

УДК 551.510

Мониторинг атмосферных параметров: 25 лет TOR-станции ИОА СО РАН

Д.К. Давыдов, Б.Д. Белан, П.Н. Антохин, О.Ю. Антохина,
В.В. Антонович, В.Г. Аршинова, М.Ю. Аршинов, А.Ю. Ахлестин,
С.Б. Белан, Н.В. Дудорова, Г.А. Ивлев, А.В. Козлов, Д.А. Пестунов,
Т.М. Рассказчикова, Д.Е. Савкин, Д.В. Симоненков, Т.К. Скляднева,
Г.Н. Толмачев, А.З. Фазлиев, А.В. Фофонов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 25.05.2018 г.

Приводятся описание текущего состояния и технические характеристики TOR-станции, созданной 25 лет назад для мониторинга состава атмосферы, основных метеорологических величин и других параметров. Результаты многолетних наблюдений показали, что с момента создания и развития особой экономической зоны в Академгородке г. Томска качество воздуха на его территории значительно ухудшилось.

Ключевые слова: мониторинг, состав атмосферы, качество воздуха; monitoring, atmosphere composition, air quality.

Введение

Состав атмосферы оказывает значительное влияние на радиационный баланс Земли, состояние ее экосистем, здоровье человека и его хозяйственную деятельность. К середине прошлого столетия стало очевидным, что одним только регулярных метеорологических наблюдений недостаточно, а так называемый лос-анджелесский смог привел к пониманию того, что необходим и мониторинг состава воздуха, особенно в мегаполисах. В 50-х гг. XX в. Всемирная метеорологическая организация (ВМО) приняла решение о запуске программы по химии атмосферы и метеорологическим аспектам загрязнения воздуха с целью перехода от разрозненных нерегулярных наблюдений к непрерывному мониторингу [1]. Начи-

налась она, прежде всего, с создания наблюдательной сети за общим содержанием озона, задерживающего опасное для всего живого жесткое ультрафиолетовое солнечное излучение и являющегося одним из самых токсичных газов.

Примерно в то же время, независимо от этой программы, Ч.Д. Килингом были начаты систематические измерения концентрации углекислого газа на метеостанции обсерватории Мауна-Лоа и в Антарктиде. Уже в 1960 г. он забил тревогу о росте содержания CO_2 в атмосфере и необходимости снижения антропогенных выбросов, показав, что скорость роста концентрации CO_2 на Южном полюсе соответствует росту сжигаемого во всем мире за год количества ископаемого топлива [2]. На тот момент к работе Килинга не было проявлено должного интереса, и связанный с этим недостаток финансирования даже привел к временной приостановке измерений в 1964 г. [3]. На протяжении длительного времени цитируемость статьи [2] росла довольно медленно, признание к ее автору пришло гораздо позже (в начале 1970-х гг.), после чего график многолетней изменчивости концентрации CO_2 стал носить его имя – Keeling curve.

К 1980-м гг. всеобщее осознание проблем, связанных с изменением климата и ухудшением качества воздуха, привело к решению ВМО о создании в 1989 г. Глобальной службы атмосферы (Global Atmosphere Watch), одной из целей которой является организация систематических наблюдений за химическим составом и связанными с ним физическими характеристиками атмосферы [1], комплексный

* Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Павел Николаевич Антохин (arpi@iao.ru); Ольга Юрьевна Антохина (antokhina@iao.ru); Владимир Викторович Антонович (voldemar@iao.ru); Виктория Геннадьевна Аршинова (arvi@iao.ru); Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Алексей Юрьевич Ахлестин (lexa@iao.ru); Сергей Борисович Белан (bsb@iao.ru); Нина Викторовна Дудорова (ninosh@mail.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Дмитрий Александрович Пестунов (pest@iao.ru); Татьяна Михайловна Рассказчикова (rtm@iao.ru); Денис Евгеньевич Савкин (sde@iao.ru); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Татьяна Константиновна Скляднева (tatyana@iao.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@ipc.tsc.ru); Александр Зарипович Фазлиев (faz@iao.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

анализ которых позволил бы точнее прогнозировать будущие изменения состава воздуха. Для того чтобы измерения, проводимые на своей территории разными странами, можно было сравнивать между собой и использовать в глобальных климатических моделях, в рамках этой программы были выработаны требования к единому временному масштабу, единицам и точности измерения параметров атмосферы.

К основным целям мониторинга атмосферы можно отнести: сбор информации о качестве воздуха и переносе загрязнений; диагностику окружающей среды; получение данных для верификации и совершенствования климатических моделей. Несмотря на важность мониторинга окружающей среды, далеко не все страны выделяют достаточное финансирование на его развитие, как правило, из-за того, что он не имеет ощутимого экономического эффекта в краткосрочной перспективе. В статье [3], посвященной Ч.Д. Килингу, Юэн Нисбет дал довольно точное определение мониторингу в красноречивой форме: «Мониторинг — это Золушка науки, нелюбимая и плохо оплачиваемая... Работа по проведению натурных измерений не обещает ни блестящих ракет, ни выгодных контрактов... Мониторинг не выигрывает сияющих призов. Публикации затруднены, редки и мало читаемы».

В бывшем СССР работы по организации сети стационарных постов наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха в городах были начаты в 1960-х гг., и уже к 1970 г. мониторинг проводился более чем в 100 городах. Тогда же были созданы широко известные типовые станции, получившие название «Пост-1», которые устанавливались почти во всех крупных городах. Первые методики проведения мониторинга были разработаны специалистами Главной геофизической обсерватории (ГГО) им. А.И. Воейкова и институтов Минздрава СССР на основе теоретических и экспериментальных исследований, проводившихся ГГО в 1960-х гг. [4, 5]. В итоге Постановлением ЦК КПСС и Совмина СССР от 29.12.1972 г. № 898 «Об усилении охраны природы и улучшении использования природных ресурсов» Главному управлению Гидрометеорологической службы было поручено организовать «Общегосударственную службу наблюдений и контроля за уровнем загрязнения атмосферы, почвы и водных объектов по физическим, химическим и гидробиологическим (для водных объектов) показателям и экстренной информации о резких изменениях уровня загрязнения атмосферы, почв и вод — ОГСНК». Однако первый руководящий документ в данной области был опубликован только в 1979 г. [6].

Сложная экономическая ситуация, сложившаяся в 1990-х гг. в нашей стране, привела к упадку созданной ранее сети мониторинга в связи с фактическим прекращением функционирования значительной части «Постов-1» в городах. В современной России к одному из самых положительных примеров в области мониторинга загрязнения атмосферного воздуха можно отнести создание решением Правительства Москвы в 2002 г. ГПБУ «Мосэкомониторинг». В результате на территории Москвы

была развернута сеть, которая на данный момент состоит из 56 стационарных пунктов и нескольких мобильных станций наблюдений за состоянием атмосферного воздуха. Станции оснащены самым современным аналитическим оборудованием, позволяющим контролировать 26 атмосферных примесей. Данные о концентрации примесей в воздухе доступны в графическом виде в режиме реального времени на сайте ГПБУ «Мосэкомониторинг» (<http://www.mosecom.ru>).

Намного хуже в России дела обстоят с комплексным фоновым мониторингом атмосферы, который и по сей день находится в зачаточном состоянии. Большинство непрерывных наблюдений за фоновым состоянием атмосферы проводится на станциях научно-исследовательских организаций и лишь на нескольких станциях, принадлежащих Росгидромету [7]. Как таковая полноценная современная сеть фонового мониторинга атмосферы в России отсутствует.

1. Географическое положение TOR-станции

Первая станция мониторинга атмосферных параметров в ИОА СО РАН (TOR-станция) создавалась в рамках международного проекта по исследованию тропосферного озона TOR (Tropospheric Ozone Research) европейской программы EUROTRAC [8]. Непрерывные автоматические измерения на ней были начаты в конце декабря 1992 г. На тот момент ее расположение на северо-восточной окраине Академгородка г. Томска (56°28'41" с.ш., 85°03'15" в.д.) позволяло проводить измерения как в фоновых условиях, так и в условиях воздействия достаточно крупного города. Однако за последнее десятилетие в Академгородке произошли значительные изменения в связи со строительством на его северной и восточной окраинах особой экономической зоны (ОЭЗ) г. Томска технико-внедренческого типа, а также массива зданий и коттеджей элитного типа жилья микрорайонов Академический и Наука. В результате антропогенная нагрузка на TOR-станцию значительно возросла и число эпизодов измерений в фоновых условиях заметно снизилось, так как она оказалась в кольце автомобильных дорог с возрастающей с каждым годом интенсивностью движения. Кроме того, примерно в 500 м от нее появилась газовая котельная ОЭЗ, а также большинство коттеджей имеют свои автономные системы отопления и горячего водоснабжения.

2. Технические характеристики TOR-станции

2.1. Краткая история

В отличие от типовых станций наблюдений за качеством воздуха «Пост-1» TOR-станция с момента ее создания работала в автоматическом режиме.

Разработка и введение в эксплуатацию первого варианта автоматизированного комплекса станции были проведены силами сотрудников лаборатории оптической погоды, переименованной позднее в лабораторию климатологии атмосферного состава (ЛКАС): В.К. Ковалевского, Е.В. Покровского, В.Е. Мелешкина, А.В. Лиготского и А.Н. Рогова [8].

В первые годы на TOR-станции измерялись концентрации O_3 , CO , CO_2 , основные метеорологические величины, гамма-фон, распределения аэрозолей по размерам в диапазоне 0,4–10,0 мкм и коэффициента направленного светорассеяния. Измерения последнего были позднее остановлены на TOR-станции в связи с созданием в ИОА СО РАН специальной «Аэрозольной станции» (<http://www.aerosol.iao.ru>).

За 25 лет функционирования станция претерпела несколько модернизаций. В 1995 г. блок управления станции на базе Крейт-КАМАК-а и ЭВМ ДВК-3М был заменен на ЭВМ типа IBM PC/AT 386 и аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) на шину ISA-16, а в измерительный комплекс оборудования добавлен пиранометр М-115М. Поскольку с середины 1990-х гг. компьютеры постепенно стали более доступными, то далее мы уже не будем останавливаться на их типах. В 2004 г. вместо АЦП на шину ISA-16 стал использоваться АЦП на шину PCI (ЛА-1,5 PCI, ЗАО «Руднев-Шиляев»), а с 2013 г. — на шину USB (ЛА-20USB, ЗАО «Руднев-Шиляев»).

Однако основные проблемы комплекса оборудования TOR-станции были связаны с приборами для измерения малых газовых составляющих и аэрозолей. Из первоначального состава приборов [8, 9] на данный момент остались только хемиллюминесцентный газоанализатор озона 3.02 П (ОПТЭК) и индикатор радиационного фона ИРФЗТ (МП «ИНТЕХ»), показавшие свою надежность при длительной эксплуатации.

Для обеспечения высокого качества результатов интерпретации данных наблюдений как в глобальном, так и в региональном масштабах ВМО постоянно устанавливает все более жесткие требования к точности измерения концентрации малых газовых составляющих атмосферы (МГС), особенно таких, как CO_2 , CO , N_2O и CH_4 [10]. В связи с тем что газоанализаторы ГИАМ-15М-01 и ГИАМ-15М-02 (СПО «Аналитприбор»), установленные нами в первые годы для измерения CO и CO_2 [8] соответственно, предназначались для использования в системах контроля технологических процессов, добиться от них точности, требуемой для проведения измерений в реальной атмосфере, так и не удалось, поэтому их эксплуатация на TOR-станции была прекращена. К сожалению, это касается почти всех газоанализаторов отечественного производства, т.е. пороги обнаружения, дрейф характеристик и т.п. не позволяют измерять фоновые уровни концентраций большинства МГС с достаточной точностью. Исключение составили анализаторы CO (модель К-100) и O_3 (модель 3.02 П) производства ОПТЭК, которые до сих пор входят в состав оборудования станции. При этом второй из них в 2008 г. прошел тестирование

в Агентстве по охране окружающей среды США (US EPA) и был одобрен им в качестве средства измерения озона для задач атмосферного мониторинга.

Новой вехой развития было создание в 1999 г. веб-страницы TOR-станции (<http://www.meteo.iao.ru>, в настоящее время <http://www.lor.iao.ru>) в рамках основного домена ИОА СО РАН, где все измеряемые параметры стали отображаться в графическом виде в режиме, близком к реальному времени (информация обновляется один раз в час). Достаточно быстро она стала одной из самых посещаемых страниц ИОА СО РАН, причем география посетителей выходит далеко за пределы России. Уже в 2004 г. авторы статьи [11] отметили, что TOR-станция «может служить образцом для подражания представлению данных о загрязнении атмосферы в России».

В конце 1990-х и начале 2000-х гг. ЛКАС начала сотрудничество с рядом научных организаций из Японии и Европы в рамках международных проектов, посвященных исследованиям состава атмосферы на территории Сибири. Это позволило получить опыт по проведению прецизионных измерений МГС с использованием современного газоаналитического оборудования и дорогостоящих поверочных газовых смесей (ПГС), изготовленных в соответствии с международными стандартами. Также в 2000-х гг. благодаря поддержке Приборнои комиссии СО РАН и ряда российских грантов, полученных ЛКАС, значительная часть оборудования TOR-станции была либо обновлена, либо модернизирована.

2.2. Текущее состояние

Структурная схема TOR-станции по состоянию на 2018 г. представлена на рис. 1 (цв. вкладка). Видно, что комплекс ее оборудования состоит из нескольких блоков: аэрозольного, газоаналитического, метеорологического, радиационного и блока управления, сбора и передачи данных.

Метеоблок состоит из датчика температуры и влажности Vaisala HMP45D, размещенного в стандартной метеорологической будке БС-1, анеморумбометра М-63, осадкомера Young Model 52202 и датчика атмосферного давления Young Model 61302.

В радиационный блок входят: пиранометр М-115 для измерения суммарной солнечной радиации в диапазоне длин волн 0,3–2,4 мкм; ультрафиолетовый пиранометр YES UVB-1 (280–320 нм); спектрофотометр Brewer 049, измеряющий спектр ультрафиолетовой радиации в диапазоне 290–325 нм с шагом 0,5 нм; индикатор радиационного фона (γ -излучения) ИРФЗТ.

Для измерения малых газовых составляющих используются следующие газоанализаторы: $CO_2/CH_4/H_2O$ — Los Gatos Research (LGR) Model 907-0010, работа которого основана на методе внеосевой интегральной внутривибрационной лазерной спектроскопии (Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy — OA-ICOS) [12]; O_3 — ОПТЭК, модель 3.02 П-А, работающий на основе эффекта гетерогенной хемиллюминесценции в результате реакции

озона с окисляемыми химическими веществами; NO_x – Teledyne API Model 200E, основанный на референтом методе газовой фазной хемиллюминесценции; УФ-флуоресцентный анализатор SO₂ – Teledyne API Model 100E; электрохимический анализатор CO ОПТЭК К-100. Также для измерения общего содержания озона (OCO) на станции используется спектрофотометр Brewer 049.

Подвод проб атмосферного воздуха к газоанализаторам, измеряющим содержание CO₂, CH₄, H₂O и CO, осуществляется с помощью комбинированных металлопластиковых трубок Synflex® 1300 1/4 и полиэтиленовых трубок DAYCO® 44-PE-1/4-NSF-51 (внешний Ø = 1/4", внутренний Ø = 4 мм), а к анализаторам химически активных газов (SO₂, NO_x и O₃) – политетрафторэтиленовых трубок (внешний Ø = 6 мм, внутренний Ø = 4 мм).

Модернизация аэрозольного блока была произведена в 2010 г.: морально устаревший фотоэлектрический счетчик аэрозольных частиц АЗ-5 был заменен на лазерный аэрозольный спектрометр GRIMM Model 1.109, а в диффузионном спектрометре аэрозолей (ДСА) производства Института химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН конденсационный счетчик частиц (КСЧ) на парах дибутилфталата (C₆H₄(COOC₄H₉)₂) был заменен на КСЧ на парах воды TSI Model 3781.

Технические характеристики оборудования приведены в таблице. Все приборы и датчики, за исключением аэрозольного комплекса, спектрофотометра

Brewer и газоанализатора CO₂/CH₄/H₂O LGR Model 907-0010, подключены к персональному компьютеру через АЦП LA-20USB. Управление оптическим счетчиком GRIMM Model 1.109 и передача данных измерений от него осуществляются через последовательный порт центрального компьютера. Спектрофотометр Brewer и ДСА подключены к собственным компьютерам (ноутбукам), которые управляют их работой и передают данные измерений по локальной сети на удаленный сервер, так же как и газоанализатор LGR Model 907-0010, имеющий свой встроенный компьютер.

Программное обеспечение, управляющее всем измерительным комплексом, разработано в среде LabView 8.5 (National Instruments Inc.). Измерения проводятся в круглосуточном режиме, запись результатов измерения, за исключением ДСА и спектрофотометра Brewer, происходит ежечасно. В базу данных на центральном компьютере и удаленном MySQL сервере записывается среднее значение за первые десять минут каждого часа. В случае ДСА записывается каждое измерение, т.е. запись происходит каждые 80 с, поскольку именно такое количество времени занимает получение одного спектра размеров. Оборудование TOR-станции располагается непосредственно в помещении лаборатории, в связи с чем калибровка газоаналитического комплекса с применением ПГС, источников микропотока и генератора градуировочной газовой смеси осуществляется с периодичностью, рекомендованной производителями и ВМО.

Технические характеристики оборудования TOR-станции

Блок	Прибор/датчик	Измеряемый параметр	Диапазон	Погрешность	Постоянная времени, с	
Метеоблок	Vaisala HMP45D	t , °C	-40...+60	±0,2 °C	1	
		U , %	0...100	±2%	1	
	M-63	dd , град	0...360	±10°	1	
		V , м/с	1,2...40	±(0,5 + 0,05V)	1	
	Young Model 61302	P , гПа	150...1150	±0,3 гПа	1	
	Young Model 52202	Интенсивность и количество осадков	0...50 мм/ч	2% (< 25 мм/ч) 3% (> 25 мм/ч)	–	
Блок газоанализа	LGR Model 907-0010	CO ₂ , млн ⁻¹	20...10000	0,2 млн ⁻¹	1	
		CH ₄ , млн ⁻¹	0,005...50	0,001 млн ⁻¹		
		H ₂ O, млн ⁻¹	150...70000	100 млн ⁻¹		
		ОПТЭК 3.02 П-А	O ₃ , мкг/м ³	0...500	±20%	1
		Teledyne API 200E	NO/NO ₂ , млн ⁻¹	0...20	±0,5%	20
		ОПТЭК К-100	CO, мг/м ³	0...50	±20%	1
	Teledyne API 100E	SO ₂ , млн ⁻¹	0...20	±0,5%	20	
	Brewer 049	OCO, е.Д.	–	±1%	120	
Аэрозольный блок	GRIMM Model 1.109	D_p , мкм (31 канал)	0,25...32	–	6	
		N , см ⁻³	0...2000	±3%		
		Диффузионный спектрометр аэрозоля	D_p , нм (20 каналов)	3...200	–	80
		N , см ⁻³	0...500000	±10%		
Радиационный блок	M-115	λ , мкм	0,3...2,4	±10%	<40	
		Q , Вт/м ²	0...1500			
	YES UVB-1	λ , нм	280...320	–	0,1	
		I , Вт/м ²	0...2,5	<5%		
	Brewer 049	λ , нм	290...325	–	265	
	I , Вт/м ²	–	–			
	ИРФЗТ	γ -фон, мкР/ч	1...1000	30%	1	

3. Некоторые результаты многолетнего мониторинга

Многолетние наблюдения, проводимые на TOR-станции, позволили выявить целый ряд закономерностей изменчивости атмосферных примесей и других параметров атмосферы в районе г. Томска, которые нашли отражение в целом ряде публикаций.

3.1. Озон

Поскольку мониторинг начинался прежде всего с непрерывных измерений концентрации озона, то подавляющая часть этих работ была посвящена именно этой МГС [13–24]. В них подробно исследуются установленные закономерности формирования поля концентрации озона в приземном слое атмосферы. Далее мы ограничимся рассмотрением только тенденций многолетней изменчивости. На рис. 2 (цв. вкладка) представлен многолетний ход среднемесячных приземных концентраций озона (ПКО). Видно, что с 1993 по 1999 г. ПКО имела общую тенденцию к снижению ($-3,6 \text{ мкг/м}^3$ в год) с некоторыми межгодовыми вариациями и в 1999 г. среднемесячные значения концентрации O_3 практически не превышали уровня предельно допустимых среднесуточных концентраций ($\text{ПДК}_{\text{с.с}} = 30 \text{ мкг/м}^3$).

Затем, с 1999 по 2001 г., ПКО в районе TOR-станции возросла с темпом 12 мкг/м^3 в год. После 2001 г. тенденция роста заметно снизилась до $\approx 0,2 \text{ мкг/м}^3$ в год, однако концентрация озона сохраняется на достаточно высоком уровне, превышающем $\text{ПДК}_{\text{с.с}}$ большую часть года. Уменьшение концентрации O_3 в 1990-х гг. можно объяснить общим спадом российской экономики, приведшим к снижению промышленного производства, и, как следствие, сокращением антропогенных выбросов озonoобразующих соединений в атмосферу. Начавшийся в 2000-х гг. подъем экономики, сказавшийся в первую очередь на возрастающем количестве как личного, так и коммерческого, технологического автотранспорта, привел к заметному увеличению оксидов азота, летучих углеводородов и других соединений, относящихся к предшественникам озона, и, как следствие, ПКО в районе г. Томска заметно выросла. Относительная ее стабилизация в последние десятилетие, несмотря на увеличивающееся антропогенное влияние на пункт наблюдений, обусловлена достижением некоторого баланса между генерацией озона и его стока, например на аэрозольные частицы и монооксид азота (NO), которые также выбрасываются в атмосферу в ходе сжигания различных видов топлива. В среднем с 1993 по 2017 г. ПКО росла с темпом $\approx 0,4 \text{ мкг/м}^3$ в год, а ее уровни на данный момент могут оказывать негативное воздействие на здоровье жителей Академгородка.

Для сезонного хода приземной концентрации озона характерно наличие весеннего максимума, за исключением нескольких лет, когда он смещался в сторону июня – июля. Причем в эти же годы уровни ПКО в целом были невысокими. К проблеме про-

явления весеннего максимума озона в нижней тропосфере и его периодического смещения на летние месяцы внимание было обращено достаточно давно, и в 2000 г. П.С. Монкс опубликовал обзор [25], посвященный возможным его причинам. Согласно этому обзору весенний/летний максимум наблюдается практически на всех станциях Северного полушария, осуществляющих мониторинг ПКО. Часть исследователей объясняют его стратосферно-тропосферным обменом (СТО). Однако в среднем большинство имеющихся данных свидетельствует о том, что явной сезонной зависимости в частоте обмена между стратосферой и тропосферой нет [25]. Безусловно, СТО оказывает влияние на формирование тропосферного озонового фона, но не определяет его. Так, Д.Х. Сайнфельд и С.Н. Пандис наглядно показали, что для образования гидроксильного радикала HO^\bullet , определяющего в тропосфере сток и, соответственно, баланс CO и CH_4 , требуется от 2,5 до 5 раз больше озона, чем поступает его из стратосферы [26, § 6.1], сделав вывод, что основная часть O_3 генерируется непосредственно в самой тропосфере.

Таким образом, в тропосфере, особенно в нижних ее слоях, основным источником озона является фотохимическое образование из газов-предшественников, таких как CO , и неметановых углеводородов. Их накопление в течение зимы и может привести к дополнительной генерации O_3 весной на фоне увеличивающегося притока солнечной радиации вместе с эмиссией биогенных озonoобразующих летучих органических соединений в период возобновления фотосинтеза, формируя сезонный максимум. В заключение отметим, что общего консенсуса о природе весеннего максимума озона так и нет и его проявление до сих пор остается одной из главных фундаментальных проблем атмосферной химии [25].

3.2. Монооксид углерода

Перейдем к рассмотрению многолетней изменчивости концентрации угарного газа (CO). Его поступление в атмосферу обусловлено эмиссией как от антропогенных, так и от природных источников, мощность которых сопоставима. К первым относится неполное сгорание различных видов топлива и сельскохозяйственные палы, ко вторым – горение биомассы в ходе лесных, торфяных и степных пожаров, а также неполное анаэробное разложение органических соединений. На рис. 3 (цв. вкладка) представлен многолетний ход среднесуточных концентраций CO , наблюдавшихся на TOR-станции с 2002 по 2017 г. Измерения CO эпизодически проводились и раньше, однако из-за проблем приборного характера, упомянутых выше, уровень достоверности их невысок и мы исключили их из анализа.

Из рис. 3 видно, что самые высокие концентрации CO ($> 5 \text{ мг/м}^3$) наблюдались в третьей декаде июля 2012 г., когда лесные пожары, охватившие значительную часть Западной и Восточной Сибири летом 2012 г. [27], вплотную подступили к г. Томску и наблюдалась практически штилевая погода

(рис. 4, а, цв. вкладка), способствовавшая накоплению продуктов горения. Заметное же повышение концентрации СО весной и летом 2015 г. было обусловлено наложением двух факторов: на протяжении всего этого периода наблюдалась маловетренная погода, причем доля ветров южного и юго-юго-западного направлений, преобладающих в районе ТОР-станции (рис. 4, б и 4, в) и эффективно рассеивающих накапливающиеся примеси, была ниже обычной (рис. 4, г). При этом доля ветров западного и восточного направлений увеличилась, что привело к возрастанию влияния выбросов со стороны города и наложению дымовых шлейфов, приносимых от лесных пожаров из Восточной Сибири. В самой же Томской области ситуация с лесными пожарами летом 2015 г. была относительно спокойной.

Несмотря на периодическое влияние лесных пожаров, которые приводят к экстремально высоким значениям концентрации СО, в целом отчетливо видно постепенное увеличение *фонов*ого уровня содержания СО в воздухе в районе проведения наблюдений, произошедшее за последние 10 лет с началом строительства и развития на территории ОЭЗ г. Томска. Если до этого момента концентрации СО в среднем находились в пределах регионального фона на уровне чуть более $0,1 \text{ мг/м}^3$ [28], то в настоящий момент они уже превышают его вдвое.

3.3. Атмосферный аэрозоль

Наблюдения за дисперсным составом атмосферного аэрозоля, проводимые на ТОР-станции, также позволили обнаружить ряд закономерностей его изменчивости. Так, анализ многолетнего ряда данных измерения субмикронной фракции аэрозоля ($D_p > 0,4 \text{ мкм}$) выявил связь его счетной концентрации с солнечной активностью [29, 30]. На основе результатов круглогодичного мониторинга распределения аэрозольных частиц по размерам в диапазоне 3–200 нм, впервые осуществленного с использованием ДСА в 1996 г., были сделаны оценки скорости образования наночастиц в реальной атмосфере [31]. Проведенная в 2010 г. модернизация аэрозольного комплекса позволила существенно улучшить временное разрешение и расширить диапазон измеряемых размеров, сделав возможным произвести качественную идентификацию и классификацию такого природного явления, как нуклеационные всплески, определить их основные характеристики и статистику повторяемости [32, 33].

Поскольку непрерывные измерения начинались с использованием фотоэлектрического счетчика частиц АЗ-5, имеющего нижний порог обнаружения, равный $0,4 \text{ мкм}$, для рассмотрения тенденции изменения содержания в воздухе аэрозольных частиц обратимся к многолетнему ряду данных по суммарной счетной концентрации частиц субмикронной и грубодисперсной фракций (рис. 5, цв. вкладка). Так же как и в случае с СО, максимальная концентрация аэрозолей наблюдалась в июле 2012 г. во время лесных пожаров.

Из рис. 5 видно, что картина долговременных изменений содержания аэрозольных частиц имеет общие черты с поведением ПКО за тот же период времени: снижение концентрации в 1990-х и рост в 2000-х гг., особенно с 2009 г. Наиболее ярко рост стал проявляться в 2010-х гг. в зимний период, когда увеличивающиеся антропогенные выбросы накапливаются в тонком приземном слое атмосферы вследствие мощных температурных инверсий.

3.4. Диоксид серы

Теперь обратимся к такому высокотоксичному газу, как диоксид серы (SO_2). В настоящее время доля антропогенных выбросов SO_2 (сжигание ископаемого топлива и химические производства) составляет 75% от его общей эмиссии в атмосферу, причем 90% антропогенных источников сосредоточены в Северном полушарии [26]. В XX в. выбросы этого газа выросли более чем в 6 раз, достигнув в 1970-е гг. отметки 120 Тг в год [34]. В результате содержание SO_2 в атмосфере сильно возросло, это привело к кислотным дождям в особо загрязненных районах. Так, согласно данным Агентства по охране окружающей среды США (US EPA), среднегодовая концентрация SO_2 в 1980 г. на их территории составляла 154 млрд^{-1} ($\approx 440 \text{ мкг/м}^3$) [35]. Это очень высокий уровень, способный нанести значительный вред как здоровью человека, так и всей окружающей среде. Например, в России для SO_2 законодательно установлены следующие уровни ПДК: среднесуточная – 50 мкг/м^3 , максимальная разовая – 500 мкг/м^3 . В связи с этим уже в 1979 г. в Женеве была подписана Конвенция ООН о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния, одним из пунктов которой является сокращение выбросов SO_2 , а в 1985 г. в Хельсинки был подписан Протокол о сокращении выбросов серы или их трансграничных потоков по меньшей мере на 30%. В соответствии с подписанными договоренностями большинство стран предприняло следующие меры по снижению выбросов диоксида серы: удаление серы из угля и нефти; предварительное внесение в топливо добавок, связывающих образующиеся при сжигании серосодержащие соединения; применение установок по очистке газовых выбросов от диоксида серы; перевод теплоэлектростанций на природный газ. В совокупности эти меры дали положительный результат: антропогенные выбросы SO_2 заметно снизились и его среднегодовая концентрация, например, в 2016 г. в США [35] составила уже $20,2 \text{ млрд}^{-1}$ ($57,8 \text{ мкг/м}^3$). В Европе эффект оказался еще более значительным, и в 2015 г. только 30% из 1322 станций, измеряющих SO_2 в 37 странах, показали превышение уровня $\text{ПДК}_{\text{с.с}} = 20 \text{ мкг/м}^3$ [36], рекомендованного ВОЗ. Однако усилия большинства стран в последние десятилетия нивелируются резким ростом выбросов бурно развивающегося Китая, которые в 2010 г. уже составляли около трети глобальной антропогенной эмиссии, проявляя тенденцию экспоненциального роста [34].

Если обратиться к многолетнему ходу среднесуточных концентраций SO_2 , наблюдавшихся на TOR-станции с 2012 по 2017 г. (рис. 6, цв. вкладка), то можно сделать вывод, что их уровень не превышает ПДК_{с.с.}, установленную в России, и большую часть периода они были даже ниже ПДК_{с.с.}, рекомендованной ВОЗ.

В целом концентрация диоксида серы отражает региональный фон. В сезонном ходе, как правило, проявляется зимне-весенний максимум, связанный с отопительным сезоном и накоплением выбросов в инверсионном слое. Летом концентрация падает до уровня ниже 10 мкг/м^3 , за исключением 2015 г., причины аномалии которого мы рассмотрели при анализе многолетней изменчивости концентрации CO .

3.5. Парниковые газы (CO_2 и CH_4)

Непрерывные наблюдения за углекислым газом и метаном были начаты относительно недавно, поэтому кратко остановимся только на основных характеристиках изменчивости их концентрации (рис. 7, цв. вкладка). Антропогенная нагрузка на TOR-станцию возросла, но так как она располагается в небольшом лесном массиве, то для концентрации CO_2 характерен четко выраженный сезонный ход с достаточно большой амплитудой, подобный наблюдаемым даже в фоновых районах Сибири. Концентрация CO_2 росла за период 2012–2017 гг. со средним линейным трендом $\approx 2,24 \text{ млн}^{-1}$ в год, отражая общую тенденцию, характерную для Западной Сибири.

Высокие уровни концентрации CH_4 наблюдаются, как правило, зимой за счет его накопления в тонком приземном слое, формирующего основной сезонный максимум. Также в отдельные годы высокие концентрации наблюдаются и летом, во время лесных пожаров и в периоды атмосферного блокирования [37]. Рост уровня концентрации CH_4 в 2012–2017 гг. составил $8,5 \text{ млрд}^{-1}$ в год.

3.6. Температура воздуха

Рассмотрим температурный режим Академгородка г. Томска. Анализ данных, полученных на TOR-станции за 25 лет, не выявил явного увеличения или уменьшения температуры воздуха, так как с климатической точки зрения это слишком короткий период наблюдений. Поэтому приведем только аномалии среднемесячных температур относительно температур, усредненных для каждого из месяцев года в 1993–2017 гг. (рис. 8, цв. вкладка). Можно отметить, что число периодов с явным преобладанием положительных аномалий (красные области на рис. 8) несколько выше, чем отрицательных (синие области на рис. 8). Однако мощность последних нивелирует картину в целом, поэтому явного тренда не наблюдается. Из всего ряда данных можно выделить три относительно длительных периода похолодания с большими значениями аномалий: с июня 2000 г. по июль 2001 г., с июля 2005 г. по июль 2006 г., и с августа 2008 г. по июнь 2011 г. Начиная с лета 2013 г. мощность и длительность отрицательных

аномалий заметно уменьшилась. Самые длительные и заметные периоды потеплений наблюдались в 1990-х гг.

Заключение

Осуществление мониторинга атмосферы сопряжено с целым рядом трудностей, главной из которых является катастрофическое недофинансирование. Несмотря на то что современный уровень развития техники позволил автоматизировать сам процесс и уменьшить трудозатраты, необходимые для проведения длительных и непрерывных наблюдений, мониторинг постоянно требует капитальных вложений, связанных с текущим ремонтом и обновлением комплекса измерительной аппаратуры, стоимость которой зачастую превышает десятки и даже сотни тысяч долларов или евро. Во избежание остановки и прерывания наблюдений в идеале каждая станция мониторинга должна быть оснащена запасным комплектом всех приборов и датчиков, которые можно было бы использовать вместо вышедших из строя или находящихся в ремонте, как это делается в большинстве развитых стран, например США [38]. Это невозможно осуществить за счет системы грантов, продолжительность которых составляет от 2 до 5 лет. Значение мониторинга можно оценить только спустя десятилетия, когда становится возможным определение многолетних тенденций изменения того или иного параметра, как и было нами показано на примере TOR-станции. Резюмируя результаты проводимого на ней мониторинга атмосферных параметров, полученные за 25 лет, можно констатировать, что, к сожалению, качество воздуха в Академгородке г. Томска значительно ухудшилось и воплощение идеи о работе ученых в условиях чистой атмосферы, заложенной академиком Владимиром Евсеевичем Зуевым при создании Академгородка, оказалось под угрозой. Пока сложно судить об экономическом эффекте ОЭЗ г. Томска, может быть, он тоже станет заметным в отдаленной перспективе, но негативные экологические последствия для жителей Академгородка от создания ОЭЗ уже очевидны.

Работа выполнена при поддержке ФЦП (соглашение № 14.613.21.0082, уникальный идентификатор проекта RFMEF161317X0082).

1. WMO Global Atmosphere Watch (GAW) Implementation Plan: 2016–2023: Report N 228. Geneva, Switzerland: WMO, 2017. 75 p.
2. Keeling C.D. The Concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere // Tellus. 1960. V. 12, N 2. P. 200–203. DOI: 10.1111/j.2153-3490.1960.tb01300.
3. Nisbet E. Earth monitoring: Cinderella science // Nature (Gr. Brit.). 2007. V. 450, N 7171. P. 789–790. DOI: 10.1038/450789a.
4. Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова: Результаты исследований в период МГТ и МГС. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. № 134. 136 с.
5. Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова: Вопросы турбулентной диффузии и распространения примесей в атмосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1963. № 138. 88 с.

6. *Руководство по контролю загрязнения атмосферы*. Л.: Гидрометеониздат, 1979. 448 с.
7. *Kulmala M.* Build a global Earth observatory // *Nature* (Gr. Brit.). 2018. V. 553, N 7686. P. 21–23. DOI: 10.1038/d41586-017-08967-y.
8. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Зуев В.В., Зуев В.Е., Ковалевский В.К., Лиготский А.В., Мелешкин В.Е., Панченко М.В., Покровский Е.В., Рогов А.Н., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н.* TOR-станция мониторинга атмосферных параметров // *Оптика атмосфер. и океана*. 1994. Т. 7, № 8. С. 1085–1092.
9. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ковалевский В.К., Плотников А.П., Покровский Е.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н.* Автоматический пост для контроля качества воздуха // *Метеорол. и гидрол.* 1999. № 3. С. 110–118.
10. 18th WMO/IAEA Meeting of Experts on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Tracers Measurement Techniques (GGMT-2015): Report N 229. Geneva, Switzerland: WMO, 2016. 137 p.
11. *Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Шалыгина И.Ю., Демин В.И., Мокров Е.* Содержание озона над территорией Российской Федерации во втором квартале 2004 г. // *Метеорол. и гидрол.* 2004. № 8. С. 119–124.
12. *Baer D.S., Paul J.B., Gupta M., O'Keefe A.* Sensitive absorption measurements in the near-infrared region using off-axis integrated-cavity-output spectroscopy // *Appl. Phys. B*. 2002. V. 75, N 2. P. 261–265.
13. *Белан Б.Д., Ковалевский В.К., Плотников А.П., Складнева Т.К.* Временная динамика озона и оксидов азота в приземном слое в районе г. Томска // *Оптика атмосфер. и океана*. 1998. Т. 11, № 12. С. 1325–1327.
14. *Белан Б.Д., Складнева Т.К.* Изменение концентрации тропосферного озона в зависимости от интенсивности солнечной радиации // *Оптика атмосфер. и океана*. 1999. Т. 12, № 8. С. 725–729.
15. *Белан Б.Д., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н.* Результаты 10-летнего мониторинга приземной концентрации озона в районе Томска // *Оптика атмосфер. и океана*. 2000. Т. 13, № 9. С. 826–832.
16. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Плотников А.П., Толмачев Г.Н.* Об аномально высоких приземных концентрациях озона в районе г. Томска в зимний период // *Оптика атмосфер. и океана*. 2001. Т. 14, № 4. С. 319–321.
17. *Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н.* Многолетняя изменчивость озона и аэрозоля в районе Томска и оправдываемость прогноза их среднегодовых концентраций на десятилетие // *Оптика атмосфер. и океана*. 2010. Т. 23, № 9. С. 772–776.
18. *Белан Б.Д.* Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 525 с.
19. *Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н.* Прогноз изменения концентрации озона и аэрозоля на основании предсказанного в 24-м цикле уровня солнечной активности // *Оптика атмосфер. и океана*. 2012. Т. 25, № 9. С. 778–783.
20. *Антохин П.Н., Белан Б.Д.* Регулирование динамики тропосферного озона через стратосферу // *Оптика атмосфер. и океана*. 2012. Т. 25, № 10. С. 890–895; *Antokhin P.N., Belan B.D.* Control of the dynamics of tropospheric ozone through the stratosphere // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 3. P. 207–213.
21. *Антохин П.Н., Белан Б.Д., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н.* Сравнение различных методов статистического прогнозирования суточной динамики приземной концентрации озона // *Оптика атмосфер. и океана*. 2013. Т. 26, № 12. С. 1082–1089.
22. *Антохин П.Н., Белан Б.Д., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н.* Сравнение различных методов статистического прогнозирования суточной динамики приземной концентрации озона // *Оптика атмосфер. и океана*. 2013. Т. 26, № 12. С. 1082–1089.
23. *Antokhina O.Yu., Belan B.D., Savkin D.E., Tolmachev G.N.* Dependence of the surface ozone concentration on the air temperature and conditions of atmospheric circulation in Western Siberia in the warm season (May–September) // *Proc. SPIE*. 2017. V. 10466. 11 p. DOI: 10.1117/12.2287736.
24. *Белан Б.Д., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н.* Зависимость образования озона в приземном слое от температуры воздуха // *Оптика атмосфер. и океана*. 2017. Т. 30, № 11. С. 971–979.
25. *Monks P.S.* A review of the observations and origins of the spring ozone maximum // *Atmos. Environ.* 2000. V. 34, N 21. P. 3545–3561. URL: [https://www.doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00129-1](https://www.doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00129-1) (last access: 24.04.2018).
26. *Seinfeld J.H., Pandis S.N.* Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. 3rd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2016. 1120 p.
27. *Sklyadneva T.K., Zhuravleva T.B., Davydov D.K., Kozlov A.V.* Analysis of ground-based and satellite observations of atmospheric gas pollutants over the territory of Tomsk region during period of forest fires in 2012 // *Proc. SPIE*. 2016. V. 10035–94. DOI: 10.1117/12.2248877.
28. *Paris J.-D., Ciaïa Ph., Nédélec Ph., Stohl A., Belan B.D., Arshinov M.Yu., Carouge C., Golitsyn G., Granberg I.G.* New insights on the chemical composition of the Siberian air shed from the YAK-AEROSIB aircraft campaigns // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2010. V. 91, N 5. P. 1–17.
29. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Ковалевский В.К., Плотников А.П., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н.* Многолетняя изменчивость тропосферного аэрозоля над Западной Сибирью // *Оптика атмосфер. и океана*. 2000. Т. 13, № 6–7. С. 627–630.
30. *Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н.* Прогноз изменения концентрации озона и аэрозоля на основании предсказанного в 24-м цикле уровня солнечной активности // *Оптика атмосфер. и океана*. 2012. Т. 25, № 9. С. 778–783.
31. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д.* Суточный ход концентрации микродисперсной фракции аэрозоля // *Оптика атмосфер. и океана*. 2000. Т. 13, № 11. С. 983–990.
32. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иелев Г.А., Козлов А.В., Козлов А.С., Малышкин С.Б., Симоненков Д.В., Антохин П.Н.* Нуклеационные всплески в атмосфере бореальной зоны Западной Сибири. Часть I. Классификация и повторяемость // *Оптика атмосфер. и океана*. 2014. Т. 27, № 9. С. 766–774.
33. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Козлов А.С., Аршинова В.Г.* Нуклеационные всплески в атмосфере бореальной зоны Западной Сибири. Часть II. Скорости образования и роста наночастиц // *Оптика атмосфер. и океана*. 2015. Т. 28, № 8. С. 730–737.
34. *Smith S.J., van Aardenne J., Klimont Z., Andres R.J., Volke A., Delgado Arias S.* Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005 // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11, N 3. P. 1101–1116.
35. URL: www.epa.gov/air-trends/sulfur-dioxide-trends (last access: 25.04.2018).
36. *Air quality in Europe – 2017 report*. European Environment Agency Reports, N 13. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. 74 p. DOI: 10.2800/850018.

37. Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Складнева Т.К., Фофанов А.В., Sasakawa M., Machida T. Влияние атмосферного блокирования в Западной Сибири на изменение концентрации метана в летний период // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 5. С. 393–403.
38. Andrews A.E., Kofler J.D., Trudeau M.E., Williams J.C., Neff D.H., Masarie K.A., Chao D.Y., Kitzis D.R., Novelli P.C., Zhao C.L., Dlugokencky E.J., Lang P.M., Crotwell M.J., Fischer M.L., Parker M.J., Lee J.T., Baumann D.D., Desai A.R., Stanier C.O., De Wekker S.F.J., Wolfe D.E., Munger J.W., Tans P.P. CO₂, CO, and CH₄ measurements from tall towers in the NOAA Earth System Research Laboratory's Global Greenhouse Gas Reference Network: Instrumentation, uncertainty analysis, and recommendations for future high-accuracy greenhouse gas monitoring efforts // Atmos. Meas. Tech. 2014. V. 7, N 2. P. 647–687. DOI: 10.5194/amt-7-647-2014.

D.K. Davydov, B.D. Belan, P.N. Antokhin, O.Yu. Antokhina, V.V. Antonovich, V.G. Arshinova, M.Yu. Arshinov, A.Yu. Akhlestin, S.B. Belan, N.V. Dudorova, G.A. Ivlev, A.V. Kozlov, D.A. Pestunov, T.M. Rasskazchikova, D.E. Savkin, D.V. Simonenkov, T.K. Sklyadneva, G.N. Tolmachev, A.Z. Fazliev, A.V. Fofonov. **Monitoring of atmospheric parameters: 25 years of observations at the TOR station of IAO SB RAS.**

In this paper, a history of the development, current state, and specifications of the first automated site established for atmospheric composition observations on the base of the Siberian Lidar Station of the IAO SB RAS in December 1992 are presented. The results of the analysis of long-term changes in air quality observed in the vicinity of the Tomsk Scientific Centre have revealed its noticeable deterioration occurred during the past 10 years.

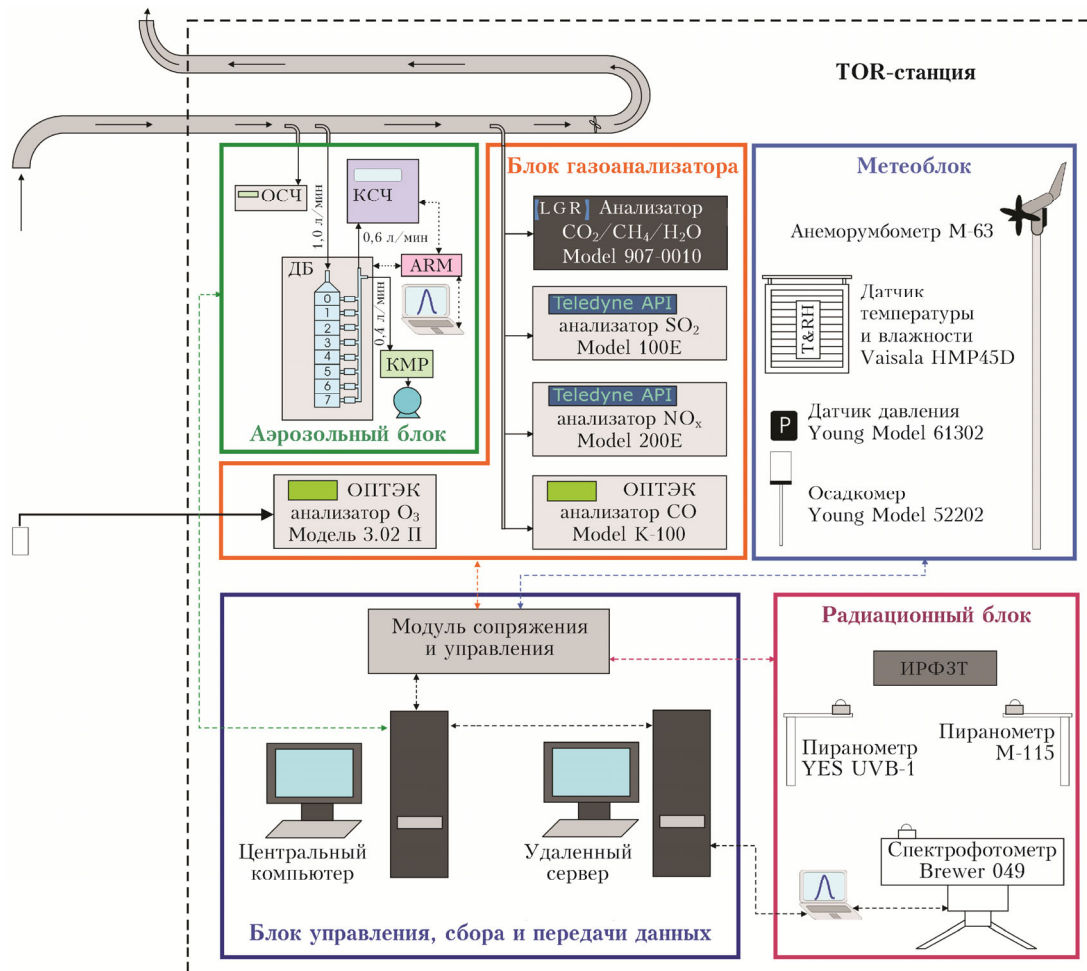


Рис. 1. Структурная схема TOR-станции по состоянию на 2018 г.: ОСЧ – оптический счетчик частиц GRIMM Model 1.109; КСЧ – конденсационный счетчик частиц; ДБ – диффузионная батарея; ARM – контроллер MCV2300 архитектуры Advanced RISC Machine; КМР – контроллер массового расхода воздуха HORIBA SEC-E40MK3; ИРФ3Т – индикатор радиационного фона

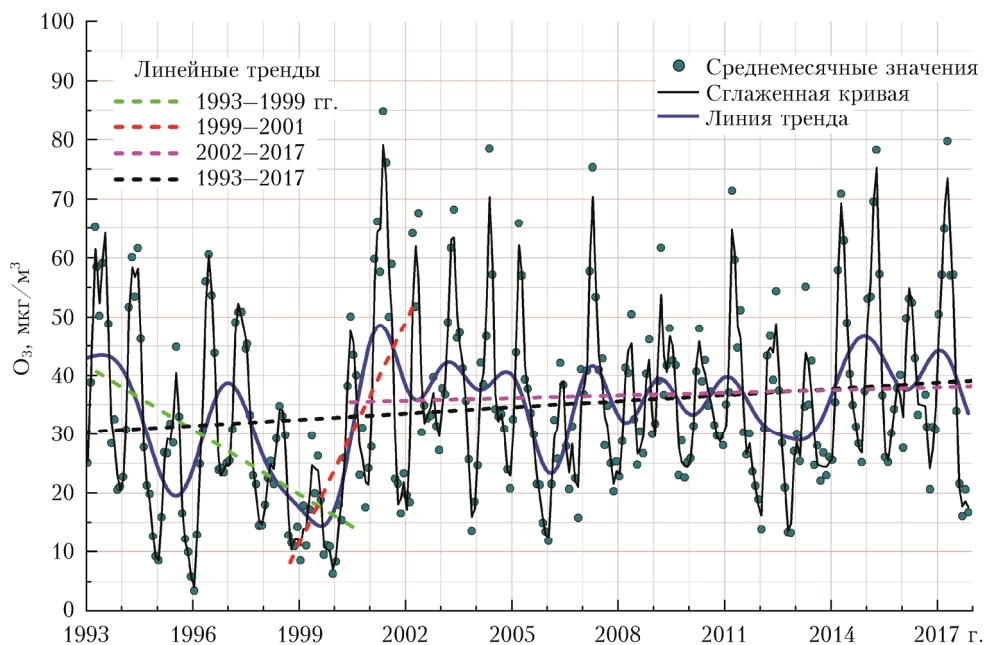


Рис. 2. Многолетний ход среднемесячных концентраций O₃, наблюдавшихся на TOR-станции с 1993 по 2017 г.

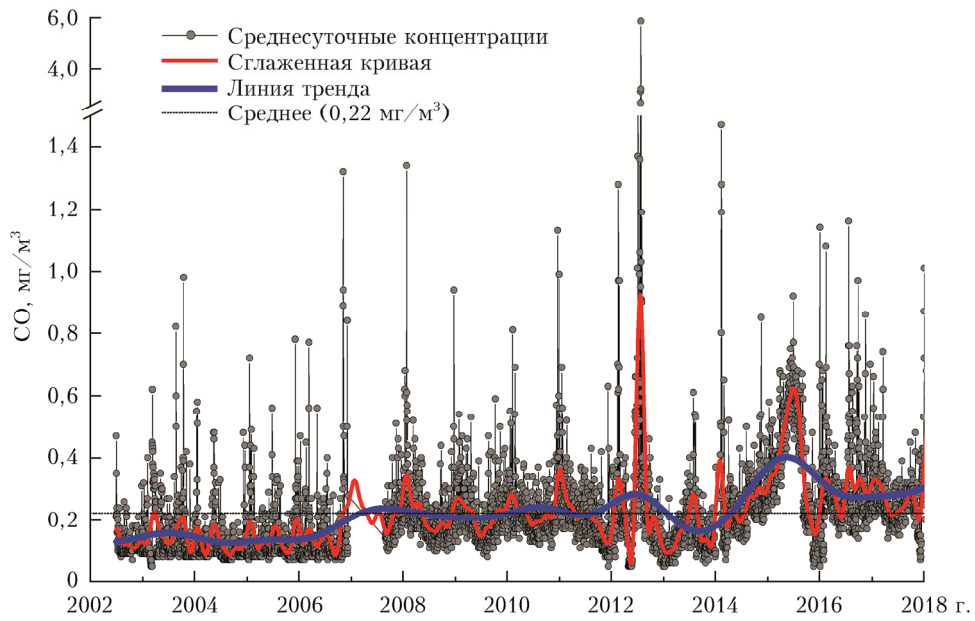


Рис. 3. Многолетний ход среднесуточных концентраций CO, наблюдавшихся на TOR-станции с 2002 по 2017 г.

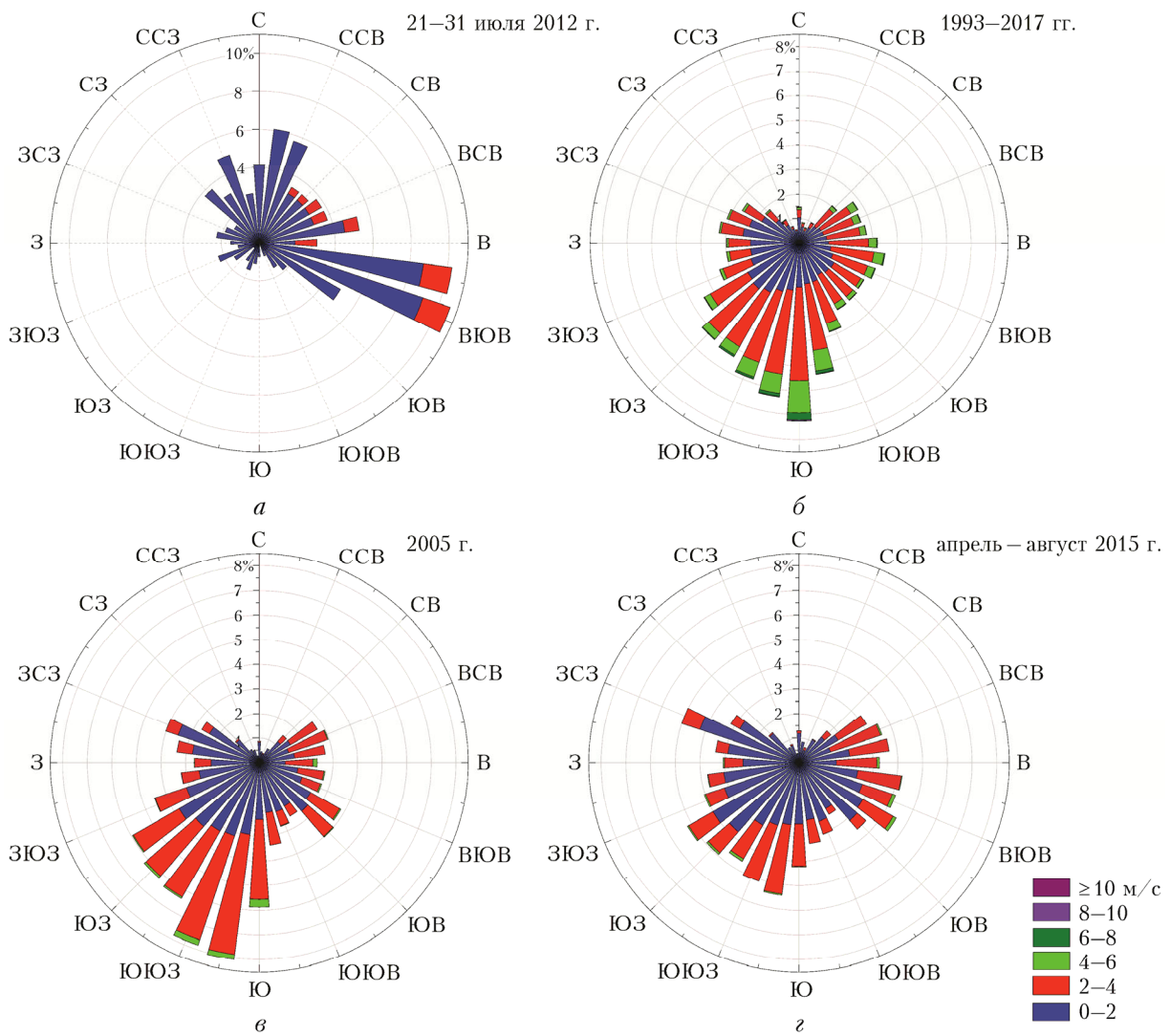


Рис. 4. Роза ветров в разные периоды наблюдений на TOR-станции

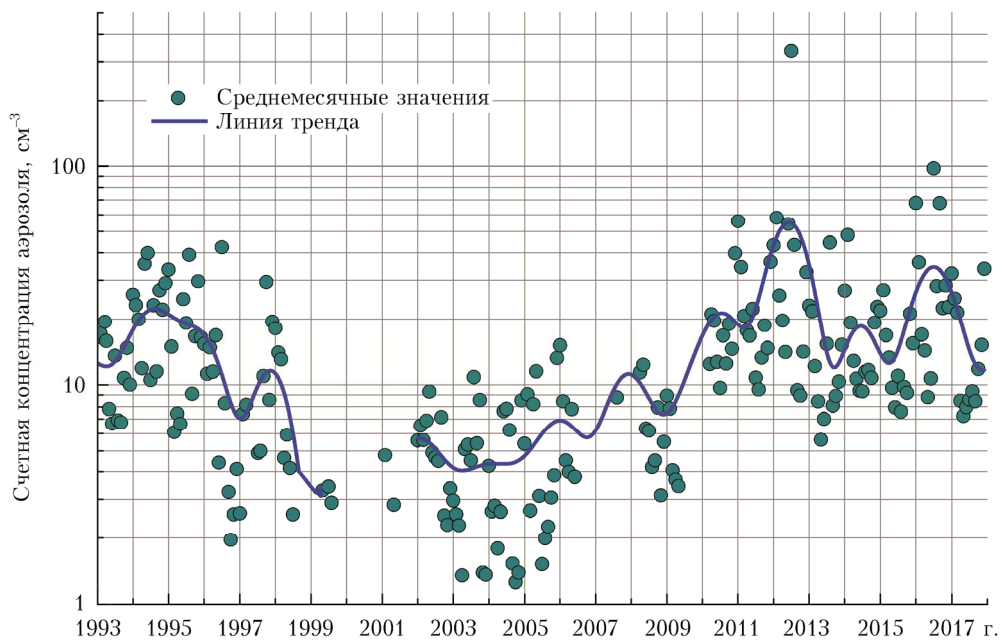


Рис. 5. Многолетний ход среднемесячных значений суммарной счетной концентрации аэрозольных частиц $D_p > 0,4 \mu\text{m}$ с 1993 по 2017 г.



Рис. 6. Многолетний ход среднесуточных концентраций SO_2 , наблюдавшихся на TOR-станции с 2012 по 2017 г.

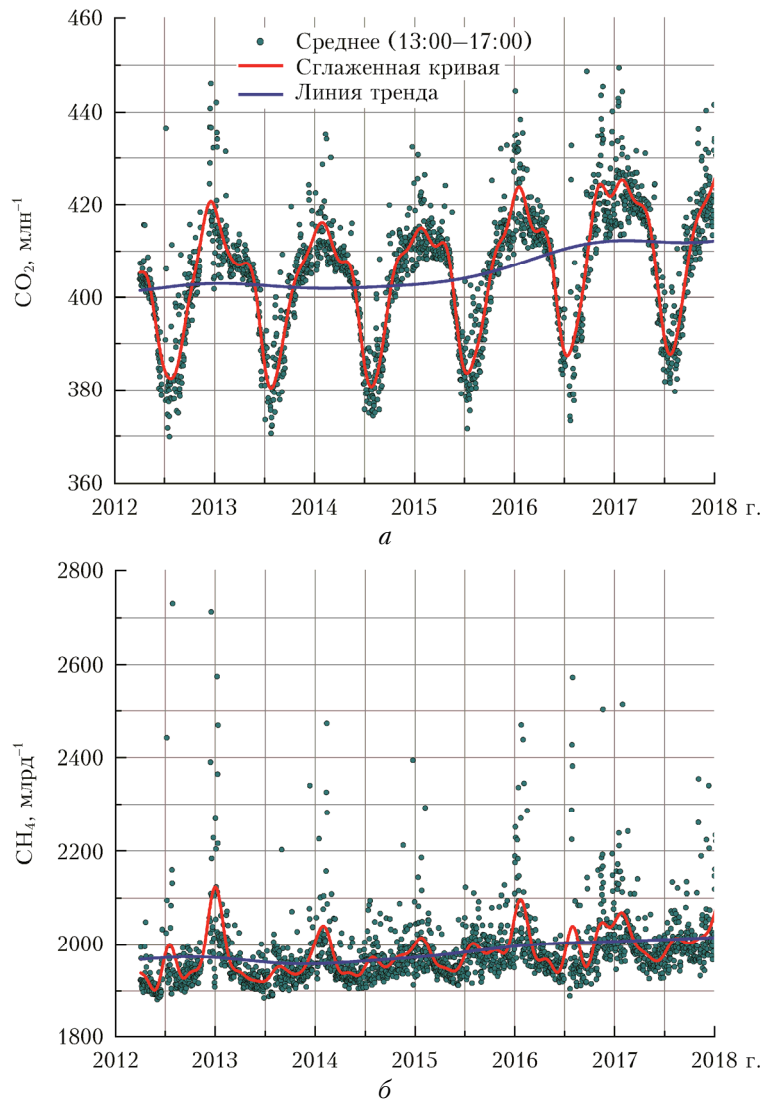


Рис. 7. Многолетний ход среднедневных (13:00–17:00) концентраций CO₂ (а) и CH₄ (б), наблюдавшихся на TOR-станции с 2012 по 2017 г.

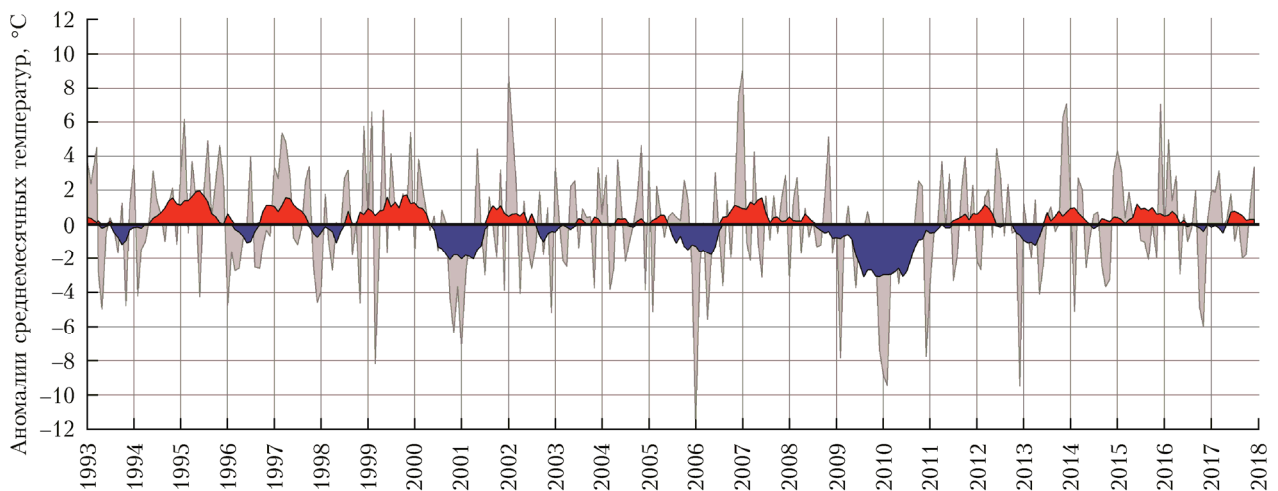


Рис. 8. Аномалии среднемесячных температур воздуха (область серого цвета) за 25 лет. Красные и синие области, ограниченные кривой 12-месячной скользящей средней, показывают периоды относительного потепления и похолодания соответственно