже сформированной системе стационарных пунктов, построена на периодическом выявлении ее уязвимых мест и передислокацию в них мобильных пунктов (Алита, Борисова, 2020). Схема совместного размещения стационарных и мобильных пунктов воздействия предполагает, что вокруг сети стационарных пунктов воздействия размещается некоторое количество мобильных, места расположения которых могут меняться с течением времени в зависимости от внешних факторов, таких как: сезонные изменения направлений наиболее вероятного вторжения градовых облаков на защищаемую территорию, изменение границ культивируемых территорий, использование противорадовых ракет с другими баллистическими характеристиками и т. д.

Для исследования были выбраны случаи пропуска градобитий, имевшие место в 2022–2023 гг. -

Случай пропуска градобития имел место 28 апреля 2023 г., когда в 17 ч 12 мин в районе станицы Абадзехская было замечено развитие градовой ячейки. Воздействие на нее было невозможно поскольку по ходу движения облака не было пунктов воздействия. Пока ячейка находилась вне досягаемости для воздействия, она развилась до максимальной четвертой категории градоопасности. Воздействие, в процессе которого было израсходовано 127 противорадовых ракет, выполнялось с 17:46 до 18:59. Несмотря на произведенное воздействие из ячейки выпадал град размером 2 см³. Траектория перемещения ячейки по данным автоматизированной системы управления «МЕРКОМ» изображена на рис. 1.

достижимости противораковых ракет. В тот день были повреждены сельскохозяйственные культуры на площади 2145 га.

Аналогичный случай имел место 24 мая 2023 г. В 17:39 на границе защищаемой территории, примерно в том же месте, что и в первом рассмотренном случае, была обнаружена градовая ячейка. Развитие данной ячейки до четвертой категории градоопасности происходило на непростреливаемом участке между Краснодарским краем и Республикой Адыгея. К моменту выхода ячейки на защищаемую территорию из нее уже выпадал град. Средний объем градин достигал 3, а максимальный — 5 см³. В Майкопском районе сельскохозяйственные культуры были повреждены на территории 730 га. Траектория движения ячейки, перемещавшейся практически строго с юга на север, показана на рис. 2. Красным цветом обозначены последовательные положения зоны максимальной отражаемости ячейки, которая на максимуме развития составляла 66 dBZ. Траектория движения ячейки показана на фоне расположения пунктов воздействия. Из рисунка четко видно, что развитие ячейки до максимальных показателей происходило в непростреливаемой области между двумя отрядами, что исключило возможность ее своевременной обработки.

1 июня 2021 г. в 17:11 над территорией Карачаево-Черкесской республики, в которой на тот момент времени противораковые работы не проводились из-за отсутствия финансирования, было зафиксировано развитие сверхмощного градового облака, которое быстро достигло четвертой категории градоопасности. Радиолокационная отражаемость этой ячейки, в стадии максимального развития достигла 71 dBZ, высота верхней границы по изолинии 45 dBZ составила 11,8 км. Воздействие на данное облако продолжалось с 17:45 до 18:11. Несмотря на принятые меры воздействия, предотвратить выпадение града не удалось из-за недозасева облака, обусловленного невозможностью обработки его правого фланга со стороны Карачаево-Черкесии.

Площадь градобития в тот день составила около 1000 га.

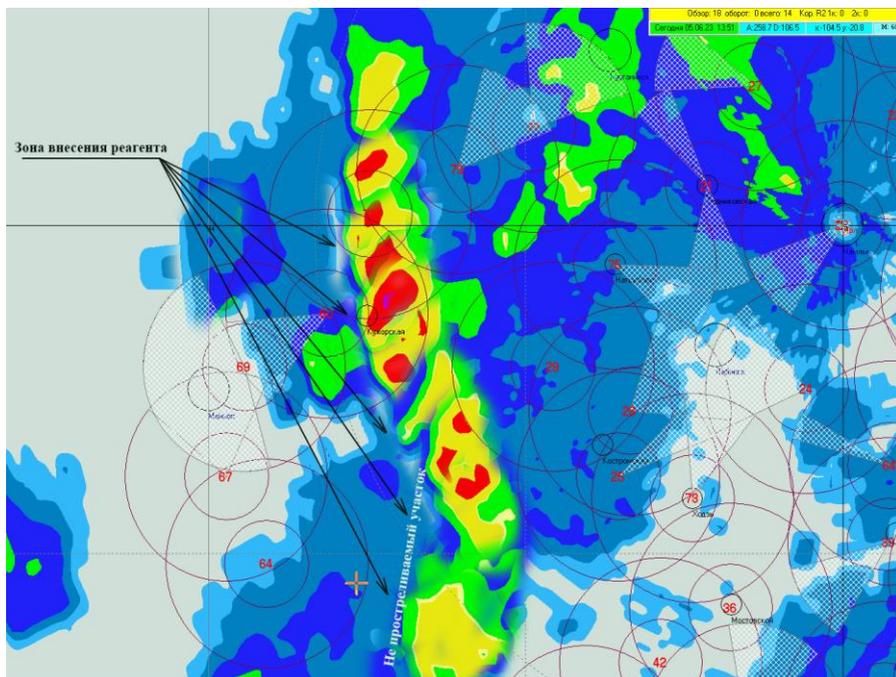


Рис. 2. Траектория перемещения ячейки 24.05.2023

21 апреля 2022 г. имела место схожая ситуация, когда зарождение ячейки происходило вне зоны обстрела, что исключало возможность прерывания развития градового облака на ранних стадиях (рис. 3).

Как видно из рисунка, зарождение ячейки произошло на юго-юго-западе от ближайшего пункта воздействия вне зоны обстрела. Далее ячейка стала перемещаться на северо-восток и быстро развилась до градового состояния. Ее максимальная отражаемость составила 70 dBZ, а высота верхней границы по изолинии 45 dBZ составила 8,1 км, что соответствовало 3 категории развития. Сельскохозяйственные культуры в тот день были частично повреждены на площади около 1600 га.

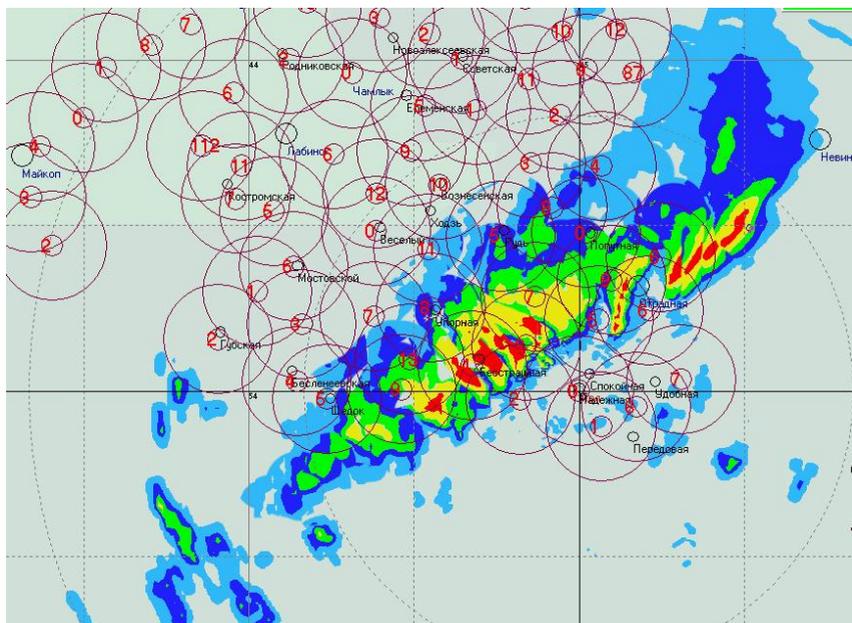


Рис. 3. Траектория перемещения ячейки 21.04.2021 с момента ее зарождения до диссипации

Результаты исследований

Описанные выше случаи пропуска града в Краснодарской противогорадовой службе являются весьма типичными и отражают тенденцию, наиболее четко проявившуюся в последние 5–10 лет. Она состоит в том, что одной из основных причин пропусков града является невозможность своевременной обработки градовых облаков на ранних стадиях развития по причине их формирования вне зоны обстрела пунктов воздействия. Основными направлениями вторжения на защищаемую территорию Краснодарской службы уже сформированных градовых облаков, дающих град, являются юго-западное и южное направления. По всей видимости, смещение мест зарождения и изменение траекторий движения конвективных ячеек связаны с общими погодными изменениями, наблюдаемыми в регионе

в последнее время. Ситуация усугубляется еще и тем, что именно на юго-западе защищаемой территории между Западным и Лабинским отрядами находится обширная непростреливаемая зона. В этой связи, вполне логичным решением является разворачивание дополнительных пунктов воздействия между Западным и Лабинским отрядами и организация предзащиты с южного направления. Для этих целей лучше всего использовать мобильные пункты воздействия так как их развертывание не требует дополнительных капитальных затрат на строительство жилых помещений, складов, бетонирование площадок под пусковые установки и возведение ограды. Кроме того, при необходимости, их быстро можно передислоцировать в любое другое место (Алита, 2021). В сезоны, когда по каким-либо причинам, в Карачаево-Черкесии не будет проводиться противорадиационная защита, несколько мобильных пунктов можно будет выдвигать на ее территорию для организации предзащиты с этого направления. В сезоны, когда в Карачаево-Черкесии защита будет проводиться, мобильные пункты можно будет перебросить на юг или юго-запад, усилив тем самым предзащиту на этих направлениях. Области возможного размещения мобильных пунктов воздействия показаны на рисунке 4. Красным цветом обозначена внешняя граница суммарной области обстрела всех ныне существующих стационарных пунктов воздействия. Внутри этой области реагент может быть внесен в любое место облачной среды за время необходимое на выполнение команды по запуску одной тройки ракет, что в среднем составляет порядка одной минуты. Желтым цветом отмечена внешняя граница области обстрела мобильных пунктов воздействия, которые предлагается развернуть дополнительно.

Дополнительная область обстрела разделена на три зоны.

Зона 1 располагается в ранее непростреливаемой области между Западным и Лабинским отрядами, в ней достаточно развернуть 3 мобильных пункта воздействия, которые позволят исключить развитие ситуации по типу воздействий 28.04.2023 и 24.05.2023 (рис. 1 и рис. 2).

Зона 2 располагается перед южной границей защищаемой территории, в ней планируется разместить 4 мобильных пункта

воздействия, наличие которых предотвратит в будущем развитие ситуации по типу воздействия 21.04.2021 (рис. 3).

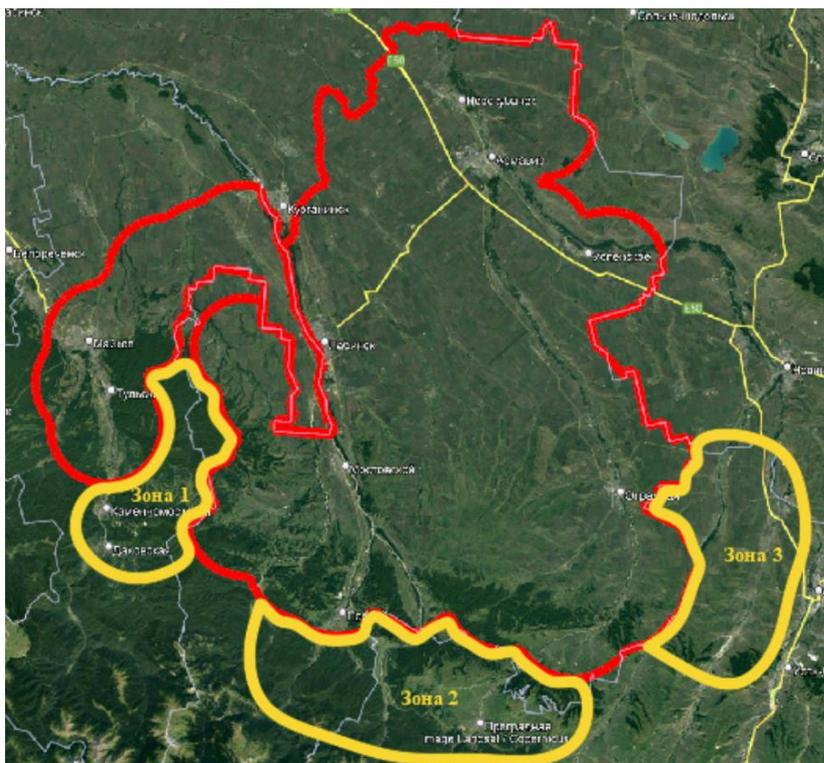


Рис. 4. Возможные зоны размещения мобильных пунктов воздействия

Зона 3 должна быть расположена со стороны Карачаево-Черкесской Республики, в ней планируется разместить 3 мобильных пункта воздействия для исключения развития ситуации по типу воздействия 01.06.2021. В сезоны, когда противопожарные работы в Карачаево-Черкесии будут проводиться в полном объеме, мобильные пункты воздействия из зоны 3 могут быть переброшены в зоны 1 и 2 для усиления предзащиты с этих направлений.

Заключение

В результате анализа наиболее крупных пропусков градобитий в Краснодарской противоградовой службе за последние 5 лет были сделаны следующие выводы.

Для исключения в будущем ситуаций, при которых градовые облака вторгаются на защищаемую территорию, уже давая град, необходимо разместить дополнительно 10 пунктов воздействия: 3 в зоне 1, 4 в зоне 2, 3 в зоне 3.

Для уменьшения капитальных затрат на строительные работы целесообразно использовать для этих целей мобильные пункты воздействия, разработка которых ведется в настоящее время.

Использование мобильных пунктов воздействия позволит более гибко реагировать на изменяющуюся обстановку. Так, например, при проведении противоградовой защиты в Карачаево-Черкесской республике мобильные пункты воздействия из зоны 3 могут быть переброшены в зоны 1 и 2 или в любое другое место, где назреет необходимость в локальном усилении защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алита С. Л., Борисова Н. А. (2021). Анализ схемы расположения пунктов оздействия в Краснодарской противоградовой службе // Труды ГГО. Вып. 602. С. 116 – 123.

Алита С. Л. (2021). Перспективы создания мобильных пунктов воздействия на градовые процессы // Сборник трудов Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на метеорологические процессы, Нальчик, С. 371 – 375.

Алита С. Л., Борисова Н. А. (2020). Разработка концепции расположения мобильных пунктов воздействия на градовые процессы // Труды ГГО. Вып. 599. С. 151 – 161.

Абшаев А. М., Абшаев М. Т., Барекова М. В., Малкарова А. М. (2014). Руководство по организации и проведению противоградовых работ. – Нальчик: – Печатный двор. 508 с.

УДК 551.582

Климатическое районирование Новосибирской области.

Пигольцина Г. Б., Задворных В. А., Фасолько Д. В. Труды ГГО. 2023. Вып. 610. С. 8–24.

Выполнено климатическое районирование Новосибирской области на основе оценки пространственной изменчивости комплекса климатических показателей с учетом данных метеорологических наблюдений последних лет. Выделено 13 районов, для каждого из которых определен широкий спектр базовых и специализированных климатических показателей, который позволит пользователям климатической информации принимать обоснованные хозяйственные решения дифференцированные по отдельным районам области.

Ключевые слова: климатическое районирование, специализированные климатические показатели, изменчивость микроклиматическая

Ил. 3. Табл. 4. Библ. 11.

Моделирование влияния региональных климатических воздействий на фактическое испарение Европейской территории России.

Надёжина Е. Д., Школьник И. М., Стернзат А. В., Пикалева А. А. Труды ГГО. 2023. Вып. 610. С. 25–47.

Соотношение между фактическим испарением и видимым потенциальным испарением («дополнительное» соотношение) широко используется для оценок фактических значений эвапотранспирации. На основе данных стандартных метеорологических наблюдений получены обобщенные оценки этого соотношения для случая неоднородно увлажненной подстилающей поверхности суши. Оценки выполнены с использованием данных о фактическом испарении, рассчитанных с помощью модели атмосферного пограничного слоя (МАПС). В качестве входных параметров МАПС использованы климатические характеристики в узлах регулярной сетки региональной климатической модели ГГО. Показана зависимость оценки указанного соотношения от масштаба пространственного и временного осреднения расчетных данных. Анализируются региональные различия в расчетах «дополнительного» соотношения для зоны тайги и для зоны степей. Получены оценки пространственных распределений фактического испарения с использованием разных подходов к расчету «дополнительного» соотношения.

Ключевые слова: «дополнительное» соотношение, испарение, эвапотранспирация, модельные расчеты

Ил. 7. Библ. 29.

Об использовании устройств на основе малобюджетных датчиков для измерения концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Загайнова М. С., Иванченко К. В., Чичерин С. С., Челибанов В. П., Яновский И. С. Труды ГГО. 2023. Вып. 610. С. 48–76.

Рассмотрен мировой и российский опыт эксплуатации малобюджетных датчиков. Известные в настоящее время попытки в разных странах мира, включая Российскую Федерацию, обосновать возможность применения датчиков взамен референтных средств измерений (или доказательства их эквивалентности) в области регуляторного мониторинга загрязнения атмосферного воздуха не имели положительных результатов. Однако датчики способны обеспечить решение ряда специальных и вспомогательных задач вне сферы государственного мониторинга атмосферного воздуха, в том числе в составе высокоплотных сигнальных сетей.

Ключевые слова: малобюджетные датчики, загрязнение атмосферы, станция контроля, методы измерений, загрязняющие вещества, качество атмосферного воздуха, калибровка.

Библ. 13.

УДК 551.510.42

Эффективные схемы расчета максимальных разовых концентраций при нестационарности и асинхронности выбросов источников и с учетом движущихся источников. Зив А. Д. Труды ГГО. 2023. Вып. 610. С. 77–101.

В рамках методологии расчета максимальных разовых концентраций (20 минутное осреднение), используемой в России, нет возможности напрямую учитывать, временную изменчивость выбросов, их асинхронность и изменение их положения в пространстве. Включение таких источников в общий расчет сводится к поиску их конфигурации, которая соответствует наибольшей суммарной концентрации. В статье рассматриваются способы решения этой задачи, которые позволяют избежать прямого перебора конфигураций, что существенно сокращает время счета. Значительное внимание, в частности, уделено вычислению максимальных концентраций при движении нескольких источников, например, кораблей в акватории порта.

Ключевые слова: максимальные концентрации, нестационарные источники, движущиеся источники.

Ил. 2. Библ. 13.

УДК 551.510.41

Возможные изменения общего содержания озона и других параметров стратосферы Антарктиды по данным модели SOCOL v4. Иманова А. С., Смышляев С.П., Розанов Е. В., Фролькис В.А. Труды ГГО. 2023. Вып. 610. С. 102–112.

Проведен анализ поведения общего содержания озона и других параметров стратосферы для Антарктического региона с 2015 по 2099 гг. на основе данных модели SOCOLv4 с использованием умеренного сценария выбросов парниковых газов (SSP 2-4.5). Рассмотрены: общее содержание озона, температура, скорость зонального ветра, содержание хлорных и бромных компонентов. Показано, содержание озона в Антарктическом регионе в будущем имеет статистически значимый положительный тренд, который обусловлен, главным образом, уменьшением содержания хлорных и бромных компонентов.

Ключевые слова: стратосферный озон, полярный вихрь, Антарктида, численное моделирование, SOCOLv4., изменение климата

УДК 551.510.41

Критерии выборки данных об атмосферном электричестве для полярных регионов в целях автоматизации их обработки и контроля. Зайнетдинов Б. Г. Труды ГГО. 2023. Вып. 610. С. 113–125.

Представлено статистическое обоснование критериев выборки данных о напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы для высокоширотных станций в условиях нормальных часов. Полученные результаты могут быть использованы в целях автоматизации процесса обработки и контроля поступающей информации об атмосферном электричестве.

Ключевые слова: напряженность электрического поля атмосферы, метеорологические явления, обработка информации

Табл. 5. Ил. 3. Библ. 8.

УДК 551.591.1

Новый подход к передаче единицы измерения метеорологической оптической дальности нефелометрам. Зименков П. С. Труды ГГО. 2023. Вып. 609. С. 126–137.

Предложена и обоснована новая концепция поверки нефелометров, включающая устройство для контроля линейности оптической системы излучатель-приемник. Показано, что для передачи единицы измерения от эталонного трансмиссометра эталонному нефелометру можно применять трансмиссометр со сверхмалой измерительной базой, а саму передачу осуществлять в лабораторных условиях, характеризующихся стабильностью и воспроизводимостью результатов, например, в камере туманов. Описана предложенная схема передачи единицы метеорологической оптической дальности рабочим нефелометрам.

Ключевые слова: нефелометр, трансмиссометр, поверочная схема, инфракрасный светофильтр, рассеивающие пластины, коэффициент рассеяния, коэффициент направленного пропускания, камера туманов.

Табл. 1. Ил. 3. Библ. 5

Имитатор рассеянного атмосферным аэрозолем светового потока для тестирования датчиков нефелометрического типа. Стародубов А. Г., Яковлев В. С., Родионов А. А. Труды ГГО. 2023. Вып. 610. С. 138–147.

Приводится описание и результаты апробации имитатора рассеянного атмосферным аэрозолем светового потока для тестирования датчиков нефелометрического типа. Данный имитатор расширяет возможности существующих средств поверки и позволяет контролировать корректность результатов измерений нефелометра во всем диапазоне его измерений.

Ключевые слова: метеорологическая оптическая дальность, МОД, нефелометр, поверка.

Табл. 2. Ил. 3. Библ. 5.

Исследования удельного электрического заряда на частицах оксида цинка. Будаев А. Х. Труды ГГО, 2023. Вып. 610. С. 148–159.

Проведены лабораторные эксперименты по исследованию влияния напряженности электрического поля плоского конденсатора на удельный электрический заряд частиц оксида цинка.

Для проведения экспериментов разработаны комплекс аппаратуры и методика, которые показали, что абсолютное значение заряда на отрицательно заряженных частицах больше, чем на положительно заряженных.

Получено, что при достижении напряженности электрического поля 48 кВ/см происходит переход приобретенного заряда от отрицательного к положительному. Скорее всего, при столкновении частицы с положительно заряженной пластиной пробивается оксидная пленка на ее поверхности, и частица приобретает значительный положительный заряд.

Подсчитаны ошибки, связанные с осаждением частиц реагента на пластины конденсатора при различных значениях поля. Суммарная погрешность составляет $\pm 10\%$. Таким образом, оседание частиц реагента на пластины конденсатора не оказывает существенного влияния на значения удельного выхода реагента.

Ключевые слова: оксид цинка, электрический заряд, напряженность электрического поля, реагент, льдообразующие частицы, удельный выход.

Табл. 1. Ил. 5. Библ. 16.

УДК 551.501.777

Экономические аспекты применения мобильных пунктов воздействия в Ставропольской противорадовой службе. Алита С. Л., Аппаева Ж. Ю., Шаповалов В. А. Труды ГГО. 2023. Вып. 610. С. 160–170.

Исследуется вопрос о рентабельности применения мобильных пунктов воздействия на градовые процессы в Ставропольской противорадовой службе. Определено максимальное количество мобильных пунктов воздействия, которое с экономической точки зрения, целесообразно развернуть для повышения эффективности противорадовых работ. В статье также произведена оценка периода окупаемости мероприятий, связанных с разворачиванием данного количества мобильных пунктов воздействия и определены районы их возможной дислокации.

Ключевые слова: мобильный пункт воздействия, среднегодовой ущерб, защищаемая территория, рентабельность, срок окупаемости.

Ил. 1. Таб. 3. Библ. 6.

УДК 551.501.777

О возможном способе применения мобильных пунктов воздействия на градовые процессы в Краснодарской противорадовой службе. Алита С.Л., Лиев К.Б. Труды ГГО. 2024. Вып.610. С. 171–179.

В статье приводится описание нескольких типичных случаев пропуска града в Краснодарской противорадовой службе за последние несколько лет повлекших значительный ущерб сельскохозяйственным культурам. Во всех этих случаях формирование и развитие градовых облаков происходило за пределами защищаемой территории вне зоны досягаемости противорадовых ракет. Для снижения рисков подобного развития ситуации в будущем в статье предлагается использовать несколько мобильных пунктов воздействия на градовые процессы, располагаемые в местах наиболее частого формирования градовых облаков.

Ключевые слова: градовое облако, схема размещения, мобильный пункт воздействия, активное воздействие, защищаемая территория, противорадовая ракета.

Ил.4. Библ. 4.

Climatic zoning of the Novosibirsk region. Pigoltsina G. B., Zadovnykh V. A., Faselko D. V. Proceedings of the GGO. 2023. V. 610. P.8–24.

Climatic zoning of the Novosibirsk region was carried out based on an assessment of the spatial variability of climatic indices. Meteorological observations data in recent years were taken into account. Thirteen areas have been identified. For each of them, a wide range of basic and tailored climatic indices has been defined. This will allow users of climate information to make informed business decisions, differentiated by individual areas of the region.

Keywords: climatic zoning, tailored climate indices, microclimatic variability

Fig. 3. Tab. 4. Ref. 11.

Modeling of regional climate impacts on actual evaporation over the European part of Russia. Nadyozhina E. D., Shkolnik I. M., Sternzat A. V., Pikaleva A. A. Proceedings of the GGO. 2023. V. 610. P. 25–47.

The relationship between actual evaporation and apparent potential evaporation (the complementary relationship) is widely used to estimate actual evapotranspiration values from standard meteorological observations. The assessment of this relationship has been generalized to the case of a heterogeneously moistened land surface using actual evaporation data calculated using the atmospheric boundary layer model (ABLM). Climatic characteristics in the European part of Russia in the regular grid of the MGO regional climate model are used as an input in ABLM. The dependence of the relationship on the scale of spatial and temporal averaging of the calculated data is shown. Regional differences in the calculations of the complementary relationship performed for the taiga zone and for the steppe zone are analyzed. Estimates of the spatial distributions of actual evaporation are obtained using different approaches to calculating the complementary relationship.

Keywords: complementary relationship, estimation, evaluation, evapotranspiration

Fig. 7. Ref. 29.

The use of devices based on low-cost sensors to measure concentrations of pollutants in the atmospheric air. Zagainova M. S., Ivanchenko K. V., Chicherin S. S., Chelibanov V. P., Yanovsky I. S. Proceedings of the GGO. 2023. V. 612. P. 48–75.

The article examines the world and Russian experience in the operation of low-cost sensors. Currently known attempts in different countries of the world, including the Russian Federation, to justify the possibility of using sensors instead of reference measuring instruments (or proof of their equivalence) in the area of regulatory monitoring of atmospheric air pollution have not had positive results. However, the sensors are capable of solving a number of special and auxiliary tasks outside the area of state monitoring of atmospheric air, including as part of high-density signal networks.

Keywords: low-cost sensors, air pollution, monitoring station, measurement methods, pollutants, air quality, calibration.

Ref. 13

Effective schemes for calculating maximum single concentrations with non-stationary and asynchronous emissions of sources and considering the moving sources. Ziv A. D. Proceedings of the GGO. 2023. V. 610. P. 77–101.

The Russian air pollution regulatory model for short-term concentrations (20 minute averaging) does not handle air pollution sources with non-stationary emissions asynchronous emissions and sources with variable location. However, in practice there are cases when those sources are to be taken into account. Thus, it is needed to find the most unfavorable configuration. Current paper proposes several approaches to avoid the direct search. It is considered in particular the asynchronous movement of the several sources, e.g. of the ships in the harbor.

Keywords: maximum concentrations, non-stationary sources, moving sources

Fig. 2. Ref. 13.

Possible changes in the total ozone content and other parameters of the Antarctic stratosphere according to the SOCOL v4 model. Imanova A. S., Smyshlyaev S.P., Rozanov E. V., Frolkis V. A. Proceedings of the GGO. 2023. V. 610. P. 102–112.

An analysis of the behavior of total ozone content and other parameters of the stratosphere for the Antarctic region from 2015 to 2099 was carried out based on data from the SOCOLv4 model using a moderate greenhouse gas emissions scenario (SSP 2-4.5). The following were considered: total ozone content, temperature, zonal wind speed, content of chlorine and bromine components. It is shown that the ozone content in the Antarctic region in the future has a statistically significant positive trend, which is mainly due to a decrease in the content of chlorine and bromine components.

Keywords: stratospheric ozone, polar vortex, Antarctica, numerical modeling, SOCOLv4, climate change.

Fig. 3. Ref. 21.

Criteria for sampling data on atmospheric electricity for the Polar regions in order to automate their processing and control Zaynetdinov B. G. Proceedings of the GGO. 2023. V. 610. P. 113–125.

The article presents a statistical substantiation of the criteria for sampling data on the electric field strength of the surface layer of the atmosphere for high-latitude observation stations under normal hours. The results obtained can be used to automate the process of processing and monitoring incoming information about atmospheric electricity.

Keywords: atmospheric electric field, meteorological phenomena, information processing.

Tabl. 5. Fig. 3. Ref. 8.

A new approach for transferring units of measurement of meteorological optical range to nephelometers. Zimenkov P. S. 2023. V. 610. P. 126–137.

A new concept of nephelometer calibration and a device for linearity checking of nephelometer transmitter-receiver optical system is proposed. For the measurement unit transfer from a reference transmissometer to a reference nephelometer the using of a transmissometer with a very short measurement baseline is proposed. Also it is proposed to do a transfer of the measurement unit in laboratory conditions, which characterized with stable and reproducibility measurement results (in a Fog Chamber). A hierarchy scheme for the measurement unit transfer to a field nephelometers is proposed.

Keywords: nephelometer, transmissometer, hierarchy scheme, infrared filter, diffusing plates, diffusion coefficient, directional transmittance coefficient, fog chamber.

Fig. 3. Tab. 1. Ref. 5.

Imitator of light scattered by aerosol for testing nephelometer type sensors. Starodubov A. G., Yakovlev V. S., Rodionov A. A. Proceedings of the GGO. 2023. V. 610. P.138–147.

A description of the imitator of light scattered by an aerosol for testing nephelometer-type sensors and the results of its testing are given. The imitator allows to check the accuracy of a nephelometer's measurements over its entire range.

Keywords: meteorological optical range, MOR, nephelometer, calibration.

Tab. 2. Fig. 3. Ref. 5.

Studies of the specific electric charge on zinc oxide particles.
Budaev A. Kh. Proceedings of the MGO. 2023. V. 610. P. 148–159.

Laboratory experiments were conducted to study the effect of the electric field strength of a flat capacitor on the specific electric charge of zinc oxide particles.

A set of equipment and methods have been developed for conducting experiments, which have shown that the absolute value of the charge on negatively charged particles is greater than on positively charged ones.

It is found that when an electric field strength of 48 kV/cm is reached, the acquired charge transitions from negative to positive. Most likely, when a particle collides with a positively charged plate, an oxide film breaks through on its surface, and the particle acquires a significant positive charge.

The errors associated with the deposition of reagent particles on the capacitor plates at different field values are calculated. The total error is $\pm 10\%$. Thus, the deposition of reagent particles on the capacitor plates does not significantly affect the values of the specific yield of the reagent.

Keywords: zinc oxide, electric charge, electric field strength, reagent, ice-forming particles, specific yield.

Table 1. Fig. 5. Ref. 16.

Economic aspects of application of mobile impact points in Stavropol anti-hail service. Alita S. L., Appaeva Zh. Yu., Shapovalov V. A. Proceedings of the MGO. 2023. V. 610. P. 160–170.

The article investigates the issue of cost-effectiveness of the use of mobile hail impact points in the Stavropol hail service. The maximum number of mobile impact points, which, from the economic point of view, is reasonable to deploy to increase the efficiency of anti-hail operations, is determined. The article also evaluates the payback period of measures related to the deployment of this number of mobile impact points and defines the areas of their possible deployment.

Keywords: mobile impact point, average annual damage, protected area, profitability, payback period.

Tab. 3. Fig. 1. Ref. 6.

Method of using mobile points of influence on hail processes in the Krasnodar anti-hail service. Alita S. L., Live K. B. Proceedings of the GGO. 2024. V 610. P. 171–179.

The article describes several typical cases of hail skipping in the Krasnodar anti-hail service over the past few years, which have caused significant damage to agricultural crops. In all these cases, the formation and development of hail clouds occurred outside the protected area, outside the range of anti-hail missiles. To reduce the risks of such a development in the future, the article suggests using several mobile points of influence on hail processes located in the places of the most frequent formation of hail clouds.

Keywords: hail cloud, layout, mobile impact point, active impact, protected area, anti-hail missile.

Fig. 3. Ref. 4.

**Сборник научных трудов
Труды ГГО. Вып. 610**

Подписано в печать 11.12.23. Формат 60x84/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Печ. л. 12,375. Тираж 300 экз. Заказ №2130.

Изготовлено в ООО «Д'АРТ».

194044, Санкт-Петербург, Пироговская наб., д. 17 к. 6, литера А, помещ. 8.