

УДК 551.510.41; 614

## СОДЕРЖАНИЕ КИСЛОРОДА В АТМОСФЕРЕ КРУПНЫХ ГОРОДОВ И ПРОБЛЕМЫ ДЫХАНИЯ

© 2014 г. А.С. Гинзбург<sup>1</sup>, А.А. Виноградова<sup>1</sup>, Е.И. Фёдорова<sup>1</sup>, Е.В. Никитич<sup>2</sup>,  
А.В. Карпов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> ГПБУ «Мосэкомониторинг», г. Москва, Россия

Содержание кислорода в атмосферном воздухе городов, а также в жилых, офисных и производственных помещениях является важнейшим фактором самочувствия и здоровья горожан. При высокой температуре и высокой абсолютной влажности приземного воздуха, как это было летом 2010 г. в центральной части Европейской территории России, содержание кислорода в атмосферном воздухе минимально, и люди могут испытывать признаки гипоксии. В больших городах существуют дополнительные факторы, затрудняющие дыхание человека: более высокая (относительно окружающей территории) температура воздуха и загрязненность атмосферы угарным газом и взвешенными частицами. Это приводит к повышению заболеваемости и смертности городского населения в условиях аномальной жары и природных пожаров.

*Ключевые слова:* атмосфера, кислород, аномальная жара, пожары, самочувствие населения крупных городов, смертность населения.

PACS: 82.33.Tb

### Введение

Содержание в окружающем воздухе кислорода, необходимого для дыхания, является ключевым фактором, определяющим самочувствие человека. Массовая концентрация кислорода в приземном воздухе (а именно эта величина важна для дыхания) зависит от температуры, давления и влажности воздуха и в естественных условиях описывается классическими формулами термодинамики.

Природные источники и стоки кислорода на протяжении последних тысячелетий сбалансировали процентное содержание кислорода в атмосфере Земли на уровне 20.95 %, что на сегодня является практически «мировой константой». Однако уровень развития промышленности и сельского хозяйства, сжигание ископаемых видов топлива и другие антропогенные процессы, а также природные и техногенные пожары, гло-

бальное изменение климата меняют величину содержания кислорода в воздухе конкретного места.

Изменение климата и загрязнение атмосферы наиболее сильно проявляются в условиях современных быстрорастущих мегаполисов, особенно в развивающихся странах. Эти процессы могут приводить и уже приводят к уменьшению содержания кислорода в атмосфере больших городов, где проживает более половины населения Земли.

Широко известно, что недостаток кислорода в воздухе вызывает у человека гипоксию – пониженное содержание кислорода в организме [Гипоксия..., 2000]. Население городских агломераций ощущает также недостаток кислорода, вызванный экологическими факторами и в первую очередь повышенным содержанием в городском воздухе угарного газа и взвешенных частиц (аэрозолей), мешающих правильному усвоению кислорода человеческим организмом.

В настоящее время многие интернет-сайты как в России, так и в других странах информируют широкую общественность о содержании кислорода в воздухе, рассчитывая его концентрацию по классической формуле (см. ниже). Однако не всегда квалифицированное использование общедоступной информации может привести к весьма противоречивым выводам. Так, летом 2010 г. многие сообщения СМИ о погоде в г. Москве, мягко говоря, существенно различались. Например, 20.07.2010 г. «РБК Daily» цитирует руководителя Федеральной службы РФ по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) А. Фролова, который предупреждал о том, что в связи со смогом у москвичей и гостей столицы может развиваться гипоксия, поскольку из-за жары концентрация кислорода снизилась на 15–20 %. Однако его квалифицированное мнение не показалось СМИ достаточно пугающим и 5 августа интернет-ресурс «VigpowerNews» сообщил, что в г. Москве «жара вызвала погодную гипоксию, содержание кислорода в воздухе снизилось почти в 2 раза», а 12 августа РИА «Новости» публикует материал под броским заголовком «Содержание кислорода в московском воздухе почти в 4 раза ниже нормы». Так сколько же кислорода было в московском воздухе жарким летом 2010 г. и как это сказывалось на здоровье людей?

Авторы настоящей статьи постарались суммировать и проанализировать имеющиеся данные о пространственно-временной изменчивости и эпизодах аномального содержания кислорода в приземном воздухе в контексте их возможного влияния на самочувствие людей. Поскольку происходящие на планете климатические изменения способствуют более частому возникновению различных аномальных ситуаций [Fung et al., 2013], такое исследование актуально не только для москвичей. В последние несколько лет в условиях сильной жары и пожаров на ближайших территориях оказывались жители других городов России (например, г. Томска и г. Новосибирска в 2012 г.) и Европы.

### Содержание кислорода в атмосферном воздухе

Процентное содержание кислорода ( $O_2$ ) в сухом воздухе у поверхности Земли в настоящее время считается практически постоянной величиной, равной 20.95 %. Однако в истории Земли этот процент бывал и значительно ниже, и заметно выше, да и сейчас имеет некоторую тенденцию к снижению. Согласно современным данным в стандартной модели атмосферы предполагается состав сухого воздуха, приведенный в табл. 1 [Атмосфера..., 1991]. Напомним, что объемная доля равна молярной доле только для идеального газа, а также, что в состав сухой атмосферы не включен водяной пар, который в целом занимает в атмосфере ~0.4 %, а в приземном воздухе – от 1 до 4 % объема. Следовательно, в воздухе, которым дышит человек, доли всех газов несколько меньше величин, приведенных в табл. 1 (в зависимости от влажности).

**Таблица 1.** Газовый состав сухой атмосферы

Газ	Объем	
	ppm	%
Азот (N <sub>2</sub> )	780 840	78.084
Кислород (O <sub>2</sub> )	209 460	20.946
Аргон (Ar)	9340	0.9340
Диоксид углерода (CO <sub>2</sub> )	394.45	0.039445
Неон (Ne)	18.18	0.001818
Гелий (He)	5.24	0.000524
Метан (CH <sub>4</sub> )	1.79	0.000179
Криптон (Kr)	1.14	0.000114
Водород (H <sub>2</sub> )	0.55	0.000055
Оксид азота (N <sub>2</sub> O)	0.325	0.0000325
Оксид углерода (CO)	0.1	0.00001
Ксенон (Xe)	0.09	0.000009
Озон (O <sub>3</sub> )	0.0–0.07	0–0.000007
Диоксид азота (NO <sub>2</sub> )	0.02	0.000002

*Примечание.* ppm – объемная доля газа (в частях на миллион).

В глобальном масштабе запасы молекулярного кислорода в атмосфере велики и составляют 1 184 000 Гт [Замолодчиков, 2006]. Его современные ежегодные потери в результате антропогенной деятельности с учетом круговорота в природе находятся в пределах 14–20 Гт, что соответствует 0.0013–0.0019 % от запаса кислорода в атмосфере. При нынешних темпах потребления человечеству нужно более 600 лет, чтобы уменьшить содержание кислорода в атмосфере на 1 %.

Оценим возможное уменьшение количества кислорода в связи с увеличением количества парниковых газов. Считается, что непосредственно перед началом индустриальной эпохи в XIX в. содержание CO<sub>2</sub> в атмосфере было около 260–280 ppm и оно мало менялось на протяжении предыдущих 10 000 лет. В начале XXI в. концентрация CO<sub>2</sub> превысила 390 ppm (см. табл. 1). Предположим, что количество молекул остальных газов (кроме N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>) в единице объема воздуха не изменилось, а только к 1 млн молекул «доиндустриального» воздуха добавилось примерно 120 молекул CO<sub>2</sub>. Тогда при пропорциональном уменьшении объемной доли основных составляющих – азота и кислорода – процентное содержание кислорода снизилось очень незначительно – примерно на 0.05 %.

Кроме увеличения количества парниковых газов, есть ряд других причин изменения содержания кислорода в атмосфере. В глобальном масштабе возможно его уменьшение за счет сгорания при использовании ископаемого и растительного топлива, а также при природных пожарах. Однако по оценкам [Замолодчиков, 2006] это уменьшение не является существенным. Возможны и температурные эффекты: глобальное повышение температуры приземного воздуха и так называемые острова тепла в больших городах и индустриальных центрах приводят к некоторому снижению средней (глобальной) и локальной (в городах) плотности кислорода.

### Кислород и дыхание человека

Биологам и медикам хорошо известно, что самочувствие людей определяется не относительной долей кислорода в общем газовом составе воздуха, а его массовым содержанием в единице объема, т.е. парциальной плотностью кислорода, измеряемой в г/м<sup>3</sup>. И недостаток, и избыток кислорода в атмосферном воздухе весьма заметно влияют на самочувствие и здоровье человека.

Классические примеры возникновения проблем с обеспечением кислородом организма человека, обычно живущего на среднеширотной равнине, – это резкое изменение положения над уровнем моря (поднятие в горы) и перемещение в более холодные районы (Арктика, Антарктика). Так, при подъеме на высоту около 1000 м над ур. моря происходит уменьшение парциальной плотности кислорода в воздухе на 30–33 г/м<sup>3</sup>. (Вертикальный градиент парциальной плотности кислорода в атмосфере над равнинной поверхностью составляет 3.3 г/м<sup>3</sup> на 100 м [Овчарова, 1988].)

Наоборот, в полярных областях Земли концентрация кислорода существенно выше по сравнению с умеренными районами за счет более высокого давления и низких температур. Это приводит к развитию в организме человека так называемой вторичной гипероксической гипоксии [Овчарова, 1988]. Имеет место обратный физиологический ответ человеческого организма, когда в результате избыточного поступления в организм кислорода развивается комплекс физиологических и патологических реакций [Никберг и др., 1986], приводящих к угнетению внешнего дыхания с резким уменьшением объема легочной вентиляции. Возникает гиперкапния – уменьшение удаления углекислого газа из организма через легкие и нарастание его содержания в крови человека. Механизм приспособления к подобным условиям в человеческом организме отсутствует.

Для жизни человеку важна парциальная плотность кислорода в приземной атмосфере, которая в среднем составляет около 285 г/м<sup>3</sup> и определяется уравнением состояния для сухой части воздуха:

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

где  $\rho$  – парциальная плотность кислорода;  $C_k$  – объемное содержание кислорода в приземном воздухе;  $P$ ,  $T$  и  $e$  – соответственно давление, температура и упругость водяного пара в приземном 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 и в циклональных условиях, например перед грозой, когда давление резко понижается. 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], табл. 2).

Недостаток или избыток кислорода в герметично замкнутых объемах, промышленных, офисных и жилых помещениях и на открытом воздухе объясняется одними и теми же, но по-разному протекающими термодинамическими процессами. В технике и медицине давно используются различные барокамеры, например при подготовке космонавтов, для лечения ряда заболеваний или адаптации пациентов после тяжелых операций. Попробуем разобраться, что же происходит с кислородом в реальной жизни и что – в экспериментальных помещениях и камерах.

**Таблица 2.** Классификация типов погоды по влиянию отклонений плотности атмосферного кислорода от среднего ( $285 \text{ г/м}^3$ ) значения на самочувствие людей [Овчарова, 1988]

Типы погоды	Абсолютные отклонения $\rho, \text{ г/м}^3$	Самочувствие людей и неблагоприятные симптомы
Благоприятная	5	Хорошее
Умеренно-неблагоприятная	5–10	Сонливость, утомляемость
Неблагоприятная	10–15 и более	Головная боль, потеря сознания

Так, в замкнутом объеме (космический корабль, подводная лодка или установка типа «Марс 500») повышение давления осуществляется путем добавления в этот объем какого-либо, например инертного, газа. В результате уменьшается процентное содержание кислорода и других газов, но не меняется их массовая концентрация. Последующее стравливание «лишнего» воздуха для восстановления первоначального давления приводит к тому, что сохраняется новое процентное содержание кислорода и уменьшается его массовая концентрация.

В негерметичном помещении добавление или выброс какого-либо газа (не кислорода) сначала увеличивает общее давление воздуха, но через имеющиеся отверстия «лишний» воздух выходит наружу и давление восстанавливается, а процентное содержание кислорода и его массовая концентрация уменьшаются.

На открытом воздухе при повышении приземной температуры уменьшается плотность воздуха у поверхности Земли и скорость падения плотности воздуха с высотой. Интегрально во всем атмосферном столбе количество молекул воздуха зависит только от приземного давления. При любых изменениях температуры, давления и влажности атмосферного воздуха процентное содержание в нем отдельных атмосферных газов (в пересчете на сухой воздух) сохраняется. При этом плотность или массовая концентрация (что одно и то же) этих газов в единице объема в приземном воздухе может меняться в довольно широких пределах.

### Измерения содержания кислорода в приземной атмосфере

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 ( $\text{N}_2$ ). При этом явно или неявно предполагается, что содержание азота в атмосферном воздухе неизменно или его изменениями можно пренебречь на основании меньшей относительной изменчивости по сравнению с кислородом (азота в воздухе почти в 4 раза больше, чем кислорода).

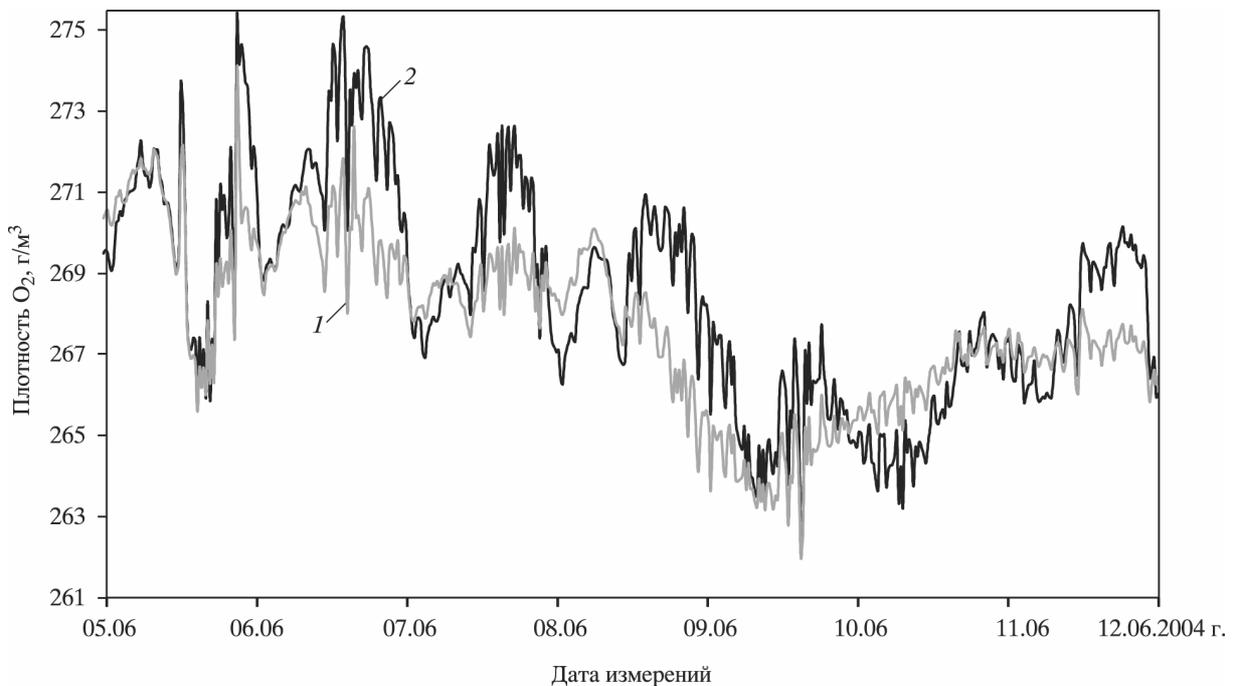
В последние десятилетия прецизионные измерения отношения  $\text{O}_2/\text{N}_2$  в приземном воздухе проводятся более чем на 25 станциях атмосферного мониторинга, из которых на 15 станциях ряды наблюдений составляют уже более 15 лет [Steinbach, 2010]. В большинстве случаев измерения производятся путем отбора атмосферного воздуха в герметичные флажки с последующим анализом проб различными методами в специ-

альных 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 бóльшим временным и пространственным разрешением.

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 закрытых помещениях за счет дыхания людей, использования нагревательных приборов и т.п. возможно снижение процентного содержания кислорода в воздухе. Напомним, что в отличие от вдыхаемого в выдыхаемом воздухе содержится примерно 16 % кислорода и 3.7–4.0 % углекислого газа, что существенно отличается от содержания этих газов в воздухе вне помещений (см. табл. 1). По некоторым оценкам не только в жилых и рабочих помещениях, но и на улицах современных мегаполисов процентное содержание кислорода в атмосферном воздухе приближается к его содержанию в выдыхаемом воздухе. Поскольку недостаток кислорода в 1.5–2.0 % вызывает головную боль, сонливость, повышенную утомляемость и другие нарушения активности головного мозга (см. [Гипоксия..., 2000], табл. 2), то неудивительно, что горожан эти недуги преследуют и на работе, и дома, и на улице.

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

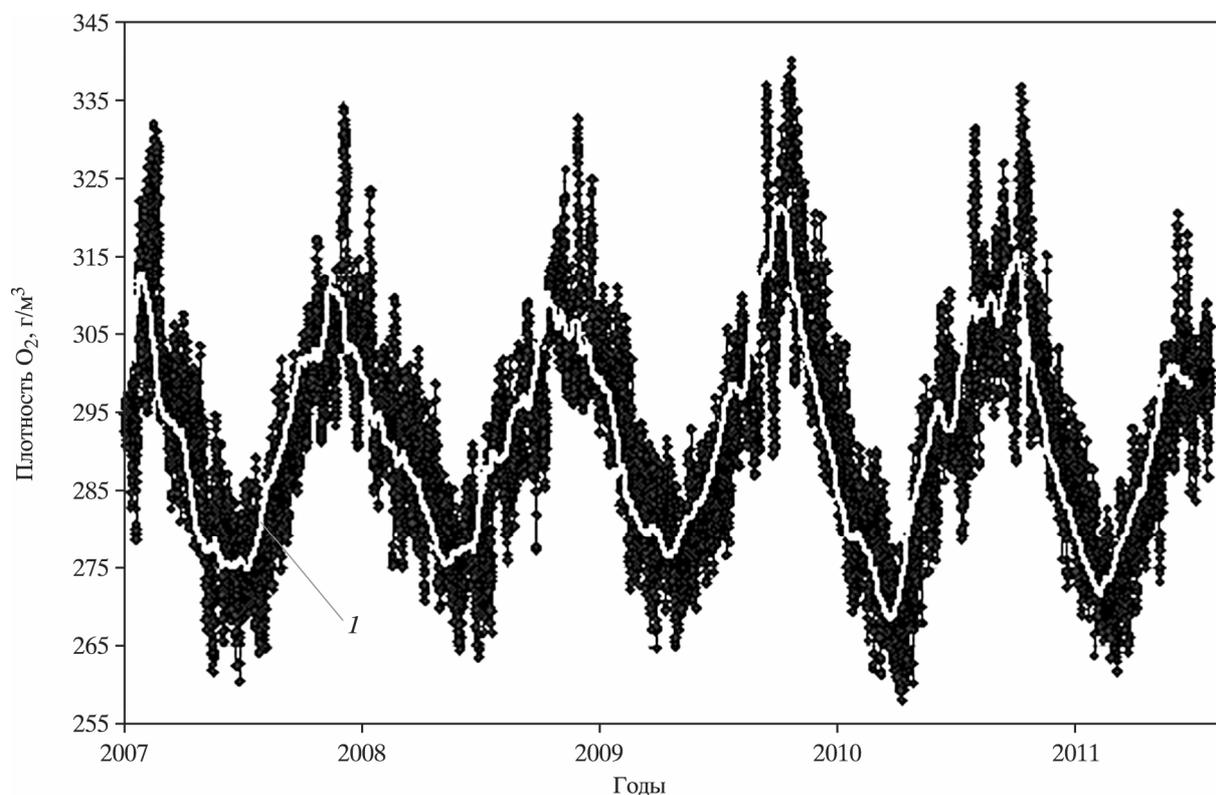


**Рис. 1.** Измеренные (1) и расчетные (2) данные измерений плотности кислорода в приземном воздухе г. Москвы в июне 2004 г. (данные Мосэкомониторинга, ст. «Лосиный остров»)

Этот эксперимент позволил сравнить (рис. 1) измеряемые величины плотности кислорода с рассчитанными по формуле (1). 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 (1) с использованием стандартного набора метеоданных. Именно результаты расчетов на основании имеющейся метеорологической информации положены в основу наших дальнейших рассуждений и выводов.

### Аномальные атмосферные условия жарким летом 2010 г. в г. Москве и окрестностях

Когда изменение содержания кислорода в воздухе происходит не слишком резко, человек успеваеет к нему приспособиться. Так, в течение года средние сезонные колебания концентрации кислорода в приземном воздухе (рис. 2) происходят в пределах допустимых медицинских показателей (табл. 2), а более сильные отклонения от среднегодового значения, критичные для самочувствия людей, происходят редко и ненадолго. Поэтому мы почти не замечаем этих сезонных вариаций.

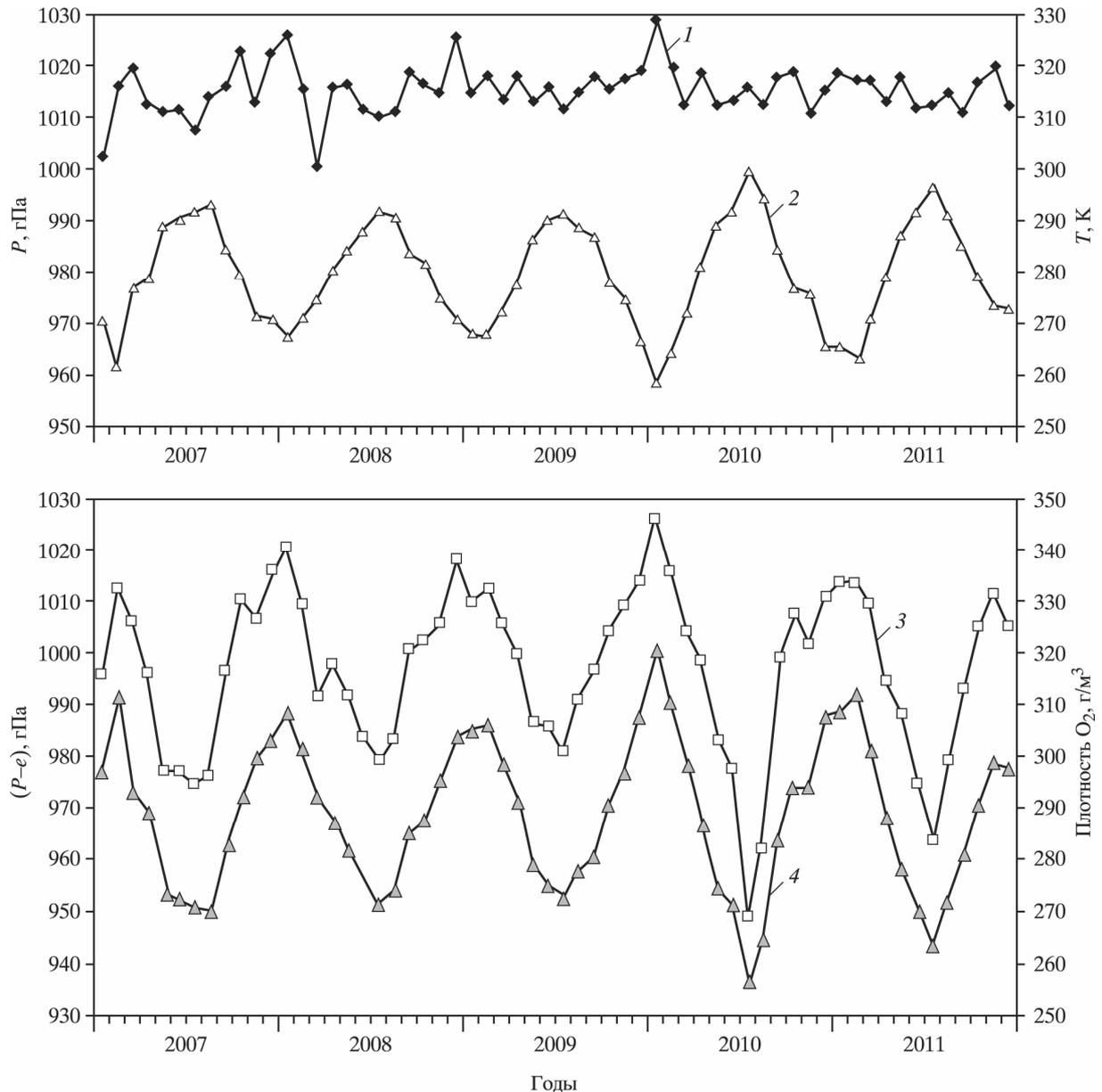


**Рис. 2.** Рассчитанный (каждые 3 ч) сезонный ход плотности кислорода в приземной воздухе г. Москвы за 2007–2011 гг. (ст. ВВЦ, по данным [Погода...])

1 – результат сглаживания

Многочисленные данные о содержании различных примесей в атмосфере в аномально жаркие месяцы (июль, август) в окрестностях г. Москвы в 2010 г. приводятся в целом ряде публикаций в разных изданиях.

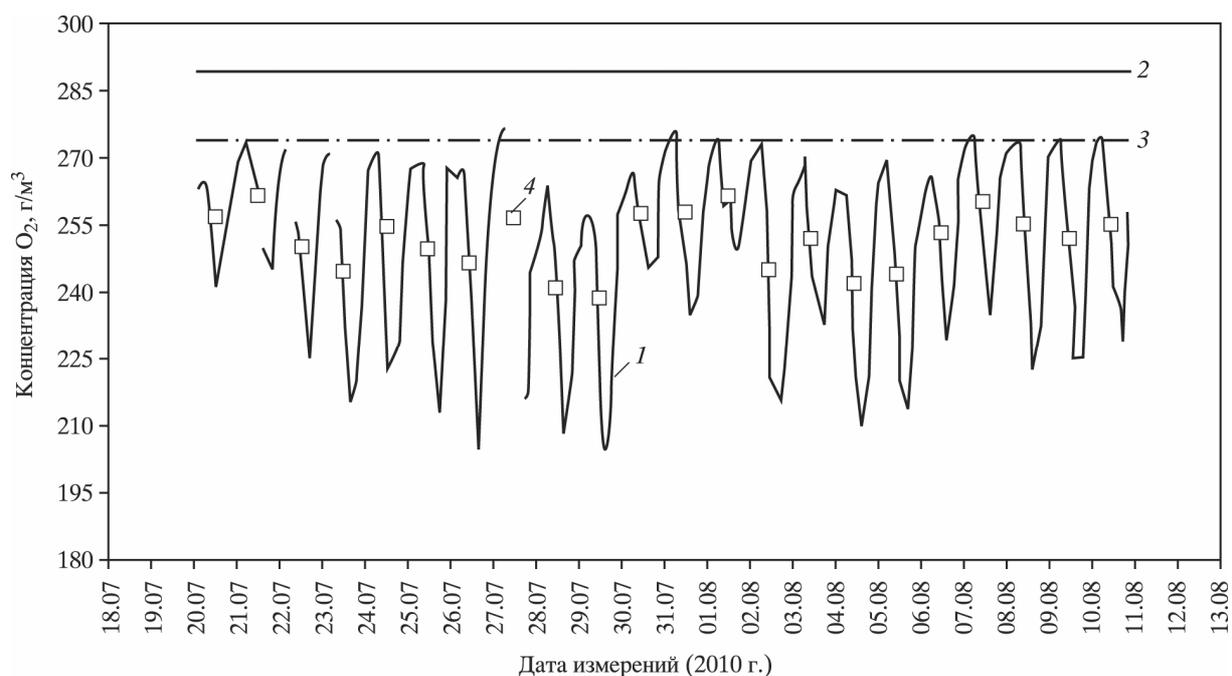
На рис. 3 приведены среднемесячные метеорологические характеристики приземного воздуха г. Москвы за последние несколько лет. Отчетливо выделяются аномально



**Рис. 3.** Среднемесячные значения давления (1), температуры (2), парциальной плотности кислорода (4), рассчитанной по формуле (1), давления сухого воздуха (3) в приземном воздухе г. Москвы за 2007–2011 гг. (ст. «ВВЦ», по данным [Погода...])

теплые июль и август 2010 г., которым соответствуют аномально низкие величины плотности кислорода. Обращаясь к формуле (1), можно сказать, что решающей переменной (для величины плотности кислорода  $\rho$ ) является температура  $T$  (коэффициент корреляции изменений  $\rho$  и  $T$  равен  $-0.994$ ), которая определяет парциальное давление водяного пара и соответственно сухого воздуха.

Летом 2010 г. в период пожаров на Европейской части территории России и, в частности, в окрестностях г. Москвы среднемесячная парциальная плотность кислорода в городе в июне, июле и августе была соответственно на 18, 32 и 24  $g/m^3$  ниже среднего уровня для предыдущих (2007–2011 гг.) 5 лет – 289  $g/m^3$ . При этом (рис. 4) в приземном воздухе круглосуточно в течение по крайней мере 20 дней содержание кислорода было ниже уровня, характеризуемого медиками как неблагоприятный для человека (см. табл. 2). В результате люди могли испытывать недомогания, обусловленные пониженным содержанием кислорода в окружающем воздухе.



**Рис. 4.** Рассчитанная (каждые 3 ч) концентрация кислорода (1) в приземном воздухе г. Москвы с 20.07 по 10.08.2010 г. Отмечены уровни средней за 5 лет (2), неблагоприятной (3) (см. табл. 2) и среднесуточной (4) концентрации кислорода

### Проблемы, связанные с дыханием жителей крупных городов в аномальных атмосферных условиях

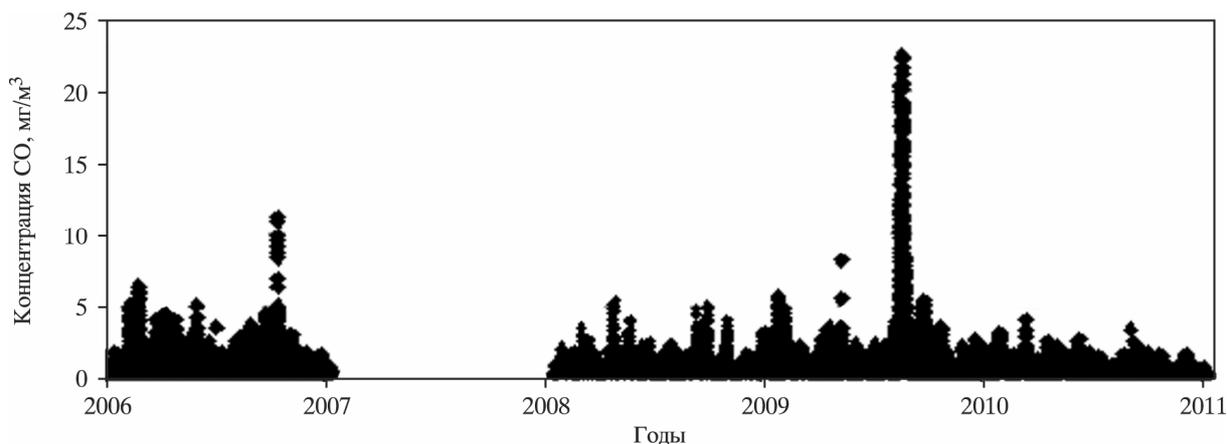
Гипоксия – типовой патологический процесс, который вызывается либо недостаточным поступлением кислорода в ткани клеток организма, либо нарушением процессов его использования при биологическом окислении [Гипоксия..., 2000]. Следовательно, гипоксия в организме человека может возникать не только из-за нехватки кислорода в объеме вдыхаемого воздуха, но и за счет угнетения дыхания и нарушения дыхательной функции другими составляющими атмосферы. Пожары на фоне жаркого лета опасны для здоровья населения больших городов не тем, что при этом сжигается какая-то доля кислорода, которая ничтожна по сравнению с имеющимися запасами, а непосредственными выбросами других загрязнителей воздуха и в первую очередь аэрозолей и оксида углерода.

В условиях засухи и пожаров на территории ближайших областей и при адвекции продуктов горения на город в воздухе г. Москвы (по данным [Ревич, 2010; Ситнов, 2011]) в течение нескольких суток были превышены не только среднесуточные, но и максимальные разовые значения ПДК для аэрозольных частиц (PM<sub>10</sub>) и угарного газа. В результате в городе формировались условия, способствующие развитию у человека гипоксии, вызванной низким содержанием кислорода и отягченной наличием других атмосферных примесей.

Взвешенные твердые частицы (в первую очередь субмикронного размера) раздражают слизистые оболочки дыхательных путей и препятствуют газовому обмену внутри легких, что способствует развитию гипоксии [Гипоксия..., 2000]. Этот эффект, присутствующий городской атмосфере даже в нормальных условиях, летом 2010 г. был усилен наличием в воздухе большого количества мелкодисперсной сажи от пожаров и пыли,

поднятой в воздух с высушенных окружающих территорий [Ревич, 2010]. В настоящей работе этот аспект не рассматривается, но осложнение процессов дыхания из-за наличия в воздухе аэрозольных частиц разного размера всегда необходимо иметь в виду.

С другой стороны, повышенное количество оксида углерода, или угарного газа, ( $\text{CO}$ ) в атмосфере (рис. 5) также существенно изменяет режим кислородного обмена и усвоения кислорода клетками крови, затрудняя деятельность сердца и дыхательных органов [Оксид..., 2007]. Угарный газ – продукт неполного сгорания веществ, содержащих углерод, – бесцветный газ, без запаха и вкуса, плохо растворимый в воде (21 мг/л), который может диффундировать через перегородки и стены жилых помещений и слои почвы [Тунов, Кустов, 1980]. Он способен нарушать процессы переноса кислорода в организме, попадая в легкие человека и оттуда в плазму крови, проникая в эритроциты и взаимодействуя там с белком гемоглобином – переносчиком кислорода от легких к тканям.



**Рис. 5.** Изменение концентрации оксида углерода в приземном воздухе г. Москвы с 2006 по 2011 гг. (данные Мосэкомониторинга, ст. «МГУ»)

Угарный газ имеет тот же механизм взаимодействия с гемоглобином, что и кислород, однако сродство гемоглобина к  $\text{CO}$  почти в 300 раз больше, чем к кислороду, что и определяет высокую ядовитость угарного газа [Отравление..., 2011]. Таким образом, в конкуренции за гемоглобин угарный газ имеет выраженное преимущество перед кислородом, поскольку он более эффективно занимает в молекулах гемоглобина связи, необходимые молекулам кислорода, и препятствует тем самым усвоению кислорода клетками крови. Образующееся при этом соединение карбоксигемоглобин – более прочное, чем оксигемоглобин – результат соединения гемоглобина с кислородом. Диссоциация карбоксигемоглобина протекает в 3600 раз медленнее, чем диссоциация оксигемоглобина. В результате кровь человека теряет способность переносить кислород, появляются симптомы острой кислородной недостаточности.

Нарастание в крови карбоксигемоглобина до 1–2 % может усугублять симптомы сердечно-сосудистых заболеваний (чтобы снабжение тканей кислородом оставалось на прежнем уровне, необходимо усиленное кровоснабжение); содержание в количестве 2–5 % приводит к нарушению психомоторных функций, более 5 % – к нарушениям сердечной деятельности и дыхания, более 10 % – к головной боли, утомляемости, сонливости, снижению работоспособности, коме, остановке дыхания и смерти [Отравление..., 2011]. Именно таковы симптомы отравления человека угарным газом.

Концентрация оксида углерода в приземном воздухе городов зависит от интенсивности движения транспорта и погодных условий и изменяется в широких пределах в

зависимости от направления ветра и расстояния от источника. ПДК угарного газа в воздухе производственных помещений составляет  $20 \text{ мг/м}^3$ , или  $0.02 \text{ мг/л}$ , в открытом воздухе: среднесуточная –  $3 \text{ мг/м}^3$ , максимальная разовая –  $5 \text{ мг/м}^3$ . Естественный уровень оксида углерода в воздухе –  $0.01\text{--}0.9 \text{ мг/м}^3$ , а на автострадах России средняя концентрация CO достигает  $6\text{--}60 \text{ мг/м}^3$ , превышая порог отравления.

Кроме того, летом 2010 г. в г. Москве в период аномальной жары и пожаров повышенная температура активизировала ряд процессов (сильный нагрев и плавление асфальта, органики и т.д.), которые поставляли в воздух формальдегид, различные тяжелые и легкие смолы и другие органические соединения, опасные для здоровья человека.

В группу риска в крупных городах в условиях жары и пожаров попадают в первую очередь люди с сердечно-сосудистыми заболеваниями и болезнями органов дыхания, а также дети и беременные женщины, хуже адаптирующиеся к изменению условий окружающей среды [Ревич, 2010].

### Увеличение количества смертей в крупных городах России в периоды жары и интенсивных пожаров в окрестностях

Анализ одного из статистических показателей состояния здоровья населения – смертности – показал его заметные изменения в Москве именно летом 2010 г. [Ginzburg et al., 2013] по сравнению с другими месяцами этого года и последними годами (рис. 6). Представленные на рис. 6 временные зависимости количества умерших жителей Москвы за месяц в период с 2007 по начало 2012 г. [Управление... города Москвы] демонстрируют значительное (до 50 %) возрастание смертности в июле и августе 2010 г. во время жары и пожаров.

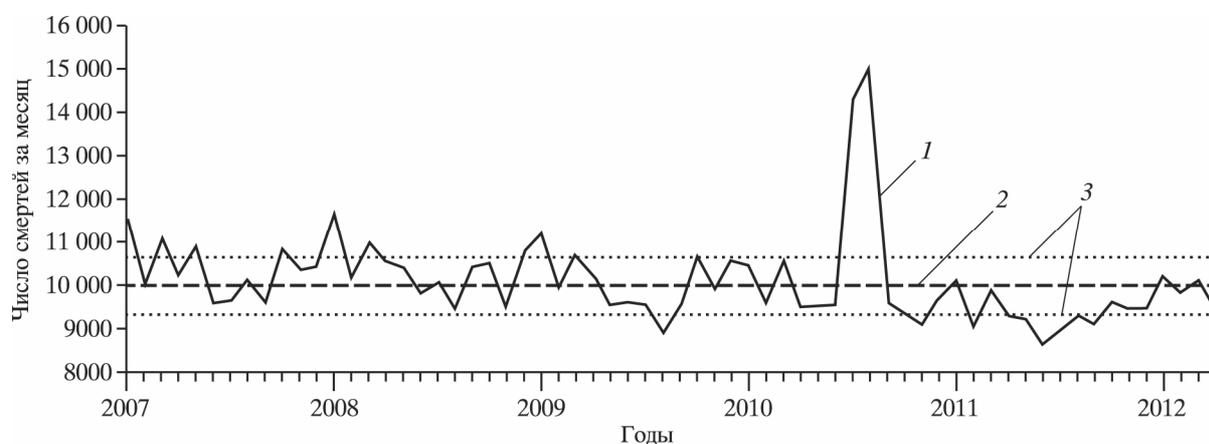
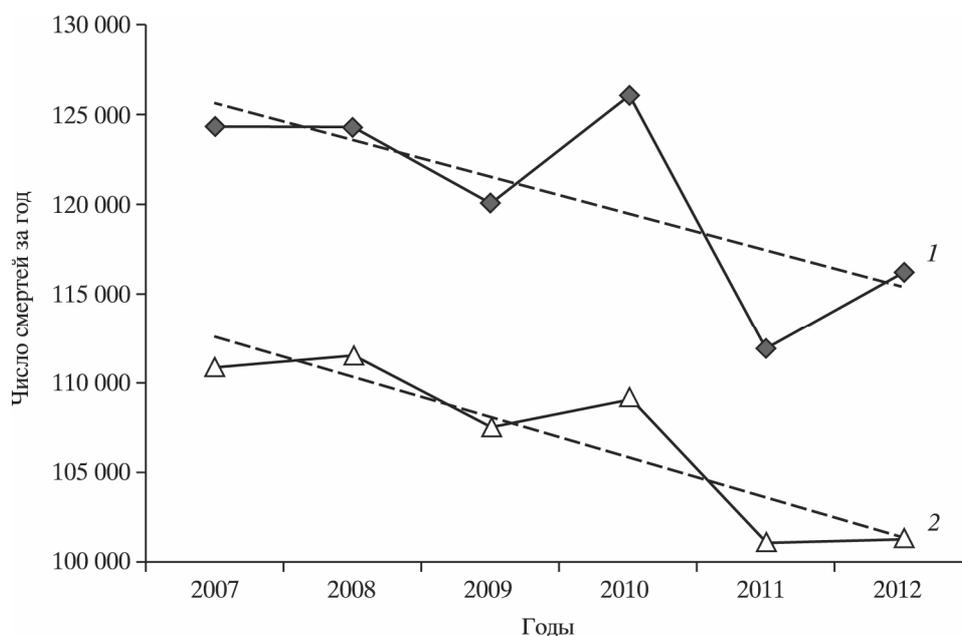


Рис. 6. Смертность (1) населения г. Москвы по месяцам за 2007–2012 гг.

Среднее значение (2) и стандартные отклонения (3) рассчитаны без учета данных за июль и август 2010 г.

Увеличение количества смертей в 2010 г. хорошо заметно даже по годовым значениям хода этого показателя за рассматриваемый период (рис. 7) – прирост составил около 6 %. Проявление таких же закономерностей и в годовой смертности жителей Московской обл. (прирост около 3 %, см. рис. 7) [Главное...] свидетельствует о значительном влиянии такого крупного мегаполиса, как Москва, на окружающие территории. Возможно, детализация аналогичных данных по отдельным районам и городам Подмосковья дала бы дополнительную информацию.

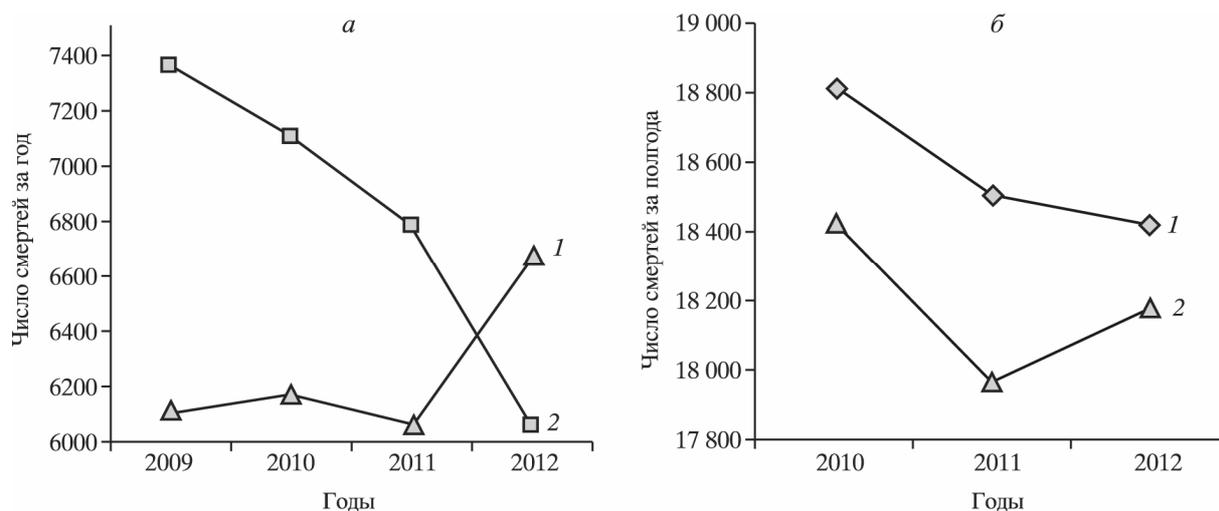


**Рис. 7.** Количество смертей среди населения г. Москвы (1) и Московской обл. (2) за год с 2007 по 2012 г. Штриховые линии – линейные тренды

Интересно, что уже в 2011 г. число смертей уменьшилось как в Москве, так и в Московской обл., что особенно заметно при годовом суммировании (см. рис. 7). Причем увеличение смертности в 2010 г. и ее уменьшение в 2011 г. как отклонения от линейного тренда по абсолютной величине близки. Мы предполагаем, что этот «отложенный» эффект может быть результатом уменьшения численности группы риска, которой в основном и определяется результирующее количество смертей, после экстремального количества смертей в предыдущем году. Кроме того, несомненно, должны существовать и другие «отложенные» эффекты, которые могли проявиться в изменении статистики заболеваемости живущей части населения.

Летом 2012 г. в Сибири сложилась обстановка, похожая на обстановку 2010 г. в г. Москве: около месяца (в основном в июле) стояла аномальная жара (максимальные температуры достигали  $+33.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и горели леса вблизи крупных городов, таких как Томск и Новосибирск. Содержание пыли, сажи и газообразных продуктов лесных пожаров в воздухе городов было выше нормальных летних значений [Бизин и др., 2013; Яушева и др., 2013]. Имеющиеся данные о смертности в этот период в Томске [Департамент...] и в Новосибирске [Управление...] представлены на рис. 8.

В Томске статистически значимо повышение годовой смертности в 2012 г. на 9 % по сравнению со средними значениями для предыдущих трех лет, различия между которыми были в пределах 1 %. К сожалению, недоступны данные по месяцам, но понятно, что цифры должны быть весьма убедительны при таком заметном эффекте даже по данным среднегодовой статистики. Отметим, что в отличие от Московской обл. в Томской обл. в 2012 г. количество смертей не возросло, а продолжало снижаться, как и в предыдущие годы. Поскольку Томск – небольшой город по сравнению с Москвой, это может служить косвенным подтверждением существенности рассматриваемых эффектов именно для населения крупных городов, подверженного сложной совокупности воздействий продуктов пожаров и антропогенных эмиссий.



**Рис. 8.** Количество смертей жителей Томска (а) и Новосибирска (б) за 2009–2012 гг.  
а: 1 – город; 2 – область. б: 1 – I полугодие; 2 – II полугодие

Для Новосибирска рассмотрены только последние три года, но по данным за полугодия. Информация для Новосибирской обл. отсутствует. На рис. 8 хорошо видно повышение смертности во втором полугодии 2012 г. (куда входит жаркий июль) в отличие от первого полугодия, когда смертность продолжала снижаться, как в предыдущие годы. Эти результаты косвенно (статистически незначимы) подтверждают наши выводы о существенном влиянии совокупности жаркой погоды и пожаров в окрестности крупных городов на здоровье городского населения.

### Заключение

Содержание кислорода в атмосферном воздухе городов и в различных жилых, офисных и производственных помещениях является важнейшим фактором самочувствия и здоровья горожан. Для оценки и регулирования роли этого фактора необходимо развивать систему мониторинга, оценки и прогноза содержания кислорода в городском воздухе, а также информирования населения об аномальных ситуациях нехватки или избытка кислорода.

Поскольку на самочувствие и здоровье человека непосредственно влияет массовая концентрация кислорода, которая может меняться как за счет изменения его процентного содержания, например в закрытом помещении, так и при изменении метеорологических условий, с научной и методической точек зрения необходимо унифицировать информацию о качестве воздуха для дыхания. Мы предлагаем окончательную информацию давать в терминах массовой концентрации кислорода (в  $\text{г}/\text{м}^3$ ), для которых уже существует медицинская классификация. Особое внимание необходимо уделить случаям минимального содержания кислорода в атмосферном воздухе, которое соответствует высокой температуре или высокой абсолютной влажности приземного воздуха. Первое имело место в условиях долгоживущего блокирующего антициклона летом 2010 г. в центральной части Европейской территории России.

В больших городах повышенная относительно окружающей территории температура воздуха и загрязненность атмосферы угарным газом и взвешенными частицами создают, особенно в летний период, дополнительные затруднения для дыхания горожан, что приводит к повышению заболеваемости и смертности.

Из опыта предыдущих лет, особенно жарких летних месяцев 2002, 2007 и 2012 гг. в г. Москве и ряда аналогичных ситуаций в других городах России и мира, необходимо сделать выводы по снижению рисков в случае повторения подобных ситуаций. Следует провести детальный статистический анализ данных о заболеваемости и причинах смерти различных групп населения (по возрастам, по заболеваемостям, по роду деятельности и др.) в крупных городах при экстремальных погодных условиях и аномальном содержании кислорода.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН П-5 «Фундаментальные науки – медицине».

### Литература

- Атмосфера: Справочник (справочные данные, модели). Л.: Гидрометеиздат, 1991. 509 с.
- Бизин М.А., Попова С.А., Чанкина О.В., Макаров В.И., Шинкоренко М.С., Смоляков Б.И., Куценкогий К.П. Влияние лесных пожаров на массовую концентрацию, дисперсный и химический состав атмосферного аэрозоля в региональном масштабе // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 6. С. 484–489.
- Гипоксия. Адаптация, патогенез, клиника / Под ред. Ю.Л. Шевченко. СПб.: Элби-СПБ, 2000. 384 с.
- Главное управление записи актов гражданского состояния Московской области. <http://www.zags.mosreg.ru/statistics/>
- Департамент записи актов гражданского состояния Томской области. <http://www.zags.tomsk.gov.ru/>
- Замолодчиков Д.Г. Кислород – основа жизни // Вестн. РАН. 2006. Т. 76, № 3. С. 209–218.
- Мосэкомониторинг. Сайт в Интернете: <http://www.mosecom.ru/air/>
- Никберг И.И., Ревуцкий Е.Л., Сакали Л.И. Гелиометеотропные реакции человека. Киев: Здоровье, 1986. 144 с.
- 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.
- Оксид углерода // Российская энциклопедия по охране труда. 2-е изд. / Отв. ред. А.Л. Сафонов. М.: НЦ ЭНАС, 2007. Т. 2.
- Отравление монооксидом углерода (угарным газом) / Под ред. Ю.В. Зобнина. СПб.: Тактик-Студио, 2011. 86 с.
- Погода в мире. Сайт в Интернете: <http://www.rp5.ru>
- Ревич Б.А. Горячее лето 2010 г. и смертность населения Европейской части России // Всероссийское совещание «Состояние воздушного бассейна города Москвы в экстремальных погодных условиях лета 2010 года»: Тез. докл. М., 2010. С. 91–92.
- Ситнов С.А. Оптическая толща аэрозоля и общее содержание оксида углерода над Европейской территорией России в период массовых пожаров лета 2010 г.: взаимосвязь изменчивости загрязнений и метеорологических величин // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47, № 6. С. 774–789.
- Тиунов Л.А., Кустов В.В. Токсикология окиси углерода. М.: Медицина, 1980. 288 с.
- Управление записи актов гражданского состояния города Москвы. <http://www.zags.mos.ru/information/>
- Управление по делам ЗАГС Новосибирской области. <http://www.zags.nso.ru>

- Яушева Е.П., Козлов В.С., Панченко М.В., Терпугова С.А., Чернов Д.Г., Шмаргунов В.П. Влияние обширных лесных пожаров летом 2012 г. на оптические и микрофизические характеристики приземного аэрозоля // Сб. докл. XIX Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Алтай (г. Барнаул – Телецкое озеро), 1–6 июля 2013 г. Барнаул, 2013. С. С115–С119.
- Fang Y., Naik V., Horowitz L.W., Mauzerall D.L. Air pollution and associated human mortality: the role of air pollutant emissions, climate change and methane concentration increases from the preindustrial period to present // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 1377–1394.
- Ginzburg A., Vinogradova A., Fedorova E. Urban residents breathing problems during heat waves and suburb fires episodes // The 2nd Intern. conf. «Pollution and environment – Treatment of air (PETrA 2013)». CD-room.
- Steinbach J. Enhancing the usability of atmospheric oxygen measurements through emission source characterization and airborne measurements: Dissertation Dr. Rer. Nat. 2010. 145 p.

### Сведения об авторах

- ГИНЗБУРГ Александр Самуилович** – доктор физико-математических наук, заместитель директора, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3. Тел.: +7 (495) 951-07-10. E-mail: gin@ifaran.ru
- ВИНОГРАДОВА Анна Александровна** – доктор географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3. Тел.: +7 (495) 959-50-76. E-mail: anvinograd@yandex.ru
- ФЁДОРОВА Евгения Ивановна** – младший научный сотрудник, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3. Тел.: +7 (495) 951-55-65.
- НИКИТИЧ Евгений Васильевич** – заместитель директора, Природоохранное бюджетное учреждение «Мосэкомониторинг». 119019, г. Москва, ул. Новый Арбат, д. 11, стр. 1. Тел.: +7 (495) 952-32-24.
- КАРПОВ Алексей Владимирович** – научный сотрудник, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3. Тел.: +7 (495) 951-55-65.

## OXYGEN IN THE ATMOSPHERE OF LARGE CITIES AND PEOPLE BREATH PROBLEMS

A.S. Ginzburg<sup>1</sup>, A.A. Vinogradova<sup>1</sup>, E.I. Fedorova<sup>1</sup>, E.V. Nikitich<sup>2</sup>, A.V. Karpov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> State Environmental Institution «Mosecomonitoring», Moscow, Russia

**Abstract.** Oxygen in atmospheric air in cities, as well as in living rooms, offices, and working areas is the factor of great importance for people health. Oxygen concentration is minimal under high air temperature and high absolute humidity (as it was in summer 2010 in the central part of European Russia). People can feel hypoxia under such conditions. There are some additional factors embarrassing human breathing in large cities: higher temperature (so called «heat island»), air pollution by aerosol particles, carbon monoxide, other anthropogenic gases and pitches. These result in increased inhabitant morbidity and mortality under abnormal hot weather and natural fires in suburbs. Summer episodes for Moscow in 2010, as well as for Tomsk and Novosibirsk in 2012 have been analyzed.

**Keywords:** atmosphere, oxygen, abnormal hot weather, fires, human health in large cities, people mortality.