

УДК 546.217;551.510.411;614

ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА В ГОРОДСКОМ ВОЗДУХЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

© 2023 г. А. С. Гинзбург^а, А. А. Виноградова^а, Е. А. Лезина^б, М. А. Помелова^{а, в}

^аИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

^бГПБУ “Мосэкомониторинг”, ул. Новый Арбат, Москва, 121019 Россия

^вИнститут истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН,
ул. Балтийская, д. 14, Москва, 125315 Россия

*e-mail: gin@ifaran.ru

Поступила в редакцию 06.02.2023 г.

После доработки 01.03.2023 г.

Принята к публикации 26.04.2023 г.

В статье анализируются результаты измерения содержания кислорода в Москве в 2017–2021 гг. на трех автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) ГПБУ “Мосэкомониторинг”. Рассмотрены сезонные вариации содержания кислорода в городе, обсуждаются вопросы соответствия полученных значений шкале уровня комфортности для дыхания человека, разработанной специалистами-медиками, сравниваются данные измерений с результатами расчета концентрации кислорода в воздухе по величине метеорологических параметров. По данным измерений выявлены внутрисуточные вариации содержания O_2 в приземном воздухе города, более ярко выраженные в теплый сезон. Минимальное содержание O_2 наблюдается летом в ранние утренние часы.

Ключевые слова: кислород, приземный воздух, большой город, станции контроля загрязнения атмосферы, газоанализаторы, природные и антропогенные факторы

DOI: 10.31857/S0002351523040065, **EDN:** YNGQLA

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире растет озабоченность изменением содержания кислорода в верхнем слое Мирового океана и в приземном воздухе больших городов. Первому аспекту посвящено множество исследований, которые нашли свое отражение в Шестом оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата [IPCC, 2021].

Что касается содержания кислорода в городском воздухе, то этот вопрос изучен значительно менее подробно, хотя нехватка кислорода во время сильных волн жары давно волнует жителей мегаполисов и медицинских работников. В статье [Гинзбург и др., 2014] были рассмотрены экстремальные погодные условия лета 2010 года в Европейской части России и 2012 года в Сибири. При высокой температуре и высокой абсолютной влажности приземного воздуха в центральной части Европейской территории России и, особенно, в Москве летом 2010 года содержание кислорода в

атмосферном воздухе было минимально, и жители мегаполиса испытывали все признаки гипоксии.

В последние годы в мире стали появляться публикации (преимущественно китайских ученых), посвященные не только некоторому уменьшению содержания кислорода в приземном воздухе в условиях глобального потепления, но и более существенному снижению содержания кислорода в городской атмосфере [Kai Yin et al., 2015; Yun Wei et al., 2021].

Общеизвестно, что природные источники и стоки кислорода в течение последних тысячелетий поддерживают его постоянное процентное содержание в сухом воздухе у поверхности Земли на уровне 20.95%, что до недавнего времени считалось практически “мировой константой”.

Исследования последних десятилетий во многих странах, в первую очередь, в рамках “кислородной” программы Scripps Institution of Oceanography [Keeling and Manning, 2014; Keeling et al., 2021] показывают вполне заметное уменьшение содержания кислорода в приземном воздухе, имеющее четкую корреляцию с ростом содержания углекислого газа в атмосфере. Это уменьшение содержания кислорода уверенно фиксируется на станциях наблюдения, которые расположены в различных фоновых районах мира.

Статья подготовлена на основе устного доклада, представленного на IV Всероссийской конференции с международным участием “Турбулентность, динамика атмосферы и климата”, посвященной памяти академика А.М. Обухова (Москва, 22–24 ноября 2022 г.).

Таблица 1. Азот и кислород в сухом воздухе

Газ	Содержание по объему, %	Содержание по массе, %	Плотность на уровне моря при стандартном давлении, г/м ³
Азот	78.08	75.51	925.2
Кислород	20.95	23.14	283.5

Количество углекислого газа в атмосфере составляет сотые доли процента, и даже удвоение современного содержания CO₂ не может заметно влиять на содержание кислорода. Указанная выше корреляция объясняется тем, что при сжигании ископаемого топлива не только выделяется углекислый газ, но и потребляется кислород.

Кроме глобальных эффектов, обеспечивающих приблизительный баланс содержания кислорода в атмосфере в целом, содержание кислорода в приземном слое атмосферы города подвержено локальным, сравнительно короткопериодным вариациям (от внутрисуточных до сезонных). Они зависят от природных факторов (дыхание почвы и растений, метеорологические характеристики), а также от различных видов антропогенной деятельности, требующей расходования атмосферного кислорода (например, сжигание топлива), от специфики и/или интенсивности химических реакций в атмосфере.

Как отмечено в [Гинзбург и др., 2014] и последующих исследованиях ([Kai et al. 2015, Yun Wei et al., 2021] и др.), в городских агломерациях существуют дополнительные факторы снижения содержания кислорода в воздухе, связанные как с загрязнением городской атмосферы угарным газом, так и с наличием городского острова тепла.

В последние годы проблеме недостатка кислорода в воздухе больших городов стало уделяться значительное внимание. Приведем только два примера. Первый из них — регулярные измерения содержания кислорода в Москве на трех АСКЗА, которые ведутся с 2016 года. Второй — публикация статьи [Yun Wei et al., 2021] с показательным заголовком “Снижение уровня кислорода как новая проблема для глобальных городов (Declining Oxygen Level as an Emerging Concern to Global Cities)”.

В данной работе проанализированы результаты измерений содержания кислорода в Москве за последние годы и проведено их сравнение с расчетами по метеорологическим данным. Предварительные результаты этого анализа представлены в [Гинзбург и др., 2022].

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Несмотря на то, что кислород является жизненно важным элементом человеческого существования, исследование его изменчивости и последствий

этой изменчивости на здоровье и качество жизни людей остается весьма фрагментарным. Напомним основные факты о составе приземного воздуха.

Суммарная масса воздуха в атмосфере Земли $(5.1–5.3) \times 10^{18}$ кг. При этом масса сухого воздуха составляет 5.135×10^{18} кг, а разброс в суммарной массе определяется наличием водяного пара, масса которого в среднем оценивается примерно в 1.3×10^{16} кг. Молярная масса чистого сухого воздуха составляет 28.966 г/моль, плотность воздуха у поверхности моря в среднем равна 1.225 кг/м³, давление 1013.25 ГПа (760 мм рт. с.), температура +15°C в соответствии со стандартной атмосферой ISO 2533:1975 [ГОСТ 4401–81]).

Объемное и массовое содержания и плотность на уровне моря при стандартном давлении для азота и кислорода в составе сухого воздуха приведены в табл. 1.

Сезонные, суточные и непериодические изменения массового и процентного содержания основных газов в атмосфере определяются вариациями температуры, давления и влажности, при этом изменчивость содержания азота не влияет непосредственно на состояние человеческого организма, а изменчивость содержания кислорода в значительной мере определяет уровень комфортности погодных условий.

В силу сложившегося в традиционной медицине отношения к атмосферному кислороду как к практически неизменной величине, внимание к важному для здоровья человека фактору — изменчивости содержания кислорода в атмосферном воздухе — возникло только во второй половине XX века [Никберг и др., 1986]. Медики стали обращать внимание, что парциальное давление и соответственно массовое содержание кислорода существенно зависят от метеорологических условий и может изменяться на десятки процентов. Было отмечено, что при изменении концентрации кислорода в воздухе от 260 до 320 г/м³ количество кислорода, поступающего в организм человека за сутки, меняется от 500 до 1300 г [Никберг и др., 1986].

Для жизни человеку важна парциальная плотность кислорода в приземной атмосфере, которая в среднем составляет около 285 г/м³ и определяется уравнением состояния для сухой части воздуха:

$$\rho = C_k (P - e) / RT, \quad (1)$$

где ρ — парциальная плотность кислорода, $C_k = 0.2315$ г/м³ — содержание кислорода в сухом

Таблица 2. Типы “кислородной” погоды

Тип “кислородной” погоды	Плотность кислорода, г/м ³	Содержание кислорода в %
Благоприятная	280–290	20.7–21.4
Условно неблагоприятная	270–280	20.0–20.7
Неблагоприятная	<270	<20.0

воздухе, P , T и e — соответственно давление, температура и давление водяного пара в воздухе, R — газовая постоянная.

Таким образом, в зависимости от метеорологических условий содержание кислорода во вдыхаемом человеком воздухе падает при понижении давления и росте температуры. Поэтому его минимальных значений следует ожидать в теплое время года как при циклональных условиях, например, перед грозой, так и при высокой абсолютной влажности. В такие периоды у многих людей возникает ощущение затрудненного дыхания. В медицине разработана классификация типов погоды по воздействию на самочувствие человека, среди критериев которой используется и концентрация кислорода. В этом случае выделяют погоду трех основных типов [Овчарова, 1988], представленных в табл. 2.

В 70–80-е годы XX века в СССР была разработана схема количественной оценки погодных условий с медицинской точки зрения, включающая три типа “кислородной” погоды — благоприятная с парциальной плотностью кислорода около 285 ± 5 г/м³, условно неблагоприятная — с парциальной плотностью кислорода 270–280 г/м³ и неблагоприятная — с парциальной плотностью кислорода ниже 270 г/м³ [Овчарова, 1981; Овчарова, 1988].

Надо отметить, что среди этих типов погоды не рассматриваются ситуации с повышенным содержанием кислорода, хотя в ряде работ было обращено внимание на негативное воздействие на здоровье и самочувствие человека высокого содержания кислорода в воздухе, особенно зимой и в высоких широтах. В последние десятилетия тема проблемы дыхания в холодную погоду при повышенном содержании кислорода также стала предметом научных дискуссий.

Вслед за медиками внимание на содержание, источники и стоки атмосферного и океанического кислорода стали обращать геофизики и климатологи. В Шестом оценочном докладе МГЭИК [IPCC, 2021] выражается большая обеспокоенность “быстрым” ростом “кислородного голодания” Мирового океана, обусловленным глобальным потеплением. В этом докладе отмечается, что прогнозируемый рост среднего глобального значения приповерхностной температуры воздуха (SST) приведет к превышению пороговых значений ряда факторов, представляющих опасность

для морских экосистем (этому прогнозу в [IPCC, 2021] приписывается средняя достоверность). Согласно прогнозам, дневные волны морской жары увеличатся, особенно в тропической части Мирового океана и Северном Ледовитом океане (высокая достоверность по мнению авторов [IPCC, 2021]). Практически несомненно, что разсолнение верхних слоев океана будет продолжать увеличиваться в XXI веке. Дальнейшее потепление океана, скорее всего, будет способствовать развитию гипоксических зон, причем такое сокращение кислорода, как ожидается, сохранится в течение тысяч лет.

Что касается атмосферного кислорода, то в Шестом оценочном докладе МГЭИК [IPCC, 2021] вскользь отмечается, что глобальное потепление увеличивает количество водяного пара в атмосфере и соответственно уменьшает долю кислорода в атмосферном воздухе.

Насколько известно авторам данной статьи, в моделях земной системы не рассчитывается содержание кислорода в атмосфере, но в ряде статей, например [Huang J. et al., 2018], строятся проекции потоков и баланса кислорода в земной климатической системе на основе проекций потребления энергии, эмиссии парниковых газов и трансформаций океанической и наземной биоты. Потребление кислорода при сжигании ископаемого топлива в [Huang et al., 2018] и в ряде других работ рассчитывается по соотношениям, приведенным в статье [Keeling, 1988]. В [Huang et al., 2018] отмечается, что с 1900 по 2015 год ежегодное снижение содержания кислорода в атмосфере выросло с 2 до 38 Гт. По оценкам авторов этой статьи, даже для самого “агрессивного” сценария семейства Representative Concentration Pathways — RCP8.5, по которому потери атмосферного кислорода в XXI веке составят в среднем примерно 100 Гт в год, а концентрация кислорода в воздухе снизится от современных 20.946% до 20.825%. Такое снижение пока не представляет опасности нехватки кислорода для дыхания [Martin et al., 2017; Livina et al., 2020; Gattuso et al., 2021].

Специалисты по охране здоровья и горноспасатели (например, Управление по охране труда США, Occupational Safety and Health Administration, OSHA [Bollinger, Schutz, 1987]) считают, что оптимальный диапазон содержания кислорода в воздухе для человека составляет от 19.5 до 23.5%. Серьезные побочные эффекты по оценке OSHA могут возникнуть, если уровень кислорода выхо-

дит за пределы безопасной зоны. При концентрации кислорода от 16 до 19.5% и физической активности клетки человеческого организма перестают получать достаточно кислорода. При концентрации кислорода от 10 до 14% у человека нарушаются психические функции и организм при любой физической нагрузке истощается. Люди не могут выживать при уровне кислорода ниже 6%.

Аналогичные пороговые значения содержания кислорода приводятся и в ГОСТ Р 22.9.02–95 “Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Режимы деятельности спасателей, использующих средства индивидуальной защиты при ликвидации последствий аварий на химически опасных объектах” [ГОСТ 4401–81].

Уровень кислорода выше нормального не так опасен для жизни, но при очень высоких концентрациях кислорода во вдыхаемом воздухе люди могут испытывать побочные эффекты. Очень высокий уровень кислорода приводит к образованию окислительных свободных радикалов, которые воздействуют на ткани и клетки организма и могут вызывать подергивание мышц.

В ряде работ последних лет [Huang et al., 2018; Yun Wei et al., 2021] показано, что урбанизированные территории мира, занимающие менее 4% поверхности суши Земли, используют почти 40% всего потребляемого на Земле кислорода (14.3 ± 1.5 Gt/yr). Эти оценки также базируются на соотношениях, приведенных в [Keeling, 1988], где описана высокая отрицательная корреляция ($r = -0.99$) изменений содержания углекислого газа и кислорода в приземном воздухе Кембриджа (Массачусетс, США) по данным натурных измерений 25 и 26 октября 1986 года.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Строго говоря, понятие “парциальное давление” применимо только к идеальным газам. Молярное парциальное давление i -го компонента газовой смеси с общим давлением p равно: $p_i = N_i p$, где N_i – отношение числа молей данного компонента к сумме молей всех компонентов смеси. Парциальное давление непосредственно измерить нельзя, его вычисляют, исходя из общего давления и состава смеси.

Поскольку процентное содержание кислорода в атмосферном воздухе достаточно велико, а его изменения относительно малы, точные измерения парциального давления и парциальной плотности кислорода требуют специального оборудования и методик. В большинстве случаев измеряется не собственно содержание кислорода, а его отношение к содержанию азота (N_2). При этом явно или неявно предполагается, что содержание азота в атмосферном воздухе неизменно или его изменениями можно пренебречь на основании

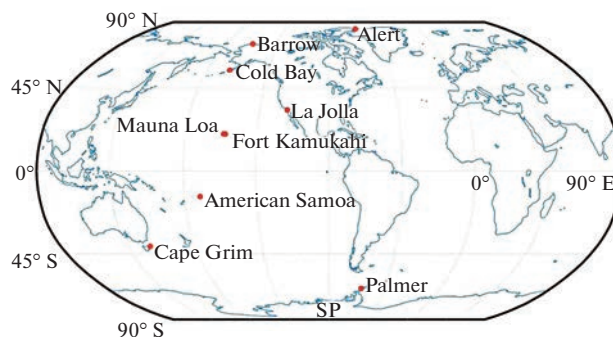


Рис. 1. Расположение основных станций наблюдений за соотношением содержанием кислорода и азота в атмосфере (по данным портала <http://scrippsco2.ucsd.edu/>).

меньшей относительной изменчивости по сравнению с кислородом (азота в воздухе почти в 4 раза больше, чем кислорода).

В последние десятилетия прецизионные измерения отношения O_2/N_2 в приземном воздухе проводятся на станциях атмосферного мониторинга (рис. 1), расположенных в различных регионах мира [Steinbach, 2010; Keeling, Manning, 2014; Keeling et al., 2021]. Эти измерения показывают медленное, но постоянно ускоряющееся снижение содержания кислорода по отношению к содержанию азота в пробах приземного воздуха на всех станциях наблюдения.

В большинстве случаев, измерения производятся путем отбора атмосферного воздуха в герметичные фляжки с последующим анализом проб различными методами в специальных сертифицированных лабораториях (спектроскопический метод дает наиболее точные результаты). Существуют и более оперативные методы определения отношения O_2/N_2 *in situ*, они обладают значительно меньшей точностью, но позволяют получать информацию с лучшим временным и пространственным разрешением.

Службы мониторинга состава воздуха в городах обычно не измеряют ни плотность, ни процентное содержание кислорода, по-видимому, из-за неявного предположения малого влияния изменения метеоусловий на его содержание. Кроме того, измерение малых изменений содержания кислорода в приземном воздухе является достаточно сложной технической задачей. Большинство современных приборов ориентированы на измерение существенных отклонений содержания кислорода от нормы в рабочих и жилых помещениях.

Измерения содержания кислорода в приземном воздухе Москвы в тестовом режиме проводятся с начала XXI века, а с середины 2016 года ведутся регулярные измерения на трех автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) ГПБУ “Мосэкомониторинг” (рис. 2),

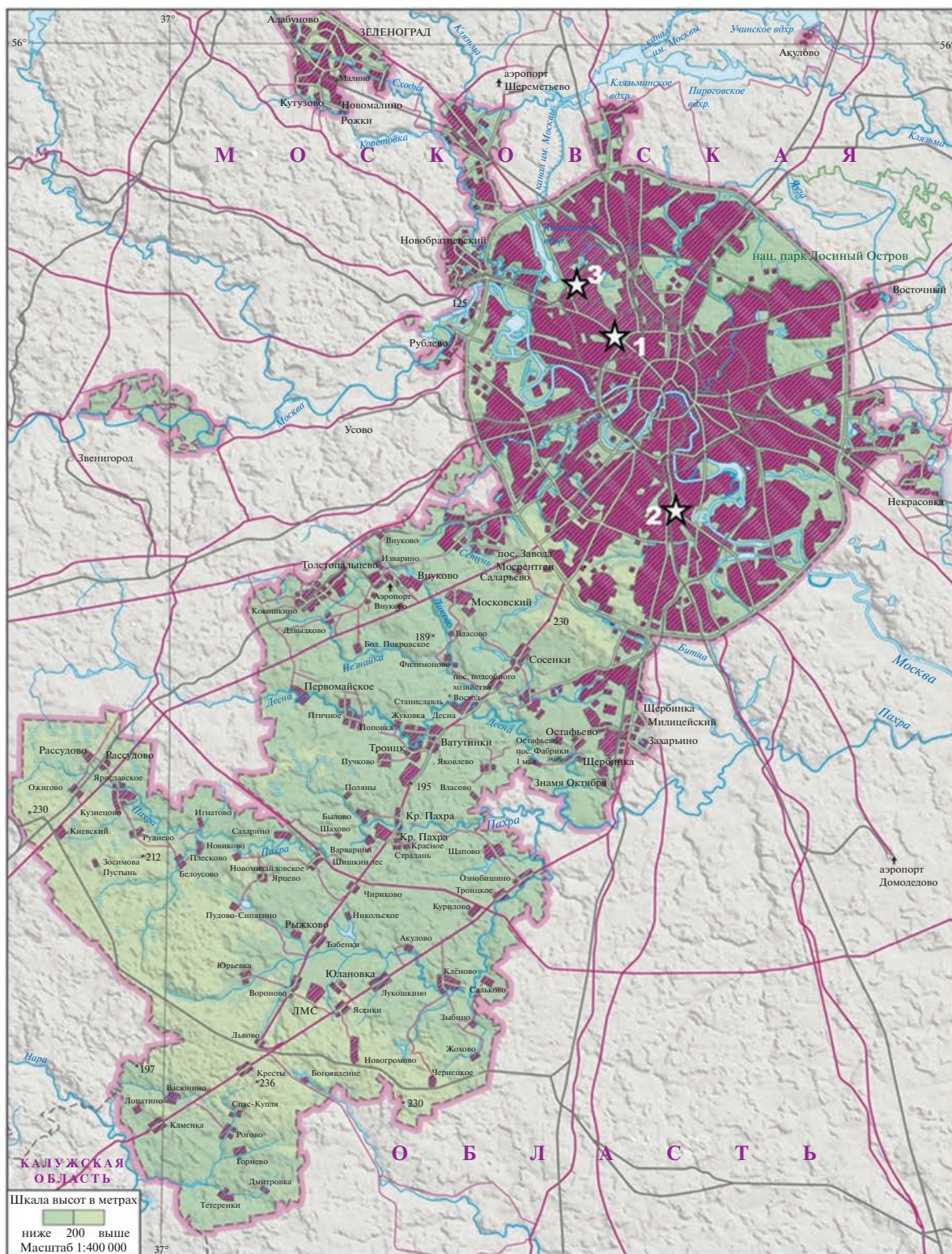


Рис. 2. Карта Москвы с АСКЗА, измеряющими содержание кислорода (отмечены звездочками): МАДИ (1), Черемушки (2), Туристская (3).



Рис. 3. Газоанализатор Т802.

которые расположены в разных районах города – вблизи от автомагистрали (1) и на территориях жилой застройки (2) и (3).

Для измерений процентного содержания кислорода ГПБУ «Мосэкомониторинг» применяет анализаторы Т802 (рис. 3) с магнитомехани-

ским датчиком, использующим парамагнитные свойства молекулы кислорода. Содержание O_2 (в %) регистрируется регулярно, с интервалом 20 мин.

Газоанализатор Т802 предназначен для автоматического непрерывного измерения содержания кислорода (O_2) и двуокси углерода (CO_2) в атмосферном воздухе, в воздухе рабочей зоны, в технологических газовых смесях и промышленных выбросах. Основная абсолютная погрешность измерения процентного содержания кислорода ($\pm 0.3\%$), дополнительная погрешность на каждые $10^\circ C$ в долях основной погрешности (± 0.5).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Данные измерений на трех АСКЗА в Москве (рис. 4а) хорошо описывают годовой ход и межгодовую изменчивость содержания кислорода в городском воздухе, определяемую метеопараметра-

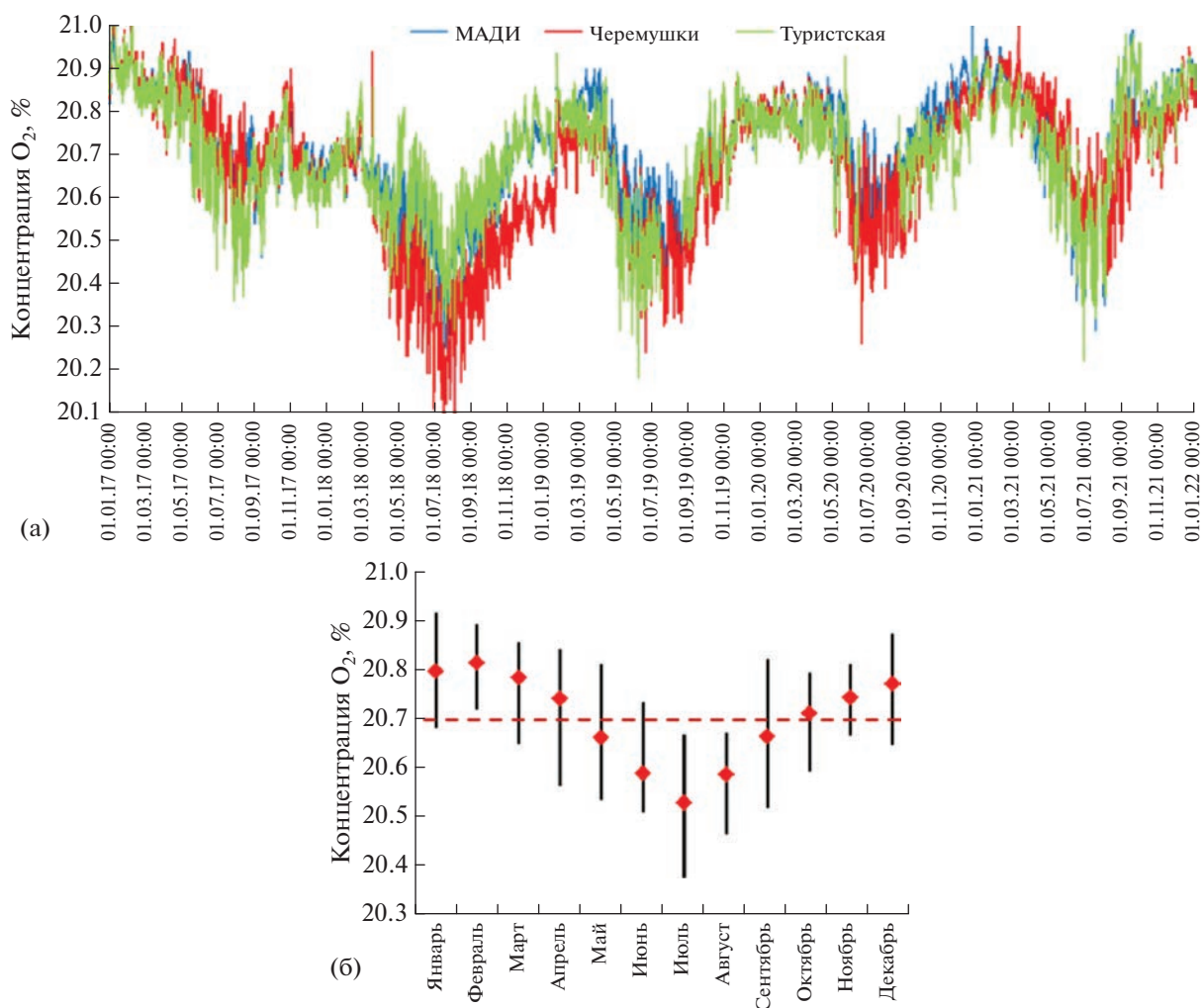
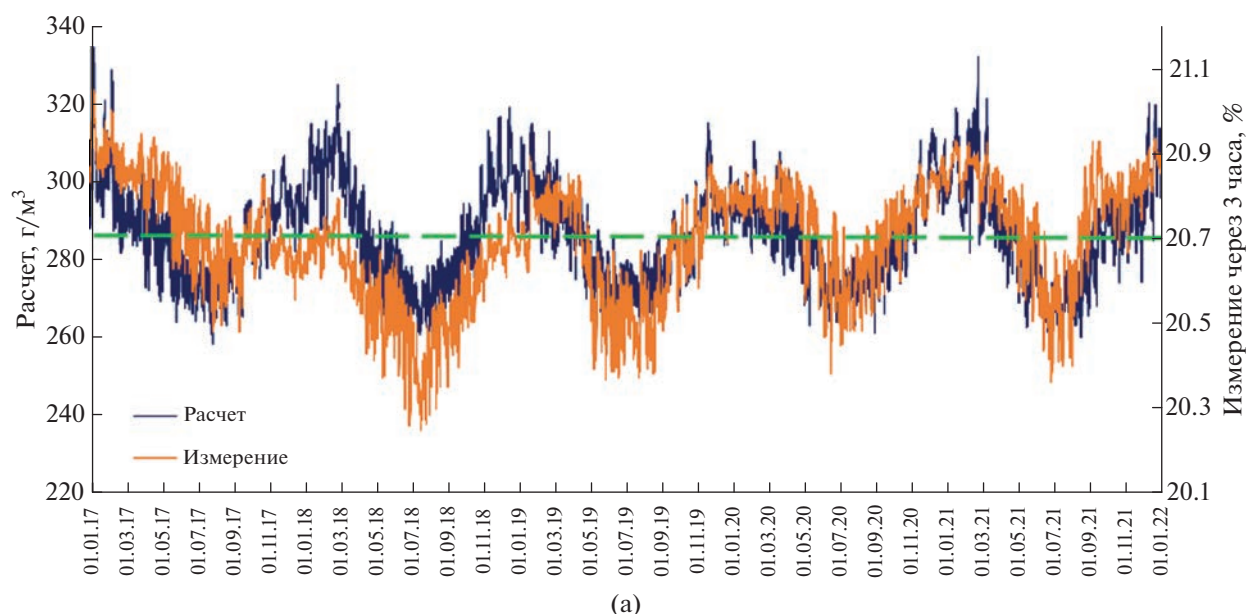
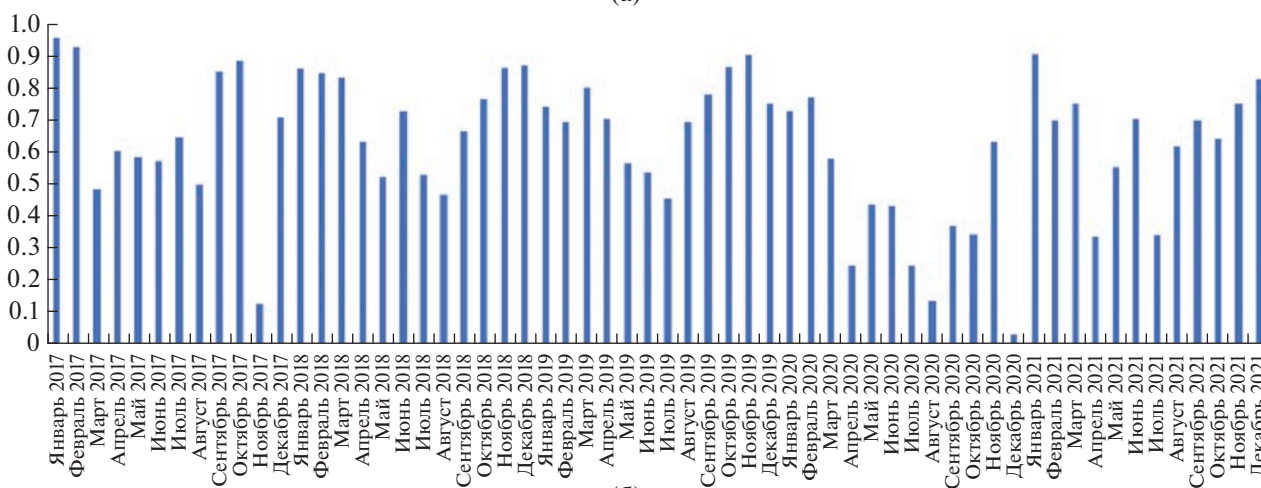


Рис. 4. Концентрация кислорода в приземном воздухе в Москве: а – исходные данные измерений на трех АСКЗА (интервал значений 20 мин); б – средний сезонный ход и размах значений от максимума до минимума, пунктир – средняя концентрация O_2 за 5 лет.



(a)



(б)

Рис. 5. Сравнение расчетов и измерений: а – концентрация кислорода, рассчитанная по метеорологическим данным (интервал 3 ч) и по результатам измерений (среднее по трем АСКЗА для сроков метеоданных); б – коэффициент корреляции (расчет-измерение) для каждого месяца. Пунктир – совмещенный уровень средних измеренных и рассчитанных значений за 5 лет.

ми и их вариациями в течение года. Коэффициент корреляции между показаниями приборов на разных станциях за год 0.80–0.95. Это позволяет далее анализировать средние (по трем станциям) значения концентрации кислорода в Москве. Средний сезонный ход концентрации O_2 (рис. 4б) показывает, что уровень содержания кислорода в Москве в среднем вполне комфортный для жизни (табл. 2), хотя в летнее время в отдельные годы могут возникать проблемы из-за нехватки кислорода.

Поскольку концентрацию кислорода в атмосфере можно рассчитать по формуле (1), интересно сравнить данные измерений в Москве с результатами таких расчетов по метеорологическим

данным метеостанции Балчуг, расположенной в центре Москвы [https://weatherarchive.ru/Pogoda/Moscow; http://rp5.ru]. Рисунок 5 показывает хорошее качественное соответствие этих величин, величина коэффициента корреляции между измеренными и рассчитанными значениями концентрации – (за каждый месяц по данным через 3 ч, в соответствии со сроками метеоданных) представлен на рис. 5б. В большинстве случаев, особенно в холодное время года, корреляция между величинами концентрации O_2 , рассчитанными и измеренными, значима и высока (коэффициент 0.65–0.95), но в отдельные месяцы, особенно в теплое время, она отсутствует. Это указывает на важную роль даже в городе природных процессов,

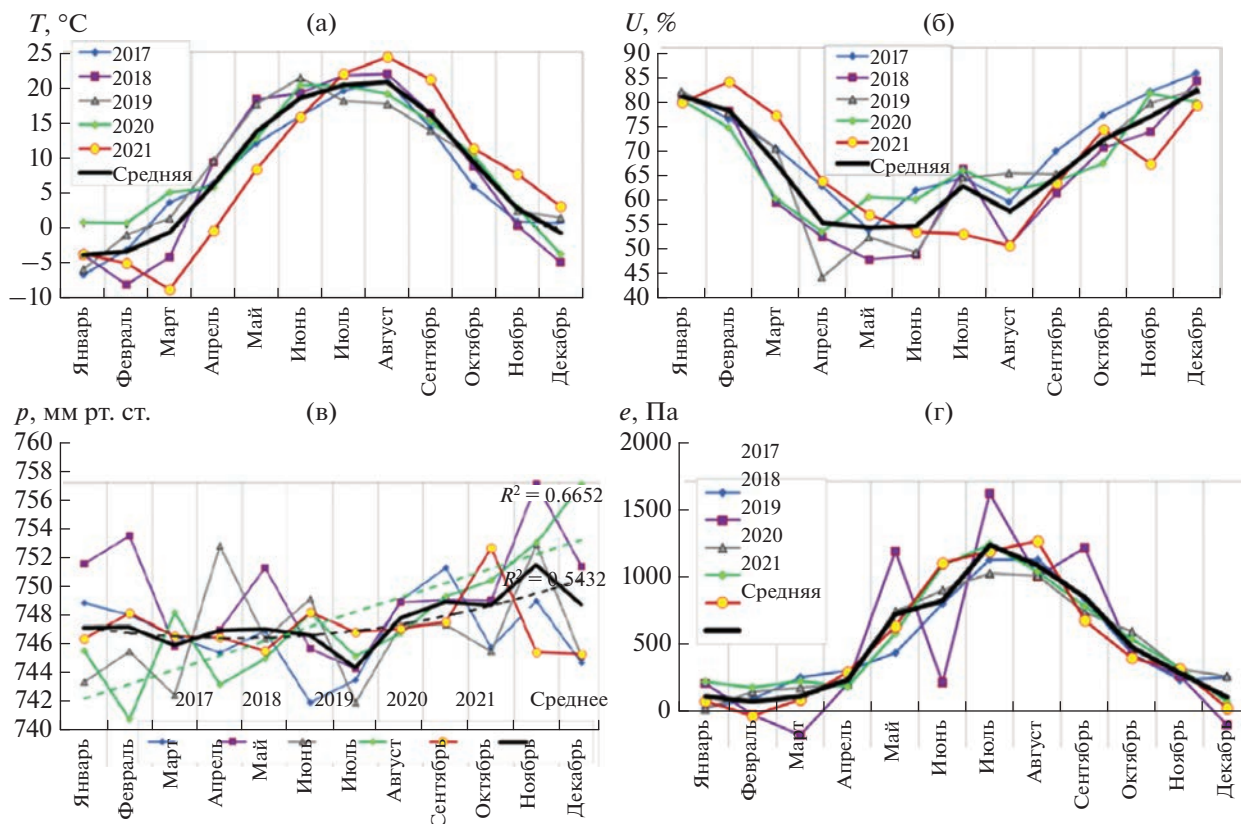


Рис. 6. Значения метеопараметров в приземной атмосфере Москвы в 2017–2021 годах: а – температура; б – относительная влажность; в – атмосферное давление, пунктирные линии – тренды, аппроксимирующие среднее давление и данные 2020 года; г – давление водяного пара (абсолютная влажность).

не учтенных формулой (1), сопровождающихся эмиссией и поглощением O_2 на поверхности почвы и на растениях.

На рис. 5а выделяются годы 2018, 2019 и 2021, когда летом измеренная величина содержания кислорода в атмосфере города была заметно ниже уровня комфортности (табл. 1), и условия существования населения попадали в диапазон “условно некомфортных”.

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В МОСКВЕ В 2017–2021 ГОДАХ

Хорошо известна высокая межгодовая изменчивость метеоусловий в средних широтах. Рассмотрим подробнее те параметры, которые определяют концентрацию кислорода в воздухе (формула (1)), по рис. 6.

Температура воздуха (рис. 6а) имеет естественный годовой ход с максимумом в летнее время. Однако она была аномально высокой (положительной) все зимние месяцы сезона 2019–20 годов, опускаясь, наоборот, в 2021 году до минимума в марте. Годовой максимум температуры в летние месяцы приходился на август (2017), июль–август (2018), июнь (2019), июнь–июль (2020), аномаль-

но жаркий август (2021), за которым последовали очень теплые месяцы этого года.

Атмосферное давление (рис. 6в) в течение года менялось хаотично, будучи в среднем выше во второй половине года, чем в первой. Исключение и редкую аномалию представил 2020 год, когда среднемесячная величина давления достоверно росла в течение всего года.

Гладкий сезонный ход величины абсолютной влажности воздуха был нарушен во все сезоны 2018 года, особенно заметно в теплое полугодие. При этом для относительной влажности в 2017–2020 годах характерен локальный максимум в июле, которого не было только в 2021 году, хотя в этом году образовался локальный минимум в ноябре. Годовой максимум абсолютной влажности приходится на июль, что часто соответствует максимуму температуры воздуха и приводит, в соответствии с формулой (1), к ежегодному падению в этот месяц концентрации кислорода в приземной атмосфере (рис. 4, 5).

Сопоставление формулы (1) с графиками рис. 6 и 7 позволяет качественно понять, какой из параметров отвечает за особенности отдельных месяцев в поведении концентрации кислорода в течение рассматриваемых лет. Все значимые (в отно-

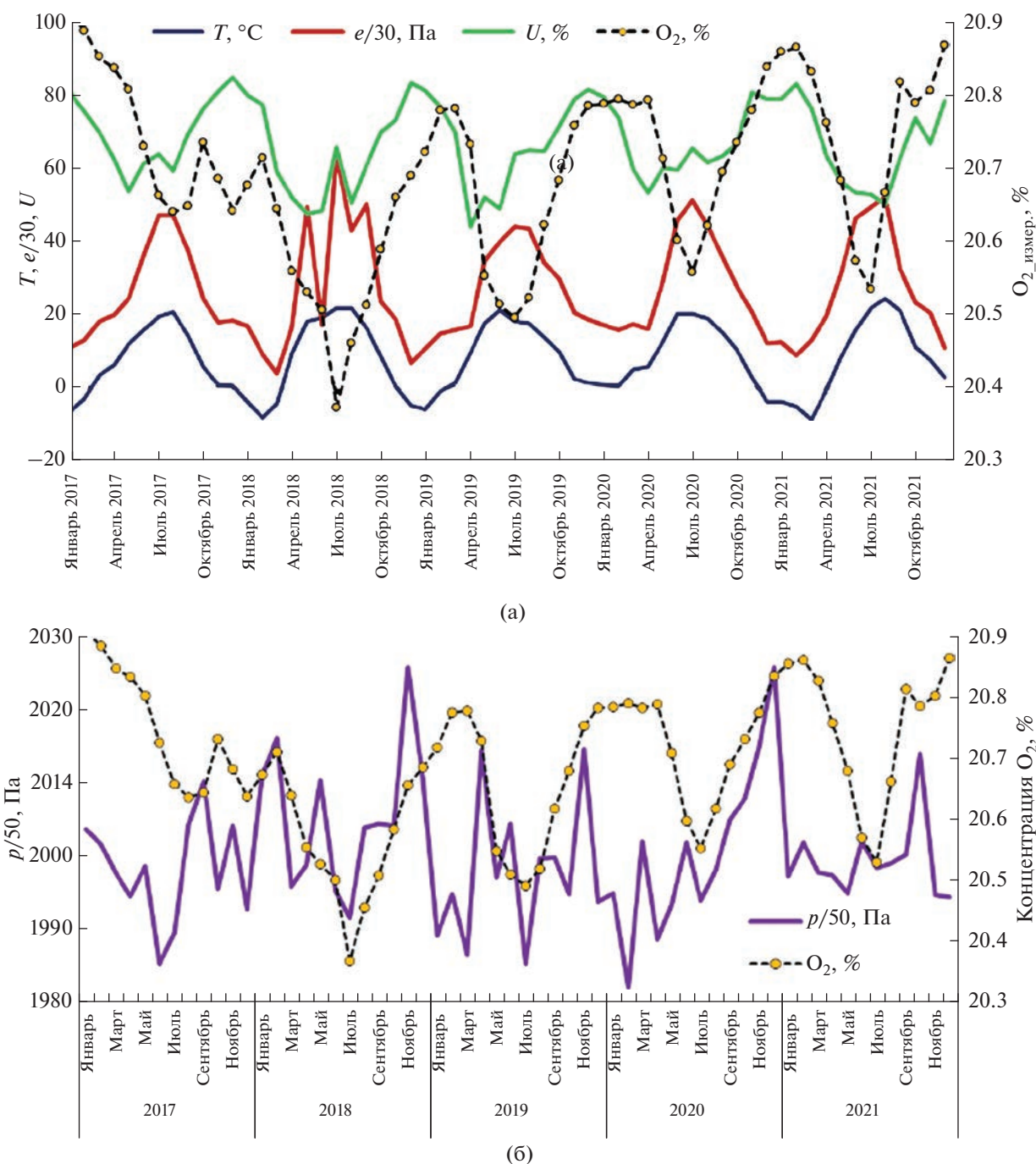


Рис. 7. Последовательная развертка по годам ежемесячных значений: а – температуры, относительной и абсолютной влажности и концентрации O_2 ; б – давления и концентрации O_2 .

шении комфортности для дыхания, табл. 1) минимумы концентрации O_2 в приземном воздухе Москвы (2018, 2019 и 2021 годов) приходятся на жаркие месяцы с невысоким атмосферным давлением и повышенным давлением водяного пара. Однако, как видно из рис. 7 и 6б, в 2018 году сильно сказалась аномалия величины абсолютной влажности, в 2019 году было очень низкое давление при самых невысоких (за 5 лет) значениях

температуры воздуха и абсолютной влажности, в 2021 году – самое жаркое (из рассмотренных) лето с высокой абсолютной влажностью.

Таким образом, измерения концентрации кислорода в приземной атмосфере не дают существенно новой информации о ее уровне в холодную часть года. В это время можно оценивать содержание O_2 по метеоданным. Наоборот, в теплую половину года на концентрацию кислорода в

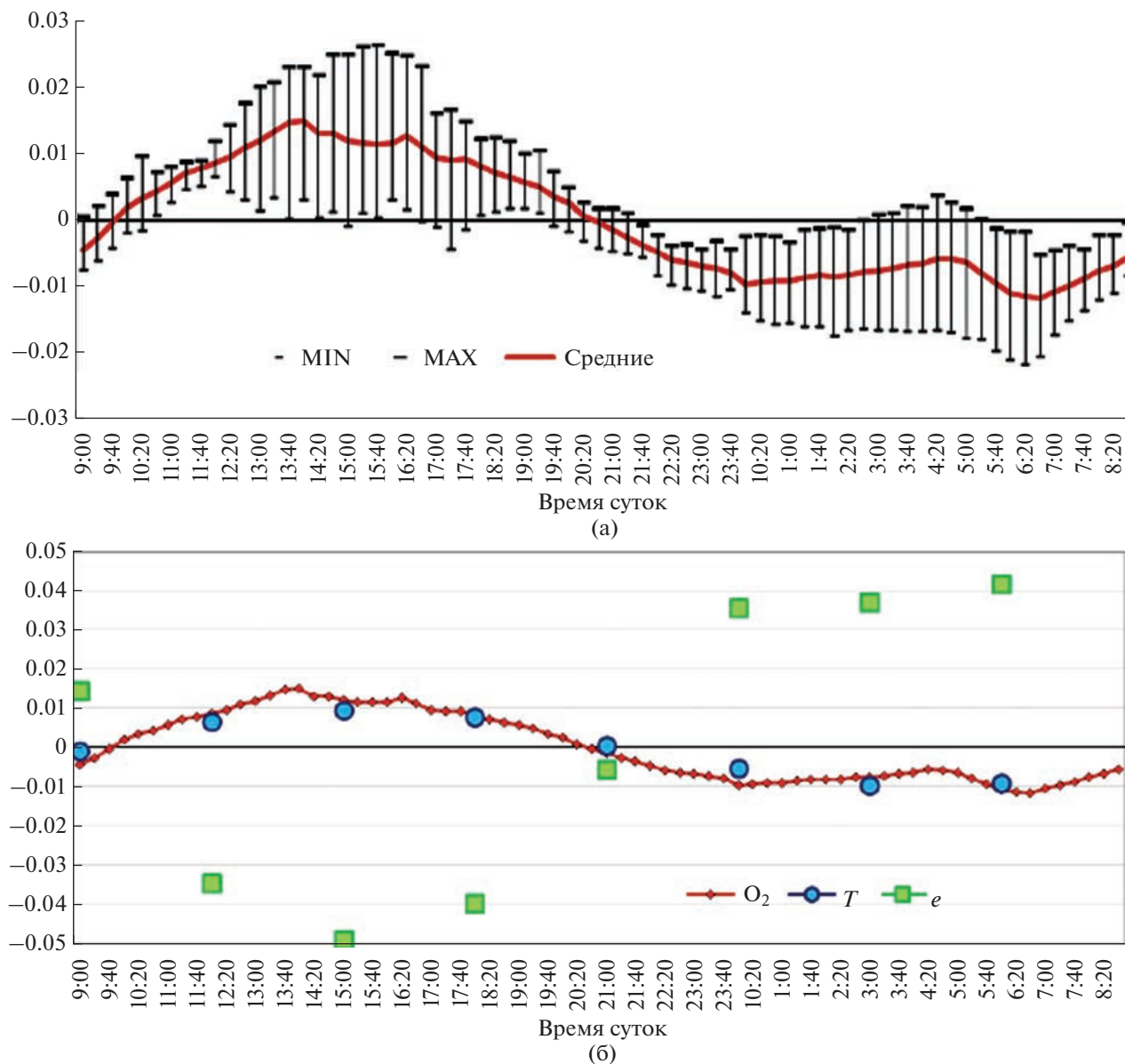


Рис. 8. Внутрисуточные вариации в приземном воздухе в Москве в июле: а — концентрации кислорода, межгодовой разброс от минимума до максимума; б — кислорода, температуры и абсолютной влажности. Представлено среднее (за 5 лет) отклонение от среднемесячного значения (отн. ед.) каждой переменной.

приземной атмосфере значимо влияют процессы газообмена на границе атмосфера-поверхность, которые не учитываются формулой (1), и измерения позволяют получить важную информацию не только об уровне содержания кислорода, но и процессах его формирования.

СУТОЧНЫЙ ХОД КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА В ПРИЗЕМНОМ ВОЗДУХЕ

По данным измерений, в Москве в теплое время года проявляется хорошо выраженный суточный ход концентрации кислорода в приземном воздухе с максимумом в дневное время и минимумом в предутренние часы (рис. 8а). Именно измерение

концентрации O_2 с достаточно высоким временным разрешением (20 мин) позволило обнаружить это явление, поскольку временное разрешение расчетов по метеоданным (через 3 ч) слишком грубо.

Сравним возможные механизмы формирования внутригодовой и внутрисуточной изменчивости концентрации кислорода в приземном воздухе Москвы. Измерения в Москве дают среднее за 5 лет значение концентрации кислорода ($\pm$ среднеквадратичное отклонение), равное $20.70 \pm 0.12\%$. Этот уровень задается глобальным распределением кислорода в атмосфере в пределах климатической зоны и должен быть примерно постоянным на значительной территории Восточно-европей-

ской равнины. Эта величина в локальном масштабе модулируется химией в приземной атмосфере, особенно специфичной в городе, а также источниками и стоками кислорода на поверхности (растительность, почва) — в разной степени в течение всего года.

Как уже отмечалось, минимальные значения концентрации O_2 в теплое время года могут быть обусловлены высокой температурой воздуха и почвы, длинным световым днем, обилием зелени, высоким уровнем солнечной радиации и т.д., а максимальные значения в холодные месяцы — противоположными природными условиями. Зимой почва закрыта снегом, зелени почти нет. Кислород дополнительно в атмосферу почти не поступает, но расходуется на антропогенные процессы сжигания топлив и химические реакции в атмосфере, хотя в холодном воздухе все реакции замедлены. В течение суток эта картина мало меняется. Летом зелень и почва продуцируют кислород, но и поглощают его. Химические реакции в воздухе и на поверхности идут быстро, среднемесячный уровень O_2 в воздухе в целом ниже по сравнению с зимой, но изменчивость концентрации O_2 высока. Корреляции измеренных значений с расчетами практически нет, поскольку большой вклад в эмиссию и стоки кислорода определяют процессы на поверхности, зависящие от температуры и влажности, но не описываемые формулой (1).

Теперь обратимся к внутрисуточному ходу концентрации кислорода в воздухе в теплые месяцы, поскольку в холодные месяцы он практически отсутствует. В теплое время года, при минимальном за год общем содержании O_2 в приземном воздухе, регистрируется его дополнительное понижение (по сравнению со средним значением) ночью и рано утром (рис. 8а), когда темно и холодно, и максимальные величины — днем, когда тепло и светло. Таким образом, по отношению к температуре воздуха, внутрисуточные и внутригодовые вариации концентрации кислорода — это вариации противоположных знаков. Летом круглые сутки растения и почва работают как источники и стоки O_2 . По-видимому, стоки в почву работают и в темноте, но при самой низкой температуре в течение суток может иметь место понижение почвенной эмиссии кислорода в ходе химических превращений. Обычно летом в эти же предутренние часы наблюдаются инверсии температуры воздуха вблизи поверхности (рис. 8б). В этом случае, при слабом конвективном перемешивании и слабом ветре, возможно увеличение в нижнем слое атмосферы концентрации всех атмосферных примесей, источники которых находятся вблизи поверхности, т.е. химия потребления кислорода может быть активна. С другой стороны, слабый ветер не способствует эффективному выносу кислорода из почвы. Повышение абсолютной

влажности воздуха в это же время суток (рис. 8б), образование летом росы увлажняют почву и растительность и могут повышать эффективность процессов стока кислорода в почву и на растения. Все эти, а возможно, и другие, не рассмотренные здесь процессы могут способствовать уменьшению концентрации кислорода вблизи поверхности в предутренние часы.

Оценки величины изменчивости измеренной концентрации кислорода разных временных масштабов таковы: средний внутригодовой размах около 2.7% от среднегодового значения; внутримесячные отклонения измеренных величин от среднего значения за месяц составляют 0.5–0.7%, в теплое время больше, чем в холодное; средняя амплитуда суточного хода в июле 0.15% по отношению к среднесуточной концентрации O_2 , максимальная 0.23% в июле 2021 года.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Среднее за 5 лет наблюдений измеренное значение концентрации кислорода в приземном воздухе Москвы составляет $20.70 \pm 0.12\%$, рассчитанное по метеоданным $285 \pm 13 \text{ г/м}^3$. Содержание O_2 в приземном воздухе города в течение года максимально в холодные месяцы и минимально — в теплые, отражая сезонный ход температуры воздуха.

Измеренные (с интервалом 3 ч) и рассчитанные (по метеоданным) значения содержания O_2 в приземном воздухе Москвы достаточно хорошо коррелируют друг с другом в холодное время года, а в теплое время корреляция практически отсутствует. Эта особенность вегетативного периода, судя по всему, указывает на важную роль процессов эмиссии и поглощения атмосферного кислорода на поверхности (почва, растения) при положительной температуре воздуха. Только измеренные значения содержания кислорода в приземном воздухе города летом близки и ниже границы неблагоприятных условий с точки зрения проблем дыхания человека (по медицинским нормам). Это также свидетельствует о важности неучтенных в расчетах потоков кислорода с поверхности и на нее.

По данным измерений впервые выявлены внутрисуточные вариации (суточный ход) содержания O_2 в приземном воздухе города, выраженные в теплые месяцы и не проявляющиеся в холодное время года. Наименьшее содержание O_2 в течение суток может возникать летом в ранние утренние часы.

В заключение сформулируем следующие положения о влиянии современной динамики климата на содержание кислорода в приземном воздухе больших городов мира и возникающих при этом проблемах с дыханием человека в мегаполисе:

— глобальное потепление и изменение содержания углекислого газа в атмосфере Земли непосредственно в XXI веке не повлияют заметно на

количество кислорода в приземном воздухе, необходимое для дыхания людей;

– поглощение кислорода при сжигании ископаемого топлива также не грозит в обозримом будущем угрозой для дыхания населения Земли;

– однако локальные проявления глобального потепления и воздействия городских агломераций на местный климат, ведущие к усилению островов тепла, волн жары и другим экстремальным погодным и климатическим явлениям, могут создавать ситуации с пониженным содержанием кислорода в воздухе и угрозой гипоксии для населения больших городов.

Работа выполнена в рамках темы Государственного заказа (регистрационный номер 1021032424681-6-1.5.10;1.5.8;1.6.19. Анализ метеорологических данных выполнен при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-27-00063). Авторы выражают благодарность рецензентам за конструктивные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Башкин В.Н. Биогеохимия. М.: Научный мир, 2004. 584 с.
- Гинзбург А.С., Виноградова А.А., Федорова Е.И., Никитич Е.В., Карпов А.В. Содержание кислорода в атмосфере крупных городов и проблемы дыхания // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13. № 2. С. 5–19.
- Гинзбург А.С., Виноградова А.А., Помелова М.А. Современные изменения содержания кислорода в приземном воздухе Москвы // ENVIROMIS 2022. SCERT. 2022. Изд-во Томского ЦНТИ. ISBN 978-5-89702-488-9. С. 185–186.
- Гипоксия. Адаптация, патогенез, клиника / Под ред. Ю.Л. Шевченко. СПб., 2000. 384 с.
- ГОСТ Р 22.9.02-95 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Режимы деятельности спасателей, использующих средства индивидуальной защиты при ликвидации последствий аварий на химически опасных объектах. Общие требования (принят в качестве межгосударственного стандарта ГОСТ 22.9.02-97).
- Замолодчиков Д.Г. Недостаток кислорода: миф или реальность // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2005. № 3. С. 122–132.
- Замолодчиков Д.Г. Кислород – основа жизни // Вестник Российской академии наук. 2006. Т. 76. № 3. С. 209–218.
- Кислород – основа жизни. Под ред. Сыровой А.О. / Харьков: Изд-во ХНМУ. 2013. 232 с.
- Никберг И.И., Ревуцкий Е.Л., Сакали Л.И. Гелиометрические реакции человека. / Киев: Здоровье. 144 с.
- Овчарова В.Ф. Определение содержания кислорода в атмосферном воздухе на основе метеорологических параметров (давления, температуры, влажности) с целью прогнозирования гипоксического эффекта атмосферы // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физкультуры. 1981. № 2. С. 29–34.
- Овчарова В.Ф. Гомеокинез в погодную гипоксию и гипероксию // Труды международного симпозиума ВМО/ВОЗ/ЮНЕП СССР. Ленинград, 22–26 сентября 1986 г. Л.: Гидрометеиздат, 1988. Т. 2, С. 142–139.
- Bollinger N.J., Schutz R.H. NIOSH Guide to Industrial Respiratory Protection // National Institute for Occupational Safety and Health. DHHS (NIOSH) Publication № 87-116. USA. 1987. 333 p.
- Gattuso J.-P., Duarte C.M., Joos F., Bopp L. Humans will always have oxygen to breathe, but we can't say the same for ocean life // The Conversation. August 12, 2021 (<https://theconversation.com/humans-will-always-have-oxygen-to-breathe-but-we-cant-say-the-same-for-ocean-life-165148>).
- Huang J. et al. The global oxygen budget and its future projection // Science Bulletin. 2018. V. 63. P. 1180–1186.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021. 2391 p. <https://doi.org/10.1017/9781009157896> (<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>).
- Kai Yin, Dengsheng Lu, Yichen Tian, Qianjun Zhao and Chao Yuan Evaluation of Carbon and Oxygen Balances in Urban Ecosystems Using Land Use/Land Cover and Statistical Data // Sustainability. 2015. V. 7. P. 195–221. <https://doi.org/10.3390/su7010195>
- Keeling R.F. Measuring correlations between atmospheric oxygen and carbon dioxide mole fractions – a preliminary-study in urban air // J. Atmos Chem. 1988. V. 7. P. 153–176.
- Keeling R.F., Manning A.C. Studies of recent changes in atmospheric O₂ content // In Treatise on Geochemistry / Eds R.F. Keeling and L. Russell. 2014. Amsterdam: Elsevier. P. 385–404.
- Keeling R.F., Powell F.L., Shaffer G., Robbins P.A. and Simonson T.S. Impacts of Changes in Atmospheric O₂ on Human Physiology. Is There a Basis for Concern? // Front. Physiol. 2021. V. 12. P. 571137. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.571137>
- Martin D., McKenna H., Livina V. The human physiological impact of global deoxygenation // J. Physiol. Sci. 2017. V. 67. P. 97–106. <https://doi.org/10.1007/s12576-016-0501-0>
- Livina V.N., Vaz Martins T.M. The Future of Atmospheric Oxygen // Springer Briefs in Environmental Science. Springer Cham. 2020. 58 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-43665-0>
- Yun Wei, Jianguo Wu, Jianping Huang, Xiaoyue Liu, Dongliang Han, Linli An, Haipeng Yu, and Jiping Huang Declining Oxygen Level as an Emerging Concern to Global Cities // Environ. Sci. Technol. 2021. V. 55. P. 7808–7817.
- Liu X., Huang J., Huang J., Li C., Ding L., Meng W. Estimation of gridded atmospheric oxygen consumption from 1975 to 2018 // J. Meteorol. Res. 2020. V. 34. P. 646–658.
- Steinbach J. Enhancing the usability of atmospheric oxygen measurements through emission source characterization and airborne measurements: Dissertation Dr. Rer. Nat. 2010. 145 p.

Changes in the Oxygen Content in Urban Air under the Influence of Natural and Anthropogenic Factors

A. S. Ginzburg¹, A. A. Vinogradova¹, E. A. Lezina², and M. A. Pomelova^{1, 3}

¹*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017 Russia*

²*Budgetary Environmental Protection Institution “Mosecomonitoring”, Novy Arbat str., 11/1, Moscow, 121019 Russia*

³*Vavilov Institute for the History of Science and Technology, Russian Academy of Sciences, Baltiyskaya ul., 14, Moscow, 125315 Russia*

**e-mail: gin@ifaran.ru*

The article analyzes the results of measuring the oxygen content in Moscow in 2017–2021 at three automatic stations for monitoring atmospheric pollution of the “Mosecomonitoring”. Seasonal variations of oxygen content in the city are considered, the issues of compliance of the obtained values with the scale of comfort level for human breathing developed by medical specialists are discussed, measurement data are compared with the results of calculating the oxygen concentration in the air by the magnitude of meteorological parameters. According to the measurements, diurnal variations of the O₂ content in the surface urban air, more pronounced in the warm season, were revealed. The minimum O₂ content is observed in summer in the early morning hours. The main natural and anthropogenic processes that determine the variability of oxygen content in the surface air of a megapolis at different time scales are discussed.

Keywords: oxygen, surface air, large cities, air pollution control stations, gas analyzers, natural and anthropogenic factors