

УДК 551.510.4

## ИСТОРИЧЕСКИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА В АТМОСФЕРЕ

© 2026 г. А.С. Гинзбург\*, Н.В. Панкратова, М.А. Помелова

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация*

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

Поступила в редакцию 16.04.2025 г.

После доработки 11.08.2025 г.

Принята к публикации 08.10.2025 г.

Кислород жизненно необходим для людей и животных. Тем не менее трендам и изменчивости его содержания в атмосферном воздухе до последнего времени уделялось незаслуженно мало внимания. Это связано с тем, что процентное содержание кислорода в атмосфере Земли меняется незначительно, и с тем, что измерение этих малых изменений представляет собой достаточно трудную техническую задачу. Однако даже малые изменения содержания кислорода во вдыхаемом воздухе оказываются весьма чувствительными для людей, особенно во время волн жары, которые учащаются и усиливаются в условиях быстрого изменения климата. Данная статья посвящена истории развития представлений об изменениях содержания кислорода в атмосфере и обзору исследований последних десятилетий, когда появились результаты измерений содержания кислорода в фоновых и городских условиях.

**Ключевые слова:** состав атмосферы, содержание кислорода в воздухе, приборы и методы измерения, кислород в атмосферах планет, история исследования атмосферного кислорода

DOI: 10.7868/S3034648726010013

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В 2024 г. отмечалось 250 лет со дня открытия кислорода ( $O_2$ ), поскольку принято считать, что кислород впервые был получен английским химиком Джозефом Пристли 1 августа 1774 г. путем термического разложения оксида ртути в герметично закрытом сосуде. Согласно другим источникам, в 1771 или 1772 г. кислород получил шведский химик Карл Шееле путем прокаливания селитры с серной кислотой и разложения образующегося оксида азота. Однако именно Д. Пристли сообщил о своем открытии французскому химику Антуану Лавуазье, который также получил кислород и доказал, что газ, выделенный Шееле и Пристли, представляет собой отдельный химический элемент.

Интересная и подробная информация о жизни и деятельности открывателей кислорода содержится в книге И.К. Ларина «История озона» [Ларин, 2022]. Как пишет И.К. Ларин, «Лавуазье в 1777 году поставил свой знаменитый

12-дневный эксперимент с ртутью, в результате которого также был получен газообразный кислород. Основываясь на своих экспериментах, Лавуазье считал, что неизвестный элемент образует кислоты, поэтому придумывая название для нового безымянного газа, он соединил греческие слова “OXY”, означающее кислоту, и “GENES”, означающее формирование. Получилось слово “OXYGEN” (“КИСЛОРОД”), т.е. рождающий кислоту».

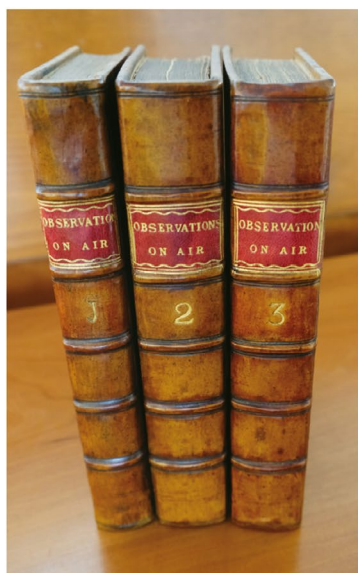
История трансформации атмосферы Земли за все время существования нашей планеты подробно описана в книге М.И. Будыко, А.Б. Ронова и А.Л. Яншина «История атмосферы» [Будыко и др., 1985]. Начало современного (XX и XXI вв.) этапа исследования атмосферного кислорода в значительной степени связано с именем американского химика и физиолога Френсиса Бенедикта, который не только разработал калориметр и спирометр, используемые для определения потребления кислорода

и измерения скорости метаболизма, но и опубликовал в 1912 г. книгу «Состав атмосферы с особым вниманием к содержанию в ней кислорода» [Benedict, 1912]. На рис. 1–3 приведены обложки и/или титульные листы некоторых научных трудов XVIII–XXI вв., посвященных открытию и исследованию кислорода.

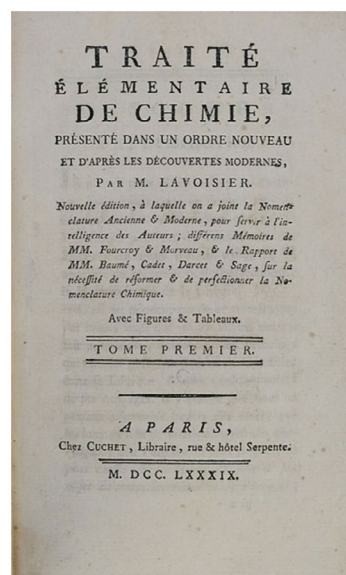
В настоящее время в климатической системе Земли (атмосфера, океан, суша, биота), по современным оценкам [Будыко и др., 1985; Keeling et al., 1993; Замолотчиков, 2006; Petsch, 2014], содержится около 1,2 млн Гт молекулярного кислорода. На растворенный в морской воде кислород из общего количества приходится



К. Шееле «Химический трактат о воздухе и огне». 1777 г.



Дж. Пристли «Эксперименты и наблюдения над различными видами воздуха». Тома 1–3 (1774, 1775 и 1779 гг.)



А. Лавуазье «Элементарный трактат по химии, представленный в новом порядке и в соответствии с современными открытиями». 1789 г.

Рис. 1. Открытие кислорода (основополагающие труды XVIII в.)

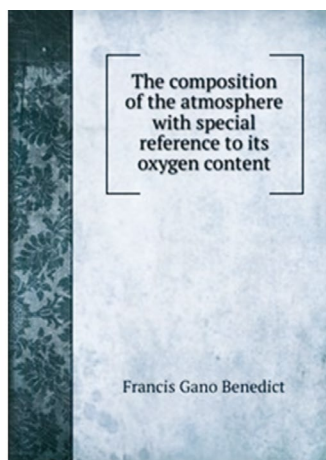
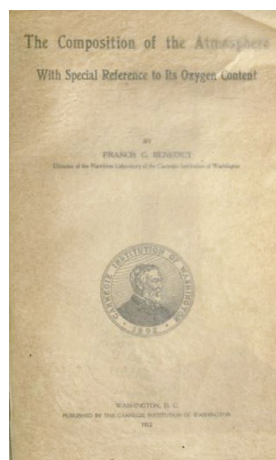


Рис. 2. Оригинальное (1912 г.) и репринтное (2013 г.) издания монографии Ф.Г. Бенедикта «Состав атмосферы с особым вниманием к содержанию кислорода»

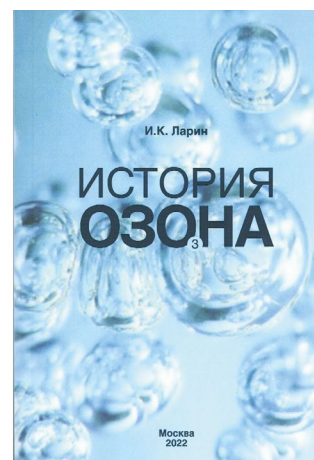
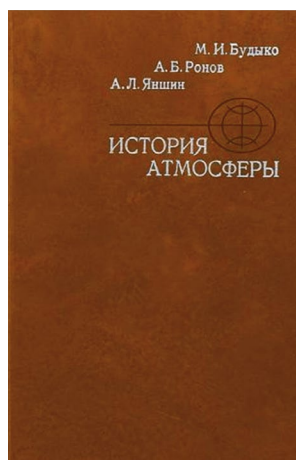


Рис. 3. Современные монографии о кислороде [Будыко и др., 1985; Ларин, 2022]

меньше одного процента. При этом практически весь кислород поступает в океан из атмосферы. Поэтому даже небольшое снижение содержания кислорода в атмосфере может приводить к заметному кислородному обеднению океана. Это затрудняет дыхание морской биоты и вызывает серьезную тревогу океанологов, нашедшую свое отражение во множестве научных исследований и в Шестом оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата [IPCC, 2021].

Что касается атмосферного кислорода, то, как отмечено в [Будыко и др., 1985], «Наличие в современной атмосфере громадной массы столь активного элемента, как кислород, является парадоксом, который объясняется высокой скоростью поступления кислорода в атмосферу в результате захоронения в отложениях органического углерода, образованного в ходе фотосинтетической деятельности зеленых растений».

В [Будыко и др., 1985] четко сформулировано, что на Земле большинство живых организмов получают энергию в процессе окисления органического вещества. Кроме того, окисление обеспечивает разложение (деструкцию) мертвых организмов, горных пород и недоокисленных газов, поступающих в атмосферу из вулканов и разломов земной коры. Интересно отметить, что кислород (в основном в составе силикатов) является и самым распространенным элементом в составе земной коры, на него приходится примерно 60% от ее массы.

При такой «бурной жизни» кислорода парадоксом является не только его большое содержание в атмосфере, но и практически постоянная концентрация в течение многих столетий, составляющая у поверхности Земли 20,95%. Таким образом, вопрос изменчивости концентрации атмосферного кислорода не вызывал научного интереса [Benedict, 1912; Krogh, 1919; Shepherd, 1937; Lockhart and Court, 1942].

Это постоянство было, в частности, подтверждено данными наблюдений (анализ образцов воздуха в приводном слое) в атмосфере между 50° с.ш. и 60° ю.ш. над океанами и шельфовыми районами, собранными в работе [Machta and Hughes, 1970], где показано, что содержание  $O_2$  в сухом воздухе составило 20,946% по объему.

Эта величина используется в качестве «константы» во многих работах.

Однако быстрый рост сжигания ископаемого топлива и выбросов углекислого газа ( $CO_2$ ) наряду с активной урбанизацией поставили в конце XX — начале XXI в. вопрос о том, как антропогенные факторы влияют не только на климат, но и на содержание кислорода в приземном воздухе (следовательно, и на комфортность климата) и водах Мирового океана.

С 80-х гг. XX в. осуществляется международная «кислородная» программа Скриппсовского института океанографии (США), в рамках которой проводятся измерения содержания кислорода, а точнее отношения  $O_2/N_2$  на станциях, расположенных в фоновых районах мира. Эти измерения показывают заметное уменьшение содержания кислорода в приземном воздухе, имеющее четкую корреляцию с ростом содержания углекислого газа в атмосфере [Keeling and Manning, 2014; Keeling et al., 2021].

В эти же годы появились работы по влиянию дефицита кислорода в атмосферном воздухе и воздухе производственных помещений на здоровье и жизнедеятельность человека [Никберг, 1986; Овчарова, 1981; Bollinger and Schutz, 1987; Овчарова и др., 1988].

С начала XXI в. в разных регионах и городах мира проводятся измерения содержания кислорода в приземном воздухе и на высотных мачтах [Nguyen et al., 2022; Adcock et al., 2022; Adcock and Pickers, 2022; Adcock et al., 2022; Гинзбург и др., 2023]. В последние годы стало уделяться значительное внимание проблеме недостатка кислорода в приземном воздухе больших городов [Гинзбург и др., 2014; Ginzburg et al., 2014; Kai et al., 2015; Yun Wei et al., 2021; Гинзбург и др., 2023], поскольку в городских агломерациях существуют дополнительные факторы снижения содержания кислорода в воздухе, связанные с наличием городского острова тепла, волнами жары, сжиганием ископаемого топлива и загрязнением городской атмосферы угарным газом.

Совместное измерение динамики содержания углекислого газа и кислорода при сжигании углеродсодержащего топлива показывает четкую автокорреляцию между изменением концентрации  $CO_2$  и  $O_2$ . Эти исследования в последние годы активно проводятся в Университете Восточной Англии (см. [Pickers, 2016] и др.).

Рост внимания к трендам и изменчивости содержания кислорода в атмосферном воздухе делает актуальным обзор методов и результатов измерений и расчетов концентрации кислорода не только в глобальном масштабе, но и в конкретных регионах и городах мира.

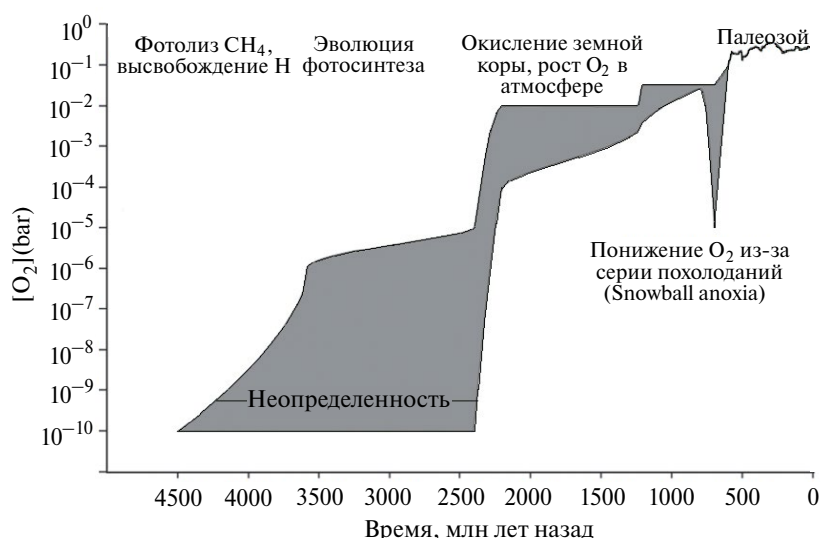
## 2. ИСТОРИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА КИСЛОРОДА В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Этот раздел обзора базируется, в первую очередь, на фундаментальном труде трех выдающихся советских и российских ученых — академиков М.И. Будыко, А.Б. Ронина и А.Л. Яншина «История атмосферы», изданном в 1985 г. [Будыко и др., 1985]. Интересно, что в многотомной монографии «Труды по геохимии» [Treatise on Geochemistry, 2014] описание истории появления и изменения количества кислорода в атмосфере Земли не сильно отличается от описания этих процессов в [Будыко и др., 1985]. В самых общих чертах история появления кислорода в атмосфере Земли и роста его содержания коротко и наглядно описана в [Kump, 2008].

Как справедливо отмечено в [Kump, 2008], достоверно известны два факта: первичная атмосфера Земли была практически лишена кислорода, а сегодня она на 21% состоит из этого газа. Большинство промежуточных событий известны с большой степенью неопределенности.

Многие геологические данные указывают на переход от бескислородной атмосферы к кислородной между 2,5 и 2,0 млрд лет назад. Этот переход в научной литературе получил название «великое окислительное событие», или «кислородная катастрофа». Изменение содержания кислорода в атмосфере на протяжении 4,5 млрд лет существования Земли схематически представлено на рис. 4, адаптированном из [Petsch, 2014]. Этот рисунок иллюстрирует основные неопределенности в оценках содержания кислорода в атмосфере в разные геологические эры и периоды.

Первичная атмосфера Земли начала формироваться еще на ранних этапах истории планеты. Точный состав атмосферы неизвестен. Считается, что она сформировалась в результате дегазации мантии. В результате фотолиза метана ( $\text{CH}_4$ ) происходило выделение в атмосферу водорода (H), при этом кислород еще не выделялся. Примерно 2,5 млн лет назад начинается воспроизводство кислорода, его концентрация в атмосфере резко возрастает, что в литературе получило название как «кислородная катастрофа». На ранних стадиях этого события весь кислород поглощался океаном и горными породами морского дна. Затем, примерно 1,85 млн лет назад, начинается окисление горных пород на суше, кислород также расходуется на образование озонового слоя Земли. Этот процесс длит-



**Рис. 4.** Обобщенная оценка эволюции атмосферного  $\text{O}_2$  за последние 4,5 млрд лет истории Земли. Данные из [Berner et al., 2000; Catling, 2001; Farquhar et al., 2011; Kasting, 1992; Kump, 2008; Petsch, 2000; Rye and Holland, 1998]. Серым цветом показаны границы неопределенности

ся примерно 1 млн лет. И лишь 800–900 тыс. лет назад, когда поверхностные породы и газы атмосферы оказались окисленными, кислород начал накапливаться в атмосфере в свободном виде. По некоторым данным, 640–720 тыс. лет назад произошло сильнейшее похолодание, которое получило название «Земля — снежный ком» (Snowball Earth), в результате чего произошло замедление фотосинтеза и резкое падение концентрации кислорода, однако эти данные довольно спорные (на рис. 4 видна существенная неопределенность падения концентрации кислорода). В целом, результатом кислородной катастрофы стало появление в составе атмосферы свободного кислорода и изменение общего характера атмосферы с восстановительного на окислительный.

Относительно процесса формирования окислительной (кислородной) атмосферы Земли существуют и другие предположения. Например, в [Davankov, 2020; Даванков, 2021] указывается на недостаточно изученный источник свободного кислорода — фотолиз молекул воды в верхних слоях атмосферы Земли с диссипацией в космос легких атомов водорода и удерживанием гравитацией более тяжелых атомов кислорода. Этот механизм образования кислорода в атмосфере Земли недостаточно подробно обсуждается в научной литературе, но диссоциация молекул воды в атмосферах Венеры и Марса хорошо известна: она приводит к потере водорода — на Венере за счет высокой температуры, а на Марсе — за счет малой силы тяжести. Поэтому на обеих планетах мало воды и водяного пара [Nazari-Sharabian et al., 2020; Kulikov et al., 2006].

### 3. КИСЛОРОД, АЗОТ И УГЛЕКИСЛЫЙ ГАЗ В СОВРЕМЕННОЙ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Кислород — второй по распространенности газ в атмосфере Земли после азота ( $N_2$ ). Несмотря на удивительное постоянство концентрации кислорода, его флуктуации в атмосферном воздухе заметно больше, чем у азота. Кроме того, содержание в воздухе азота в несколько раз больше, чем кислорода (78,1% против 20,9%). Поэтому, как правило, изменения содержания кислорода оценивают по отношению к содержанию азота  $O_2/N_2$ . Естественных источников и стоков  $N_2$  на Земле намного меньше, чем  $O_2$ . Кроме того, чтобы избежать влияния измене-

ния от региона к региону температуры воздуха, атмосферного давления, влажности, а также влиянием других газовых составляющих, содержащихся в воздухе, для изучения динамики атмосферного кислорода удобно использовать соотношения  $O_2/N_2$ , где концентрацию  $N_2$  можно считать постоянной [Keeling et al., 1998]. Данное соотношение выражают в единицах *per meg*, что эквивалентно 0,0001%.

Надо учитывать, что содержание кислорода и углекислого газа во многом определяют одни и те же процессы, такие как сжигание топлива, фотосинтез и дыхание. Однако на углекислый газ дополнительно влияют и неорганические реакции, происходящие в океане, которые не оказывают никакого влияния на содержание атмосферного  $O_2$ . Таким образом, сопоставление измеренных значений концентраций углекислого газа и кислорода в атмосфере позволяют оценить роль антропогенных и естественных источников в происходящий в настоящее время рост концентрации  $CO_2$ .

Содержание  $O_2$  в атмосфере на несколько порядков выше, чем  $CO_2$ , и хотя изменения в содержании кислорода в глобальном масштабе крайне малы и составляют несколько млрд<sup>-1</sup> (частей на миллиард), но поскольку углекислого газа в атмосфере примерно в 500 раз меньше, чем кислорода, то одни и те же процессы, которые вызывают лишь небольшие изменения в содержании  $O_2$ , могут оказать серьезное влияние на содержание углекислого газа в атмосфере.

Важной характеристикой является потенциальное содержание кислорода в воздухе (Atmospheric potential of oxygen — APO) — расчетная величина, используемая при изучении процессов, влияющих как на  $O_2$ , так и на  $CO_2$ , например, процессов в океане [Ishidoya et al., 2022; Resplandy et al., 2019; Nevison et al., 2020] и сжигания ископаемого топлива [Pickers, 2016; Chevallier et al., 2021; Pickers et al., 2022]. Согласно [Stephens et al., 1998],

$$APO = O_2 + \alpha V \times CO_2, \quad (1)$$

где  $\alpha V$  представляет собой отношение обмена —  $O_2 : CO_2$  для наземных биотических процессов, включая дыхание и фотосинтез; его значение обычно устанавливается равным 1,1 [Severinghaus, 1995]. По определению, APO не чувствителен к газообмену между атмо-

ферой и наземной биосферой и характеризует обмен  $O_2$  и  $CO_2$  между атмосферой и океаном, на которые в основном влияют биологическая активность океана, океаническая циркуляция и теплообмен между атмосферой и гидросферой, а также сжигание ископаемого топлива.

#### 4. МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА В ВОЗДУХЕ

Измерение изменчивости концентрации кислорода в атмосфере представляет собой довольно сложную техническую задачу, поскольку флуктуации  $O_2$  крайне малы: на 4-5 порядков меньше его содержания. Существует несколько подходов для измерения концентрации кислорода в атмосферном воздухе.

**Лазерный метод.** Метод измерения основан на поглощении света молекулами газа, находящимися между излучателем и приемником. Молекулы кислорода поглощают определенные длины волн электромагнитного излучения (760 нм), при этом поглощение даже близких к линии спектра волн минимально. Таким образом, измеряемая концентрация газа пропорциональна амплитуде линии поглощения. Значительным недостатком этого метода является высокая стоимость прибора.

**Электрохимический метод.** Большинство анализаторов, основанных на этом методе, выполнены на основе электрохимических сенсоров. Принцип работы электрохимического сенсора аналогичен принципу действия обычной батарейки. В результате химической реакции вырабатывается электрический ток, и, в зависимости от количества кислорода, сила тока изменяется. Метод используется для измерения незначительной концентрации кислорода (или его следов) на уровне ниже  $10 \text{ млн}^{-1}$  (частей на миллион) и хорошо себя зарекомендовал при измерении кислорода в инертных газах, таких как азот, аргон, гелий и др. Преимущество данного метода — отсутствие чувствительности к водороду и углеводородам, также содержащихся в инертных газах в микроконцентрациях. При этом у метода есть ряд ограничений, связанных с очень сильной температурной зависимостью сигнала, коротким сроком службы, значительным влиянием помех и возможностью отравления различными химикатами.

**Циркониевый метод.** Анализаторы кислорода с датчиками на основе диоксида циркония обычно используются для контроля режима горения в печах различного типа и анализа кислорода в инертных газах на следовом уровне. Основным ограничением для применения циркониевых анализаторов является наличие в пробе существенных концентраций горючих газов. Циркониевый метод основан на свойстве материала диоксида циркония проводить ионы кислорода при высоких температурах. Циркониевый датчик состоит из нагретой мембраны, с одной стороны которой подается проба, а с другой — газ сравнения (как правило, воздух). За счет диффузии ионов кислорода на сторонах мембраны возникает разница потенциалов, из величины которой с помощью уравнения Нернста и известной концентрации кислорода в опорном газе вычисляется искомая концентрация кислорода в пробе. Как и электрохимический метод, этот способ является излишним для измерения концентрации кислорода в атмосферном воздухе.

**Парамагнитный метод.** Большинство современных приборов, которые используются в научных или медицинских целях для измерения концентрации кислорода, основаны на парамагнитных свойствах  $O_2$  [Jasek et al., 2022]. Принцип метода основан на том, что подавляющее большинство газов, входящих в состав воздуха, являются диамагнетиками (азот, аргон, углекислый газ и водяной пар), они обладают небольшой отрицательной магнитной восприимчивостью. Кислород, напротив, проявляет сильные парамагнитные свойства, его магнитная восприимчивость в среднем в пятьдесят раз выше, чем у большинства газов (таблица). Как раз на свойстве двух газов, кислорода и азота (парамагнетике и диамагнетике), которые в сумме составляют 99% состава воздуха, и основан ряд «парамагнитных методов» определения концентрации кислорода. Магнитная восприимчивость — физическая величина, выражающая отношение между магнитным моментом единицы объема (намагниченностью) вещества и напряженностью магнитного поля в этом веществе. Положительное значение указывает на парамагнитные свойства, отрицательное — на диамагнитные свойства.

Два постоянных магнита создают неоднородное магнитное поле. В зоне его действия на тонкой нити подвешено гантелевидное тело из двух

**Таблица.** Молярная магнитная восприимчивость\* ( $\chi_M \times 10^{-6}$  [см<sup>3</sup>/моль]) компонентов атмосферного воздуха [Manning et al., 1999; Haynes, 2016; Rumble, 2022]

Газ	Концентрация в атмосферном воздухе, млн <sup>-1</sup>	$\chi_M \times 10^{-6}$ , см <sup>3</sup> /моль [Rumble, 2022]
O <sub>2</sub>	209,460	4291
N <sub>2</sub>	780,840	-15,1
Пары H <sub>2</sub> O	0–30 000	-16,5 (373 K)
Ar	9,340	-24,3
CO <sub>2</sub>	416,320**	-26,4
CO	0,020–0,250	-14,8
NO	0,028	1836
NO <sub>2</sub>	0,035	188 (408 K)

\* Значения магнитной восприимчивости указаны для давления 1 атм. и температуры 298 К, если не указано иное.

\*\* Современное содержание углекислого газа в атмосферном воздухе.

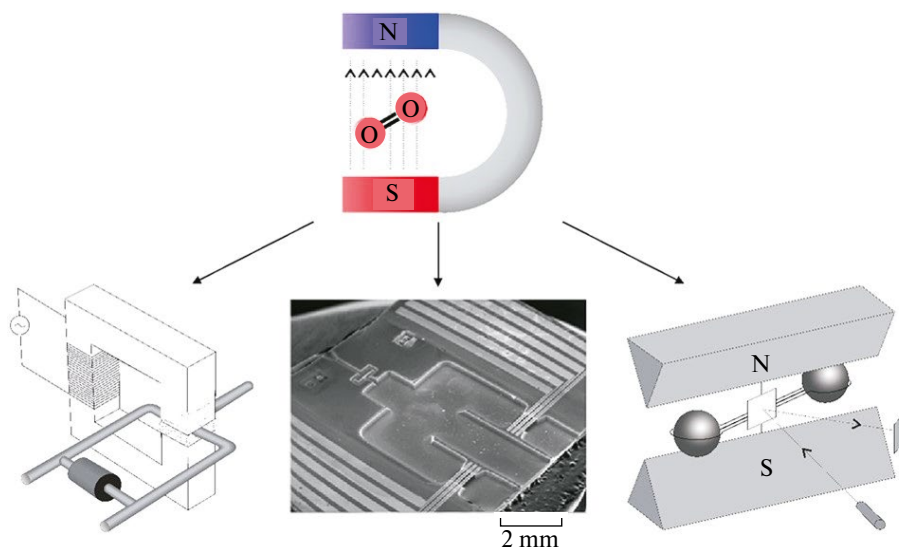
стеклянных сфер, заполненных азотом (рис. 5). На оси вращения сфер установлено зеркало, на которое направлен пучок света. Отраженный свет направляется на фотоприемник. Кислород из пробы стремится в точки с максимальной магнитной индукцией и выталкивает сферы, изменение положения которых фиксируется фотоприемником. Фотоприемник, в свою очередь, связан с катушкой, нить от которой намо-

тана на поперечине гантели. Чем выше сила тока, который требуется подать, чтобы вернуть сферы в исходное положение, тем больше кислорода в пробе.

Приборы, использующие парамагнитные свойства кислорода, имеют длительный срок эксплуатации, требуют значительно меньше расходов при обслуживании, и им не нужны расходные материалы. Из таблицы видно, что молекула O<sub>2</sub> обладает самым большим магнитным моментом среди обычных молекул воздуха и колебания O<sub>2</sub> доминируют в изменении магнитной восприимчивости сухого воздуха. Поэтому парамагнитные кислородные датчики широко используются во всем мире для измерения содержания кислорода в атмосферном воздухе. Однако следует отметить, что некоторые специалисты указывают на неоптимальную чувствительность парамагнитных датчиков и сложность их эксплуатации и считают более надежным использование оптических люминесцентных датчиков (LuminOx) [Кулак В.В., частное сообщение].

### 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ

**Измерения содержания кислорода в фоновых условиях.** Наиболее известной программой по наблюдению за атмосферным кислородом является Scripps O<sub>2</sub>, которая базируется в Океанографическом институте Скриппса (The Scripps



**Рис. 5.** Принцип действия парамагнитной технологии [Jasek et al., 2022]

research Institute) в Сан-Диего, Калифорния, под руководством профессора Ральфа Килинга. Программа направлена на измерения изменений уровня кислорода в атмосфере путем отбора проб воздуха, собранным на станциях по всему миру<sup>1</sup>. Эта сеть отбора проб дает глобальную картину изменчивости содержания кислорода. В настоящее время проводятся измерения на 10 станциях, еще на двух станциях проводились измерения в первой половине 90-х гг. XX в. (рис. 6).

Станции расположены в фоновых условиях, поэтому дают общую глобальную картину пространственной и временной динамики изменения содержания кислорода в атмосфере. Результаты наблюдений показали снижение уровня кислорода во всем мире (рис. 7), основной причиной является увеличение объемов сжигания ископаемого топлива. Наблюдаемая тенденция соответствует потере 19 молекул из 1 млн молекул  $O_2$  в атмосфере каждый год, или 0,0019%/год (1% за 500 лет). По данным [Замолодчиков, 2006; Keeling and Manning, 2014], эти изменения слишком малы, чтобы оказать влияние на здоровье человека, но представляют интерес для изучения происходящих изменений климата, а также важны для уточнения оценок глобального баланса углерода.

Еще один глобальный проект — самолетные измерения концентрации  $O_2$  от полюса до полюса [Morgan et al., 2019; Stephens et al., 2021]. Проект тесно связан с программой Scripps  $O_2$ . С 1999 г. было проведено 17 измерительных кампаний по отбору воздуха в специализированные флаги (колбы), с 2007 г. началось измерение концентрации  $O_2$  *in situ*, было проведено 13 таких кампаний. Прямые измерения проведены на базе бортового кислородного прибора Национального центра атмосферных исследований NCAR/Scripps (Medusa) (AO2), который использует детектор поглощения вакуумного ультрафиолета для  $O_2$ , а также включает в себя инфракрасный датчик  $CO_2$ . В итоге проведенных кампаний получена концентрация кислорода в толще атмосферы 0–14 км от 87° с.ш. до 86° ю.ш., период измерений охватил весь сезонный цикл.

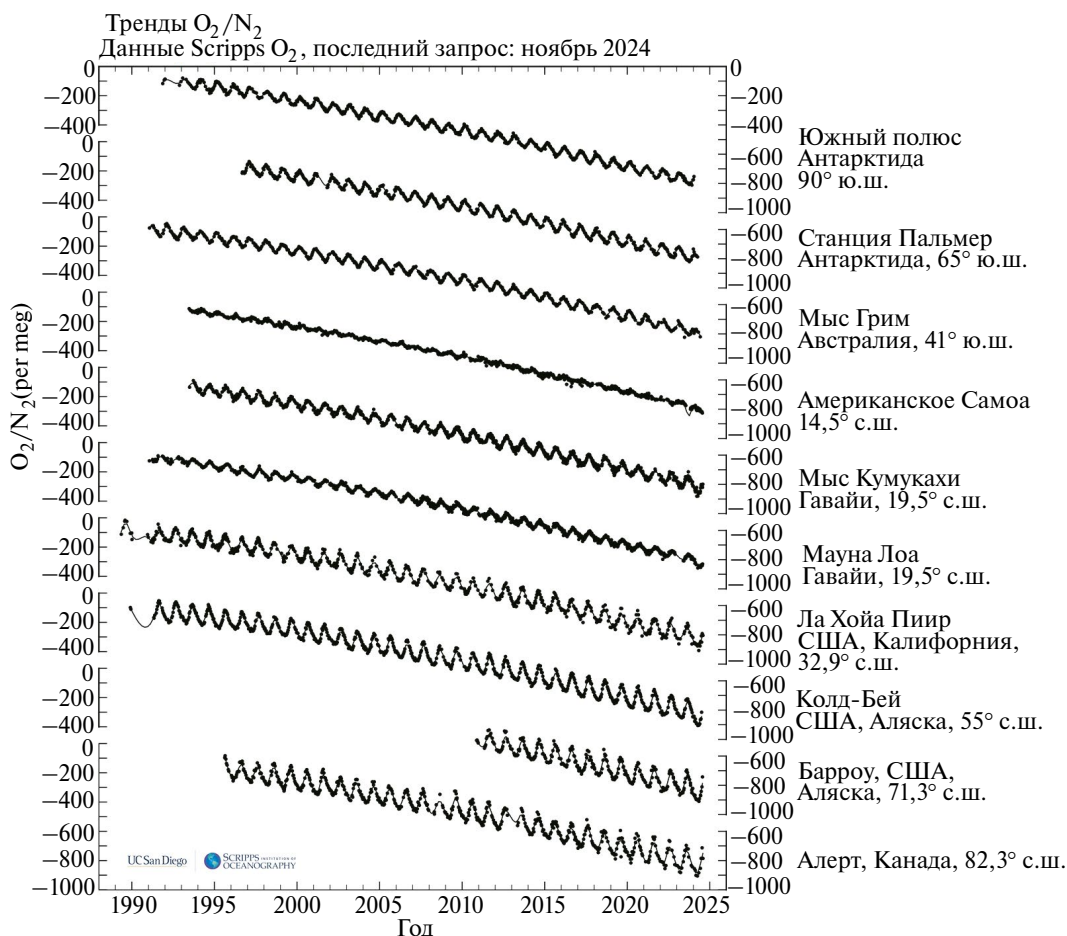
В ходе экспериментов получены уникальные характеристики сезонного хода, представлены высотные профили распределения кислорода с широким пространственным охватом. Однако основной целью работы было создание надежного измерительного комплекса.

Чрезвычайно важны стационарные наземные наблюдения. Так, например, сеть мониторинга действует в ряде европейских стран.



**Рис. 6.** Станции измерений концентрации кислорода: кружками обозначены станции программы Scripps  $O_2$  (<https://scripps2.ucsd.edu>), ромбами — высотные мачты, квадратом показана высокогорная станция Юнгфрауйох

<sup>1</sup> (<https://scripps2.ucsd.edu>)



**Рис. 7.** Данные о содержании  $O_2/N_2$ , полученные на разных станциях: Алерт (Нанавут, Канада), Барроу (Аляска), Колд-Бэй (Аляска), пирс Ла-Хойя (Калифорния), обсерватория Мауна-Лоа (Гавайи), мыс Кумукахи (Гавайи), Американское Самоа, мыс Грим (Австралия), станция Палмер (Антарктида) и Южный полюс Антарктиды (по данным Scripps  $O_2$ , <https://scrippsco2.ucsd.edu>)

В Великобритании развернут национальный проект DARE-UK (Detection and Attribution of Regional greenhouse gas Emissions — Обнаружение и определение источников региональных выбросов парниковых газов), в рамках которого проводятся измерения содержания парниковых газов на 6 высотных мачтах, на двух из них — Хитфилд (Heatfield) и Вейбурн (Weybourne) идет мониторинг содержания атмосферного  $O_2$  [Adcock and Pickers, 2022; Adcock et al., 2023, Adcock et al., 2024]. Наблюдения содержания кислорода на высотной мачте Хитфилд начались в июне 2021 г., данные доступны до июля 2022 г. В обсерватории Вейбурн измерения содержания кислорода начались более 10 лет назад (рис. 8). Обе станции региональные, расположенные на значительном (более 15 км) расстоянии от городов. На обеих станциях идет отбор проб воздуха

на высоте 10 м, используется одна система для одновременного измерения  $CO_2$  и  $O_2$ . После прохождения через анализатор  $CO_2$  Siemens воздушный поток анализируется на содержание  $O_2$  с помощью анализатора Oxzilla II от Sable Systems (<https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/a831cbf570494f6fb022c8f6c7d47b8f>). В результате проведенных измерений выявлена тенденция к сокращению содержания кислорода в воздухе в среднем на 24,0 (от  $-24,3$  до  $-23,8$ ) per meg/год [Adcock et al., 2023, 2024]. Подобные результаты получены и на других европейских станциях. Так, анализ данных 5-летних измерений состава воздуха на прибрежных станциях Лутьевад (Нидерланды) и Мейс-Хед (Ирландия) выявил быстрое снижение содержания кислорода в воздухе после 2003 г. [Sirignano et al., 2010].

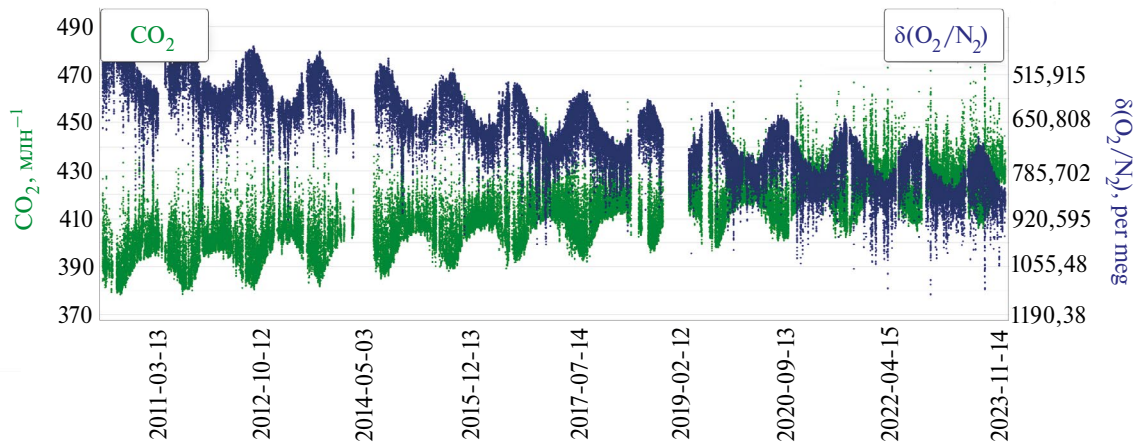


Рис. 8. Непрерывные ряды наблюдений концентраций  $O_2$  и  $CO_2$  в обсерватории Вейборна в Соединенном Королевстве в период с мая 2010 г. по декабрь 2023 г. [Adcock et al., 2024]

Продолжительные измерения содержания кислорода проводятся и в Швейцарии. С 2000 г. на высокогорной станции Юнгфрауйох (нем. Jungfraujoch) отдел физики климата и окружающей среды Бернского университета проводит мониторинг атмосферного  $CO_2$  и  $O_2$  [Uglietti et al., 2011]. Станция расположена в скалистом районе на склоне горы Юнгфрау на высоте 3580 м над уровнем моря. В рамках измерений каждую неделю проводится отбор проб атмосферного воздуха. Чтобы получить оптимальный охват данных и лучше обнаруживать кратковременные колебания концентраций, в конце 2004 г. была установлена система непрерывных измерений для анализа  $CO_2$  и  $O_2$  *in situ*. Кислород измеряется двумя способами: парамагнитным, используя парамагнитные свойства молекул кислорода (прибор Jungfraujoch Parox 1000 от MBE AG, Швейцария), и электрохимическим — прибором Max-250 производства Maxtec, США [Sturm, 2005.; Valentino et al., 2008]. В работе показано сокращение количества кислорода в атмосферном воздухе, однако основное внимание уделено динамике концентрации углекислого газа.

В работе [Shi et al., 2021] также приводятся данные о концентрации кислорода на высокогорной станции. Полевые наблюдения проведены в период 2017–2020 гг. на Цинхай-Тибетском нагорье, Китай ( $26^{\circ}00'–39^{\circ}47'$  с.ш.,  $73^{\circ}19'–104^{\circ}47'$  в.д.) на высоте от 645 до 5238 м над уровнем моря. Проанализировано 487 проб воздуха. Кроме высокогорных измерений, использовались данные станции, располо-

женной в Пекине. В ходе исследований показано, что концентрация  $O_2$  значительно отличается от ранее принятой константы и демонстрирует сильные пространственные и сезонные различия. Так, в 2018 г. концентрация кислорода находилась в пределах 19,94–20,66%, в 2019 — 19,98–20,78%, в 2020 — 19,97–20,73%. При этом средняя концентрация кислорода летом (20,47%) оказалась на 0,31% выше, чем зимой (20,16%). Также в работе показана зависимость содержания кислорода от высоты (рис. 9). Согласно исследованиям, летом на каждые 1000 м высоты концентрация кислорода будет падать на 0,15%. Кроме того, на содержание кислорода выявлено влияние температуры воздуха, состава растительного покрова, а также наличия и отсутствия листвы.

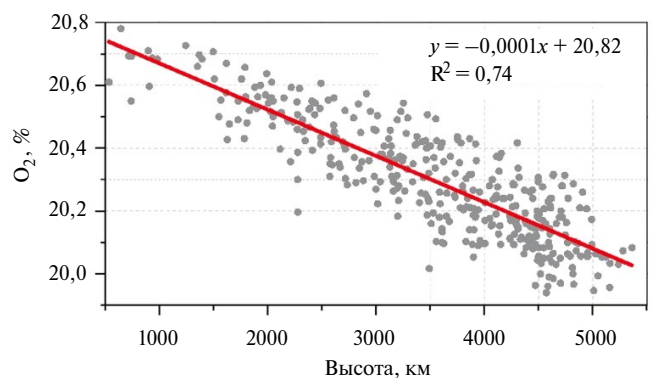


Рис. 9. Снижение концентрации  $O_2$  с высотой (теплый период) и линейная интерполяция,  $N = 369$ ,  $R^2 = 0,74$  [Shi et al., 2021]

**Измерения концентрации кислорода в урбанизированных районах.** В последние годы в связи с совершенствованием приборной базы появляется все больше работ по оценке динамики кислорода, отдельно от других составляющих атмосферного воздуха. Особый интерес представляют измерения концентрации кислорода в городских агломерациях, проводится оценка происходящих изменений на здоровье человека. Для оценки изменений концентрации кислорода также проводятся измерения его содержания и в фоновых районах земного шара.

Несмотря на то что многие исследователи не считают постоянное снижение концентрации кислорода опасным для здоровья человека, локальное понижение содержания  $O_2$  в воздухе может создавать существенный дискомфорт. При этом измерениям концентрации кислорода в урбанизированных территориях, где сосредоточено основное население планеты, уделено крайне мало внимания. Так, например, в России в городах сосредоточено более 80% населения, в среднем по миру — более 50%. Таким образом, очень важно проводить высокоточные наблюдения за атмосферным  $O_2$  в городских районах, где и сконцентрирована основная деятельность человека. Постоянные или периодические измерения  $O_2$  проводятся в таких крупных городах, как Токио (Япония) [Ishidoya et al., 2020], Москва (Россия) [Ginzburg et al., 2014, 2023], Кембридж (США) [Keeling, 1988], Ланьчжоу (Китай) [Wang et al., 2023], Пекин (Китай) [Xing, 2023].

Интерес к составу городского воздуха существенно возрос в Китае. Измерения идут на нескольких станциях. Одна измерительная площадка находится в Ланьчжоу (36,05° с.ш., 103,87° в.д.). Город является важной промышленной базой и комплексным транспортным узлом на северо-западе Китая [Wang et al., 2023]. Население города превышает 4,4 млн человек. Ланьчжоу расположен среди полузасушливой гористой местности, в регионе часто отмечаются низкая скорость ветра или штилевые условия, что существенно ограничивает атмосферное рассеивание и приводит к стабильному накоплению загрязняющих веществ. Измерительная платформа базируются на методе газовой хроматографии и детектора теплопроводности (GC-TCD) для измерения содержания  $O_2$  в атмосфере и устанавливает модель коррекции

на основе XGBoost для данных наблюдений за  $O_2$  в атмосфере. Результаты наблюдений показали зависимость содержания кислорода от таких метеопараметров, как температура воздуха и атмосферное давление. Например, при повышенном атмосферном давлении и высокой температуре воздуха отмечается снижение содержания кислорода. Показано, что атмосферный  $O_2$  имеет четкие сезонные и суточные вариации и хорошо коррелируют с городской деятельностью человека ( $NO_x$ ). Так, наименьшее значение концентрации  $O_2$  в течение суток, как правило, отмечается около 10:00 (местное время), затем уровень  $O_2$  постепенно повышается, в вечерние часы пик концентрации  $O_2$  вновь снижается.

При наложении неблагоприятных метеорологических условий пониженный уровень содержания кислорода может быть причиной гипоксии. Причем такая ситуация характерна для любого крупного города с высокой транспортной нагрузкой и штилевыми условиями погоды. Так, например, в работе [Radkevich et al., 2022] показано, что в Ташкенте вблизи автомобильных дорог наблюдалось заметное снижение концентрации кислорода в атмосферном воздухе; причем интенсивность снижения была связана с интенсивностью движения транспортных средств. В часы пик концентрация кислорода вблизи автомагистралей понижалась до опасных для человека значений — 19,6–19,5%  $O_2$ . Таким образом, продолжающийся рост количества автомобилей может привести к тому, что  $O_2$  в городской атмосфере будет все больше расходоваться на сжигание топлива, а значит, и условия для возникновения гипоксии могут отмечаться все чаще.

Сезонные и суточные колебания концентрации  $O_2$  в Токио хорошо согласуются с результатами измерений в городе Ланьчжоу [Ishidoya, 2020]. Показано, что наибольший вклад в изменчивость содержания кислорода дает сжигание топлива, а уже потом — адвекция воздушных масс и газовый обмен на границе «океан–атмосфера».

В работе [Wei et al., 2021] приведена комплексная оценка кислородного баланса и связанных с ним рисков для 391 крупного города по всему миру. Авторы использовали кислородный индекс (отношение потребления кислорода к его продукции), который был получен на основе

различных источников данных. Авторы показали, что на городские территории мира, занимающие всего 3,8% мировой поверхности суши, приходилось 39% ( $14,3 \pm 1,5$  Гт/год) глобального потребления кислорода на Земле (по данным 2001–2015 гг.). Отмечено, что в крупных городах (более 5 млн жителей) существует серьезный дисбаланс между производством и потреблением кислорода, и чем больше этот дисбаланс, тем значительнее угроза гипоксии в период волн жары (рис. 10). Так, в Пекине, согласно [Yin et al., 2015], производство кислорода ( $O_p$ ) в пригороде не компенсируют его потребление ( $O_c$ ) в центральных районах. А стремительное увеличение площадей землепользования еще сильнее увеличивает потребление кислорода [Peng, 2015].

## 6. ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА В РОССИИ

**Фоновые измерения на высотной мачте Зотино (ZOTTO).** В России в фоновых условиях были проведены измерения концентрации кислорода на фоновой станции Зотино в период с ноября 2005 по июнь 2007 г. Целью работы было изучение глобального углеродного цикла посредством сравнения концентраций  $CO_2$  и  $O_2$ , а также АРО над Шетландскими островами и над континентальной станцией Зотино.

Обсерватория Зотино (Zotino Tall Tower (ZOTTO)) находится в бореальных лесах Центральной Сибири ( $60^\circ 26'$  с.ш.,  $89^\circ 24'$  в.д.), высота 300 м. Воздухозаборники были расположены на высотах 4, 52, 92, 227 и 300 м. Для измерения концентрации кислорода был использован изме-

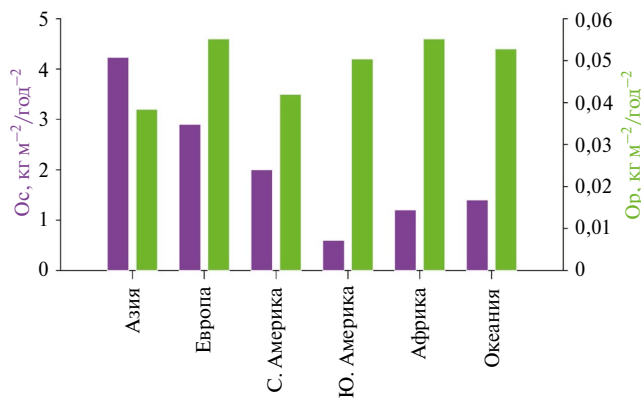
рительный комплекс Paramagnetic Oxygen Sensor, Paramax 101 (Columbus Instruments International Corp.), усовершенствованный за счет добавления высокоточных систем контроля температуры и давления [Kozlova et al., 2008, 2009].

Преимуществом измерений на высотных башнях является возможность зондировать (в дневное время, преимущественно летом) хорошо перемешанную часть атмосферы (слой перемешивания), где влияние локальных источников/поглотителей ослаблено. Высота слоя перемешивания зависит от сезона и времени суток, в Сибири летом его мощность варьирует от  $\sim 200$  м до 2000 м. Кроме того, территория вокруг ZOTTO характеризуется крайне низким уровнем антропогенного загрязнения. В работе показано, что цикл кислорода определяется, главным образом, природными процессами — дыханием и фотосинтезом. Как и ожидалось, сезонный цикл  $O_2$  идет в противофазе с циклом  $CO_2$  (рис. 11). По приведённым оценкам, амплитуды сезонных циклов  $CO_2$  и  $O_2$  составляют  $26,6 \text{ млн}^{-1}$  и  $134 \text{ ppb}$  соответственно.

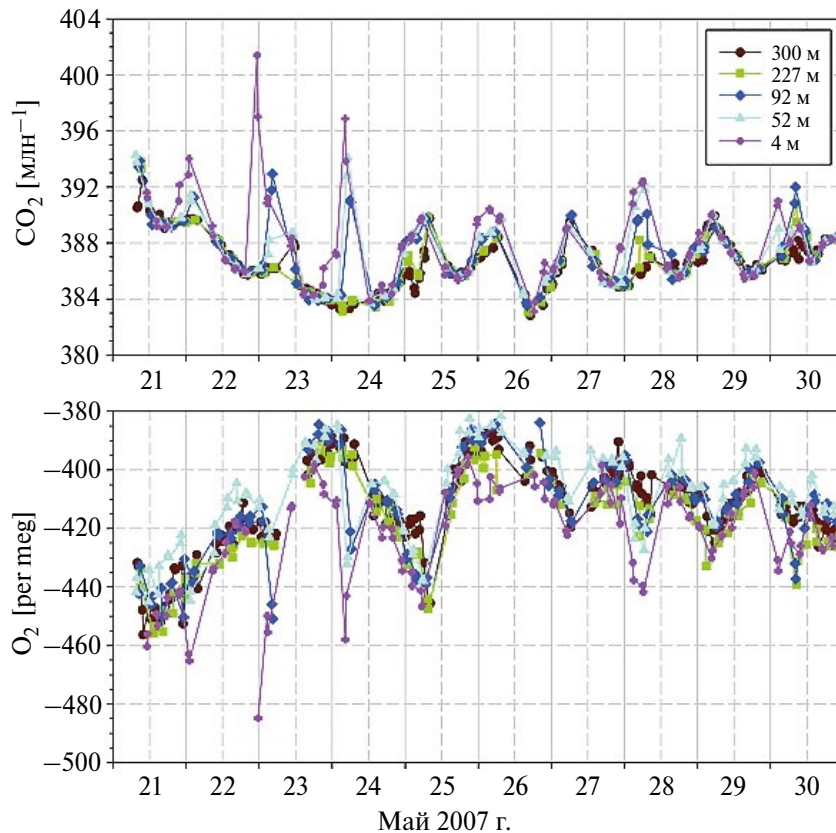
В зимние месяцы на станции ZOTTO  $O_2$  и  $CO_2$  не так сильно антикоррелированы, концентрация  $O_2$  устойчиво продолжала понижаться, достигнув минимума в феврале, концентрация  $CO_2$  повышалась до ноября, затем стабилизировалась. По всей вероятности, в центральных районах Сибири в холодный период при устойчивом снежном покрове наземное биотическое дыхание достигает своего минимума, о чем свидетельствует очень широкий максимум  $CO_2$ .

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

В 2004 г. московская городская служба «Мосэкомониторинг» провела натурные испытания прибора Ntron модели 3100 в условиях городской атмосферы. Принцип работы газо-



**Рис. 10.** Средние значения потребления ( $O_c$ ) и производства ( $O_p$ ) кислорода (2001–2015 гг.) в городских районах шести континентов



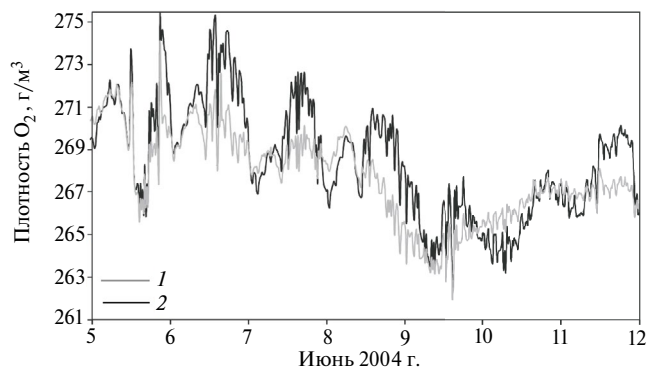
**Рис. 11.** Пример суточных вариаций концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  на высотной мачте ZOTTO на различных высотных уровнях с 21 по 31 мая 2007 г. Шкалы по оси Y были скорректированы таким образом, чтобы визуально концентрации  $\text{CO}_2$  ( $\text{млн}^{-1}$ ) и  $\text{O}_2$  (ppm) были напрямую сопоставимы. Каждая точка — среднее значение за 4 мин с интервалом 16 мин. Пунктирные вертикальные линии сетки соответствуют 12:00 (местное стандартное время) каждого дня; сплошные вертикальные линии сетки соответствуют 00:00 [Kozlova et al., 2008]

анализатора кислорода основан на электрохимическом преобразовании количества молекул кислорода в измеряемый электрический ток, величина которого пересчитывается в объемное содержание и плотность кислорода в анализируемом воздухе. Прибор работает непрерывно с временным разрешением 15 с.

Этот эксперимент позволил сравнить (рис. 12) измеряемые величины плотности кислорода с рассчитанными по формуле (2). Видно вполне удовлетворительное соответствие (в пределах  $3 \text{ г/м}^3$ , или около 1%), что позволяет анализировать уровень содержания кислорода в воздухе, рассчитывая его концентрацию по формуле (2) с использованием стандартного набора метеоданных:

$$p = C_k (P - e) / RT, \quad (2)$$

где  $p$  — парциальная плотность кислорода;  $C_k$  — объемное содержание кислорода в приземном



**Рис. 12.** Измеренные (1) и расчетные (2) данные плотности кислорода в приземном воздухе г. Москвы в июне 2004 г. (данные Мосэкомониторинга, ст. «Лосиный остров») [Гинзбург и др., 2014]

воздухе;  $P$ ,  $T$  и  $e$  — соответственно, давление, температура и упругость водяного пара в приземном воздухе;  $R$  — газовая постоянная [Гинзбург и др., 2023].

В последние годы проблеме недостатка кислорода в воздухе больших городов стало уделяться значительное внимание. Измерения содержания кислорода в приземном воздухе Москвы в тестовом режиме проводятся с начала XXI в., а с середины 2016 г. ведутся регулярные измерения на трех автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА): ГПБУ «Мосэкомониторинг» МАДИ, Черемушки и Туристская, которые расположены в разных районах города вблизи от автомагистралей и на территории жилой застройки.

Для измерений процентного содержания кислорода ГПБУ «Мосэкомониторинг» применяет анализаторы Т802 с магнитомеханическим 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 ( $\pm 0,5$ ).

## 7. СОВРЕМЕННЫЕ И ПРОГНОЗИРУЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА

Как уже отмечалось, даже небольшое снижение содержания кислорода во вдыхаемом воздухе может напрямую повлиять на самочувствие людей и на выживание отдельных биологически видов [Martin et al., 2017; Huang et al., 2018]. Так, обнаружено, что в районах с повышенным содержанием кислорода ожидаемая продолжительность жизни человека выше, чем в районах с более низким его содержанием [Zou et al., 2023].

Исследования показали, что концентрация кислорода остается почти постоянной с небольшими изменениями на разных высотах и в разные сезоны [Keeling, 1992; Cynthia, 2003; Cynthia, 2007; Stephens, 2018]. Однако в последние годы отмечается четкая тенденция на уменьшение среднего глобального содержания  $O_2$ . Особенный интерес представляют урбанизированные территории, где сосредоточено наибольшее количество потребителей кислорода. В усло-

виях изменения климата и учащения повторяемости экстремальных погодных явлений, особенно волн жары, масштабных лесных пожаров и растущей техногенной нагрузкой вопрос о содержании кислорода в воздушном бассейне становится все более актуальным.

В жаркую погоду или с приходом глубокого циклона, когда атмосферное давление понижено, нередко отмечаются условия погодной гипоксии. Такие условия могут формироваться, прежде всего, в городском воздухе, где активно идет сжигание топлива и, как правило, недостаточно зеленых насаждений для воспроизводства кислорода. Даже незначительное понижение концентрации кислорода (на 1,5–2% в суммарном объеме воздуха) ведет к дискомфорту: усталости, головокружениям, ослаблению внимания и другим симптомам.

Для человека комфортными считаются условия при содержании кислорода от 21,9 до 20,8%. При более низкой концентрации  $O_2$  могут проявляться симптомы гипоксии. Причем недостаточный уровень кислорода нередко фиксируется именно в крупных городах при неблагоприятных метеорологических условиях (штиль, продолжительные периоды жаркой погоды) вблизи крупных автомагистралей. Гипоксия свойственна и в условиях высокогорья, причем причинами ее являются не только разреженный воздух, но и более низкое процентное содержание кислорода. В настоящее время появляется все больше работ по изучению содержания кислорода в атмосфере, исследуются городские агломерации, где проживает значительная часть населения нашей планеты. Кроме того, немалый интерес представляют и измерения концентрации кислорода в удаленных (незагрязненных) районах, которые необходимы для понимания глобальной картины происходящих в настоящее время изменений, хотя эти перемены на здоровье человека никак не отразятся, поскольку чрезвычайно малы по сравнению с огромным резервуаром атмосферного кислорода.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдения, проведенные с конца 1980-х гг., показывают, что содержание  $O_2$  в атмосфере неуклонно снижается, однако в глобальном масштабе это сокращение малозаметно, и потребуются более 600 лет, чтобы уменьшить содержа-

ние кислорода всего лишь на 1% [Замолодчиков, 2006]. Основной причиной наблюдаемого сокращения кислорода служит сжигание ископаемого топлива. Наиболее значительный сток  $O_2$  отмечается в Восточной Азии, Индии, Северной Америке и Европе. В Центральной Африке значительное количество кислорода выводится из атмосферного воздуха в результате лесных пожаров [Wei et al., 2021]. При этом в районах, удаленных от больших городов, содержание кислорода в воздухе остается на комфортном уровне даже в период неблагоприятных синоптических условий. И в ближайшие десятилетия картина вряд ли существенно изменится. В то же время, содержание кислорода в агломерациях, особенно в густонаселенных районах, может и должно вызывать беспокойство. В связи с происходящими изменениями климата и учащением экстремального синоптического явления, такого как волны жары, содержание кислорода в городах может опускаться до неблагоприятного уровня, особенно вблизи загруженных автомагистралей, что существенно снижает качество городского воздуха и создает опасность для населения. Однако в настоящее время концентрация кислорода не фигурирует в сводках о погоде, ее нет и в расчетных индексах качества воздуха. Кроме того, как показано в [Гинзбург и др., 2023], применение формул для расчета концентрации кислорода не всегда дает верный результат. Таким образом, в крупных городах необходимы станции по мониторингу содержания кислорода и более детального изучения образования неблагоприятных условий. Данные наблюдений будут способствовать дальнейшему развитию исследований баланса кислорода в атмосфере в городских районах и послужат основой для планирования городского развития.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФА им. А.М. Обухова РАН (исторический обзор № 125021001827-3, современное состояние № 125020501413-6).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Будыко М.И., Ронов А.Б., Яншин А.Л. История атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 208 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., Лезина Е.А., Помелова М.А. Изменения содержания кислорода в городском воздухе под воздействием природных и антропогенных факторов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 4. С. 437–449.
- 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).
- Даванков В.А. Загадка атмосферного кислорода: фотосинтез или фотолиз? // Журнал физической химии. 2021. Т. 95. № 10. С. 1445–1453.
- 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 // Вестн. РАН. 2006. Т. 76. № 3. С. 209–218.
- Кислород — основа жизни / Под. ред. А.О. Сыровой. Харьков: Изд-во ХНМУ, 2013. 232 с.
- Ларин И.К. История озона. М.: РАН, 2022. 478 с.
- Никберг И.И., Ревуцкий Е.Л., Сакали Л.И. Гелиометрические реакции человека. Киев: Здоровье, 1986. 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. 139–142.
- Adcock K.E., Pickers P.A., Manning A.C. et al. 12 years of continuous atmospheric  $O_2$ ,  $CO_2$  and APO data from Weybourne Atmospheric Observatory in the United Kingdom // Earth Syst. Sci. Data. 2023. V. 15. P. 5183–5206. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5183-2023>
- Adcock K., Pickers P. Continuous measurements of atmospheric carbon dioxide ( $CO_2$ ) and oxygen ( $O_2$ ) at Heathfield Tower 2021–2022. NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis. 2022. <https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/bfc2483537a744dca8e3239278b6e522>

- Adcock K., Manning A., Kozlova E. et al.* 2024. Atmospheric GHG data product (O<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>\_stdev, CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>\_stdev), Weybourne (10.0 m). 2010-05-19–2023-12-31. Miscellaneous, <https://hdl.handle.net/11676/j4LzdHqIq3f-PgfNeXHruC0Bb>
- Benedict F.G.* The Composition of the Atmosphere with Special Reference to its Oxygen Content. Washington: Carnegie Institution of Washington, 1912. 132 p.
- 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.
- Carpenter T.M.* The constancy of the atmosphere with respect to carbon dioxide and oxygen content // *J. Am. Chem. Soc.* 1937. V. 59. P. 358–360.
- Chassefiere E.* Hydrodynamic escape of hydrogen from a hot water-rich atmosphere: The case of Venus // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. 26039–26056.
- Davankov V.A.* Critical review on the origin of atmospheric oxygen: Where is organic matter? // *Planetary and Space Science.* 2020. V. 190. P. 105023. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.105023>
- Cynthia M.B.* High-altitude adaptations // *The Lancet Extreme medicine.* 2003. V. 362. P. 14–15.
- Cynthia M.B.* Two routes to functional adaptation: Tibetan and Andean high-altitude natives // *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2007. V. 104. P. 8655–8660. <https://doi.org/10.1073/pnas.0701985104>
- Forster G.* Weybourne Atmospheric Observatory: Long term measurements of atmospheric O<sub>2</sub>. NCAS British Atmospheric Data Centre. 2012 <https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/b3f9714c956f428a840211e0184e23eb>
- 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>).
- Hunten D.* The Escape of Light Gases from Planetary Atmospheres // *J. Atmos. Sci.* 1973. V. 30. P. 1481–1494.
- Hunten D., Strobel D.* Production and Escape of Terrestrial Hydrogen // *J. Atmos. Sci.* 1974. V. 31. P. 305–317.
- 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. Leit-zell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)] / Cambridge: Cambridge University Press, 2021. 2391 p. <https://doi.org/10.1017/9781009157896> (<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1>).
- Ishidoya S., Sugawara H., Terao Y. et al.* O<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub> exchange ratio for net turbulent flux observed in an urban area of Tokyo, Japan, and its application to an evaluation of anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions // *Atmos. Chem. Phys.* 2020. V. 20. P. 5293–5308. <https://doi.org/10.5194/acp-20-5293-2020>
- Ishidoya S., Tsuboi K., Niwa Y., Matsueda H., Murayama S., Ishijima K., Saito K.* Spatiotemporal variations of the d(O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>), CO<sub>2</sub> and d(APO) in the troposphere over the western North Pacific, *Atmos. Chem. Phys.* 2022. V. 22. P. 6953–6970. <https://doi.org/10.5194/acp-22-6953-2022>
- Jianping Huang, Jiping Huang, Xiaoyue Liu et al.* The global oxygen budget and its future projection // *Science Bulletin.* 2018. V. 63. P. 1180–1186.
- Kasting J., Pollack J.* Loss of Water from Venus. I. Hydrodynamic Escape of Hydrogen. *Icarus.* 1983. V. 53. P. 479–508.
- Keeling R.F., Manning A.C.* Studies of Recent Changes in Atmospheric O<sub>2</sub> Content, 2nd ed., Elsevier Ltd. 2014. P. 385–404. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00420-4>
- 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. № 2. P. 153–176.
- Keeling R.F., Manning A.C., McEvoy E.M., Shertz S.R.* Methods for measuring changes in atmospheric O<sub>2</sub> concentration and their application in southern hemisphere air // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103(D3). P. 3381–3397. <https://doi.org/10.1029/97JD02537>
- Keeling R.F., Najjar R.P., Bender M.L., Tans P.P.* What atmospheric oxygen measurements can tell us about global carbon cycle // *Global Biogeochemical Cycles.* 1993. V. 7. № 1. P. 37–67.
- Keeling R.F., Powell F.L., Shaffer G., Robbins P.A. and Simonson T.S.* Impacts of Changes in Atmospheric O<sub>2</sub> on Human Physiology. Is There a Basis for Concern? // *Front. Physiol.* 2021. V. 12. P. 1–16. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.571137>
- Kozlova E.A., Manning A.C., Kisilyakhov Y., Seifert T., and Heimann M.* Methodology and calibration for continuous measurements of biogeochemical trace gas and O<sub>2</sub> concentrations from a 300-m tall tower in central Siberia // *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* 2008. № 1. P. 281–320. [www.atmos-meas-tech-discuss.net/1/281/2008/](http://www.atmos-meas-tech-discuss.net/1/281/2008/)
- Krogh A.* The composition of the atmosphere / *Det Kgl. Danske Videnskaberne Selskab.* Copenhagen, 1919. 12 p.
- Lan X., Tans P., Thoning K.W.* Trends in globally-averaged CO<sub>2</sub> determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2025-01. <https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07>

- Li Wang, Xiaoyue Liu, Jianping Huang.* High-precision Observation of Atmospheric Oxygen in a Typical Industrial City of Lanzhou // *Advances in Earth Science.* 2023. V. 38. № 7. P. 715–728.
- Lockhart E.E., Court A.* Oxygen deficiency in Antarctic air // *Mon. Weather Rev.* 1942. V. 70. P. 93–96.
- Machta L., Hughes E.* Atmospheric oxygen in 1967 to 1970 // *Science.* 1970. V. 168. P. 1582–1584.
- Manning A.C., Keeling R.F., Severinghaus J.* Precise atmospheric oxygen measurements with a paramagnetic oxygen analyzer // *Global Biogeochemical Cycles.* 1999. V. 13. No 4. P. 1107–1117.  
<https://doi.org/10.1029/1999GB900054>
- Martin D., McKenna H., Livina V.* The human physiological impact of global deoxygenation // *J. Physiol. Sci.* 2017. V. 67. P. 97–106.
- Morgan E., Stephens B.B., Long M.C. et al.* Summertime Atmospheric Boundary Layer Gradients of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> over the Southern Ocean // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2019. V. 124. № 23. P. 13439–13456.  
<https://doi.org/10.1029/2019JD031479>
- Nevison C.D., Munro D.R., Lovenduski N.S., Keeling R.F., Manizza M., Morgan E.J. and Rodenbeck C.* Southern Annular Mode Influence on Wintertime Ventilation of the Southern Ocean Detected in Atmospheric O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> Measurements // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. e2019GL085667.  
<https://doi.org/10.1029/2019gl085667>
- Nguyen L.N.T., Meijer H.A.J., van Leeuwen C., Kers B.A.M., Scheeren H.A., Jones A.E., Brough N., Barningham T., Pickers P.A., Manning A.C., Luijckx I.T.* Two decades of flask observations of atmospheric δ(O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>), CO<sub>2</sub> and APO at stations Lutjewad (the Netherlands) and Mace Head (Ireland), and 3 years from 990 Halley station (Antarctica) // *Earth Syst. Sci. Data.* 2022. V. 14. P. 991–1014.  
<https://doi.org/10.5194/essd-14-991-2022>
- Peng J., Wang A., Liu Y., Weidong W.* Assessing the Atmospheric Oxygen Balance in a Region of Rapid Urbanization: A Case Study in the Pearl River Delta, China // *Sustainability.* 2015. V. 7. P. 13055–13072.  
<https://doi.org/10.3390/su71013055>
- Petsch S.T.* The global oxygen cycle / In *Treatise on geochemistry. Second Edition.* Ed. Holland H.D. and Turekian K.K. Elsevier. 2014. V. 10. P. 437–473.
- Pickers P.* New applications of continuous atmospheric O<sub>2</sub> measurements: meridional transects across the Atlantic Ocean, and improved quantification of fossil fuel derived CO<sub>2</sub>, Ph.D. thesis. Norwich: University of East Anglia, 2016. 262 p. [https://cramlab.uea.ac.uk/Documents/Pickers\\_Penelope\\_PhD\\_Thesis\\_2016.pdf](https://cramlab.uea.ac.uk/Documents/Pickers_Penelope_PhD_Thesis_2016.pdf)
- Radkevich M., Shipilova K., Pochuzhevskiy O. et al.* Assessment of oxygen concentration reduction near the highway-importance for health and quality of life // *International Journal for Quality Research.* 2022. V. 16. № 3. P. 863–876.
- Rödenbeck C., Adcock K.E., Erritt M., Gachkivsky M., Gerbig C., Hammer S., Jordan A., Keeling R.F., Levin I., Mair F., Manning A.C., Moosen H., Munassar S., Pickers P.A., Rothe M., Tohjima Y. & Zaehle S.* The suitability of atmospheric oxygen measurements to constrain Western European fossil-fuel CO<sub>2</sub> emissions and their trends // *Atmos. Chem. Phys.* 2023. V. 24. P. 15767–15782.  
<https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-767>
- Rumble J.R.* CRC Handbook of Chemistry and Physics, 103-rd ed. 2022–2023. Boca Raton: CRC Press, 2022. 1650 p.
- Resplandy L., Keeling R.F., Eddebbar Y., Brooks M., Wang R., Bopp L., Long M.C., Dunne J.P., Koeve W., and Oschlies A.* Quantification of ocean heat uptake from changes in atmospheric O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> composition // *Sci. Rep.* 2019. V. 9.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-56490-z>
- Severinghaus J.P.* Studies of the terrestrial O<sub>2</sub> and carbon cycles in sand dunes gases and in Biosphere 2. PhD thesis. NY: Columbia University, 1995. 148 p.
- Shepherd M.* The composition of the atmosphere at approximately 21.5 kilometers, U.S. Army Stratosphere Flight of 1935 in Balloon Explorer II // *National Geographic Society.* 1935. P. 117–133.
- Shi P., Chen Y., Zhang G. et al.* Factors contributing to spatial–temporal variations of observed oxygen concentration over the Qinghai-Tibetan Plateau // *Sci. Rep.* 11. 17338 (2021).  
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-96741-6>
- Shipilova K.B., Abdukodyrova M.N., Tilovova B.R.* Assessment of atmospheric air quality in the city of Termez // *Universum: технические науки: электрон. научн. журн.* 2023. Т. 111. № 6. <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/15640>
- Sirignano C., Neubert R.E.M., Rödenbeck C., and Meijer H.A.J.* Atmospheric oxygen and carbon dioxide observations from two European coastal stations 2000–2005: continental influence, trend changes and APO climatology // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. P. 1599–1615.  
<https://doi.org/10.5194/acp-10-1599-2010>
- Stephens B.B. et al.* The O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> ratio and CO<sub>2</sub> Airborne Southern Ocean (ORCAS) study // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2018. V. 99. P. 381–402.
- Stephens B., Morgan E., Bent J. et al.* Airborne measurements of oxygen concentration from the surface to the lower stratosphere and pole to pole // *Atmos. Measur. Tech.* 2021. V. 14. P. 2543–2574.  
<https://doi.org/10.5194/amt-14-2543-2021>

- Stephens B.B., Keeling R.F., Heimann M., Six K.D., Murnane R., Caldeira K.* Testing global ocean carbon cycle models using measurements of atmospheric O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> concentration // *Global Biogeochem. Cycles*. 1998. V. 12. P. 213–230. <https://doi.org/10.1029/97GB03500>
- Sturm P.* Atmospheric oxygen and associated tracers from flask sampling and continuous measurements: tools for studying the global carbon cycle, Ph.D. thesis. Bern: University of Bern, 2005.
- Treatise on geochemistry / Ed. Holland H.D. and Turekian K.K. Elsevier, 2014.
- Uglietti C., Leuenberger M., Brunner D.* European source and sink areas of CO<sub>2</sub> retrieved from Lagrangian transport model interpretation of combined O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> measurements at the high alpine research station Jungfraujoch // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. № 15. P. 8017–8036. <https://doi.org/10.5194/acp-11-8017-2011>
- Valentino F.L., Leuenberger M., Uglietti C., Sturm P.* Measurements and trend analysis of O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> and δ<sup>13</sup>C of CO<sub>2</sub> from the high altitude research station Jungfraujoch, Switzerland — a comparison with the observations from the remote site Puy de Dome, France // *Sci. Total Environ.* 2008. V. 391. P. 203–210.
- Wei Y., Wu J., Huang J., Liu X., Han D., An L., Yu H., Huang J. et al.* Declining Oxygen Level as an Emerging Concern to Global Cities // *Environ. Sci. Technol.* 2021. V. 55. P. 7808–7817. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00553>
- Yin K., Lu D., Tian Y., Zhao Q., Yuan C.* 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>
- Zou Q., Lai Y., Lun Z.R.* Exploring the Association between Oxygen Concentration and Life Expectancy in China: A Quantitative Analysis // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2023. V. 20. № 2. P. 1125. <https://doi.org/10.3390/ijerph20021125> PMID: 36673882; PMCID: PMC9859324.

## HISTORICAL AND CURRENT TRENDS IN ATMOSPHERIC OXYGEN CONTENT

© 2026 A.S. Ginzburg\*, N.V. Pankratova, M.A. Pomelova

*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

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

Oxygen is vital for humans and animals. Nevertheless, undeservedly inadequate attention has been paid to trends and variability of its content in surface air until recently. This is due to the fact that the percentage of oxygen in the Earth's atmosphere varies slightly, and the fact that measuring these small changes is a rather difficult technical task. However, even small changes in the oxygen content in the inhaled air turn out to be very sensitive for people, especially during heat waves, which are becoming more frequent and intensified in conditions of rapid climate change. This review is devoted to the history of the development of knowledges about changes in oxygen content in the atmosphere and a review of research in recent decades, when the results of measurements of oxygen content in background and urban conditions appeared.

**Keywords:** atmospheric composition, air oxygen content, instruments and measurement methods, oxygen in planetary atmospheres, history of atmospheric oxygen research