

УДК 528.813:551.510.534

**А. В. Шаврина<sup>1</sup>, И. А. Микульская<sup>2</sup>, С. И. Кифоренко<sup>2</sup>,  
В. А. Шеминова<sup>1</sup>, А. А. Велесь<sup>1</sup>, О. Б. Блюм<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

<sup>2</sup> Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій і систем Національної академії наук та Міністерства освіти і науки України, Київ

<sup>3</sup> Національний ботанічний сад ім. М. М. Гришка Національної академії наук України, Київ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОЗОНА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ КИЕВА И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ

*Моделювання приземного озону в Києві для епізоду його підвищеного вмісту у серпні 2000 р. було виконано за допомогою моделі міського забруднення повітря UAM-V. Дослідження загального вмісту озону над Києвом та змін його концентрації з висотою в тропосфері виконано на основі наземних спостережень з інфрачервоним фур'є-спектрометром у Головній астрономічній обсерваторії Національної академії наук України у рамках проекту ESA-NIVR-KNMI N 2907. У 2008 р. з'явилися дані супутника «Aura-ОМІ» за профілями озону в атмосфері ОМОЗРР, що включають вміст озону в нижньому шарі атмосфери, починаючи з 2005 р, які можна використовувати при оцінці концентрації приземного озону у всіх великих містах України. Статистичне дослідження даних із забруднення повітря озоном у м. Києві та даних медичної статистики по захворюваннях системи зовнішнього дихання населення міста було проведено за допомогою пакета прикладних програм «Statistica». Проведено регресійний аналіз, побудовано прогностичні моделі регресії, виконано ретроспективне прогнозування епідеміологічної ситуації щодо патологій системи зовнішнього дихання у м. Києві в 2000–2007 рр.*

### ВВЕДЕНИЕ

Моделирование концентраций приземного озона в Киеве для эпизода его повышенного содержания в августе 2000 г. [1, 10, 11] было выполнено с помощью модели городского загрязнения воздуха UAM-V [12]. Также было проведено исследование общего содержания озона над Киевом и изменений его концентраций с высотой в тропосфере на основании наземных наблюдений с инфракрасным фурье-спектрометром в Главной астрономической обсерватории Национальной академии наук Украины (ГАО) в рамках проекта ESA-NIVR-KNMI no 2907 «OMI validation by ground based remote sensing: ozone columns and atmospheric profiles» (2005–2008 гг.) [3, 4, 9].

Приземный озон — вторичное высокотоксичное для человека и всего живого вещество. Он образуется в результате фотохимических реакций из веществ-предшественников, выделяемых

главным образом с выхлопными газами автотранспорта и выбросами больших технических предприятий, и по сути является индикатором техногенной загрязненности исследуемых территорий [2, 10, 14, 15].

Озон открыт в 1840 г. Шенбейном, и почти сразу начались измерения его концентраций на горе Пик-дю-Миди во Франции. Длинный ряд высокогорных наблюдений с 1870 г. до наших дней показал увеличение фоновых концентраций озона в воздухе с 10 ppb (миллиардных частей по объему) более чем в пять раз. А эта величина находится на уровне рекомендуемой Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) предельно допустимой 8 ч концентрации приземного озона 50 ppb [15].

В мониторинговой сети Европы сегодня официально зарегистрирована 2171 станция мониторинга озона [7]. Станции — разного типа: городские, сельские и фоновые, из них в странах ЕС — 2111 (во Франции — 439, в Испании — 367, в Германии — 286, в Италии — 235), в Чехии — 71,

Польше — 68, Румынии — 27, Латвии — 6, Литве — 15, Эстонии — 7). В то же время в Украине мы не имеем ни одной официально зарегистрированной в упомянутой Европейской сети станции по мониторингу озона, а наши метрологические службы не имеют поверочных приборов для измерения приземного озона при помощи газоанализаторов. Тем не менее, загрязненность озоном территории Украины (Киев, Карпаты) и ее воздействие на растения изучалась О.Блюмом и сотрудниками, начиная с 1996 г. [5, 6].

Интенсивное изучение химии приземного озона и его опасного действия на здоровье людей и урожаи началось после 40 % потери урожая в Европе в 1940 г. Он образуется реакцией  $O + O_2 + M \equiv O_3 + M$ , где  $M$  — молекула-катализатор, например  $N_2$ . Атом кислорода в городской атмосфере образуется из окислов азота  $NO_x$  ( $NO_2 + NO$ ) в фотохимической реакции под действием солнечного излучения с длиной волны  $\lambda < 424$  нм, (излучение с длиной волны  $\lambda < 290$  нм задерживается стратосферным слоем озона на высоте 20—35 км над землей):  $NO_2 + h\nu \equiv NO + O$ . Но  $NO$  снова окисляется озоном до  $NO_2$ , поэтому накопления озона в этом цикле не происходит. Должна быть другая причина окисления  $NO$  в  $NO_2$ , и она была найдена — пероксидные радикалы, которые образуются в атмосфере окислением кислородом летучих органических соединений как природного, так и антропогенного происхождения:  $NO + RO_2 \cdot \equiv NO_2 + RO \cdot$ , где  $R$  — любой органический фрагмент, например  $C_2H_5$ .

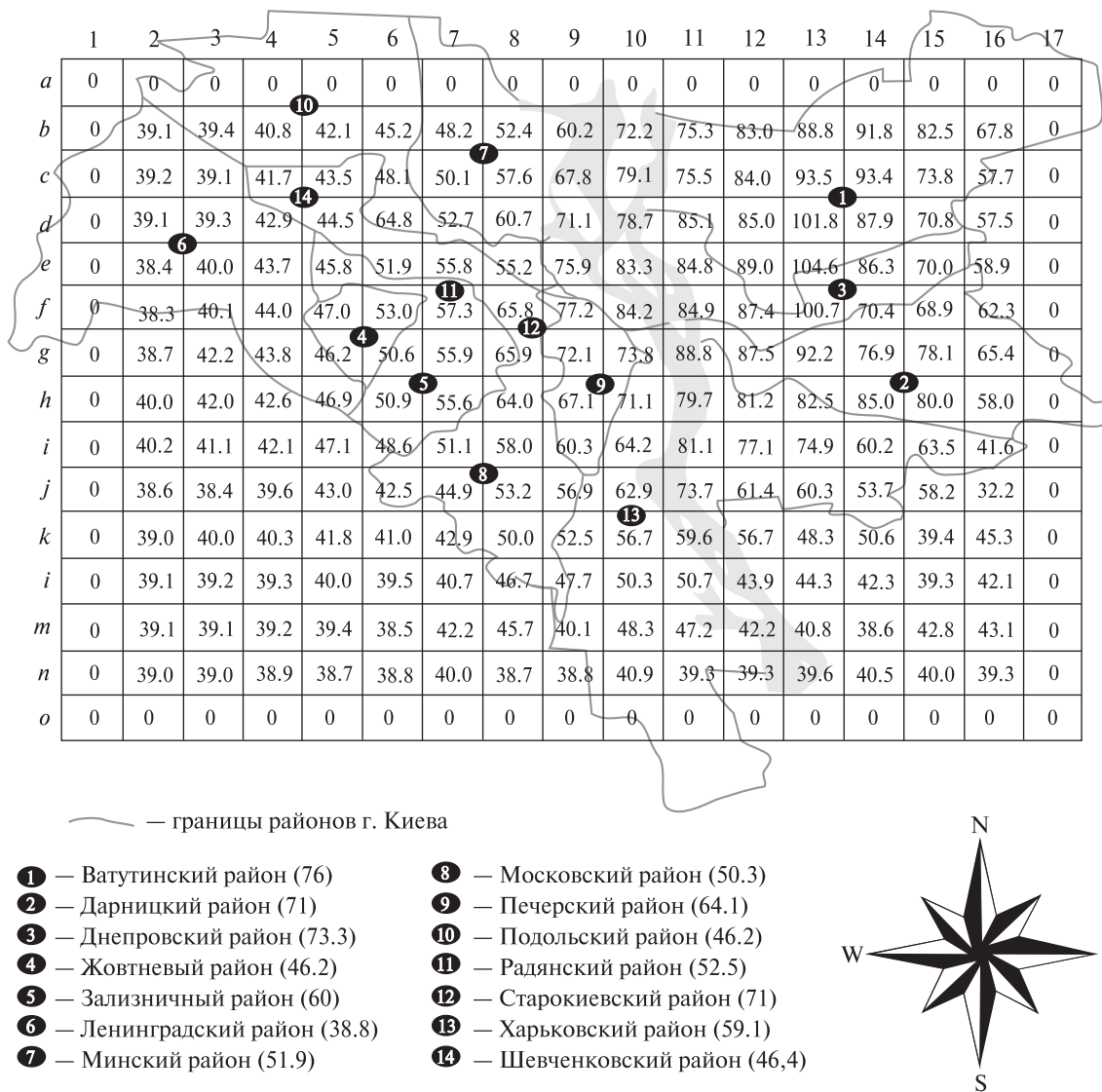
Как химическое и токсическое вещество озон хорошо изучен [14, 15]. Что же касается его действия на здоровье жителей современных городов, то, в отличие от США и стран Европы [8, 13—16], в Украине этот вопрос только начинает изучаться. В то же время именно здесь эта проблема требует самого внимательного изучения: во-первых, из-за сложностей экономической и медико-экологической обстановки, сложившейся в последние годы; во-вторых, по причине интенсивного превращения городов в современные мегаполисы с огромным парком автотранспорта. Явление это со многих точек зрения новое, еще не изученное, в том числе и в медико-экологическом аспекте.

Основная цель данной работы — провести ретроспективное исследование влияния приземного озона на здоровье жителей г. Киева, начиная с 2000 г. (к сожалению, мы пока не располагаем данными медицинской статистики для 2008—2010 гг.).

Известно, что озон — загрязнитель воздуха первого класса опасности по действию на здоровье людей и животных, растения и строительные сооружения. Основной мишенью действия озона на здоровье человека являются его система внешнего дыхания (СВД) и сердечно-сосудистая система [2, 8, 16]. Задача данной работы состоит в исследовании и апробации прогнозирования связи концентраций озона в Киеве и показателей состояния системы дыхания населения города. Предполагается в дальнейшем использовать результаты этого исследования для оценки рисков вредного воздействия озона на здоровье жителей Киева и других городов Украины, как на популяционном, так и на индивидуальном (личностном) уровне. Отметим очень высокие концентрации приземного озона в летние эпизоды в Одессе (до 200 ppb), даваемые моделированием программой EURAD в Рейнском институте проблем экологии при Кельнском университете (<http://www.eurad.uni-koeln.de/>).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выполнения запланированной работы мы обратились к статистическим данным городского управления охраны здоровья (ГУОЗ) и Министерства здравоохранения (МЗ) относительно состояния СВД населения 14 районов г. Киева по 12 показателям, определяющим общую и первичную заболеваемость населения города озонозависимыми патологиями системы за период 2000—2007 гг. Полученные данные касались пяти социально-возрастных групп жителей г. Киева — детей, подростков, взрослых, трудоспособных и пенсионеров. Данные усредненной максимальной загрязненности озоном 14 районов г. Киева, а также по Киеву в целом, для «озонового эпизода» в августе 2000 г. рассчитывались по результатам моделирования концентрации озона с учетом процессов озонобразования и



\* в скобках приводятся средние порайонные концентрации приземного озона

Рис. 1. Усредненные максимальные концентрации приземного озона по районам г. Киева, рассчитанные по результатам моделирования озонового эпизода в августе 2000 г.

рассеяния вещества в приземном слое атмосферы над городом [10, 11], рис. 1. При моделировании была использована модель UAM-V [12], учитывающая рельеф города, метеорологические условия, интенсивность солнечного излучения, количество объемных и точечных выбросов в атмосферу промышленными предприятиями, количество в городе автотранспорта, скорость транспортных потоков.

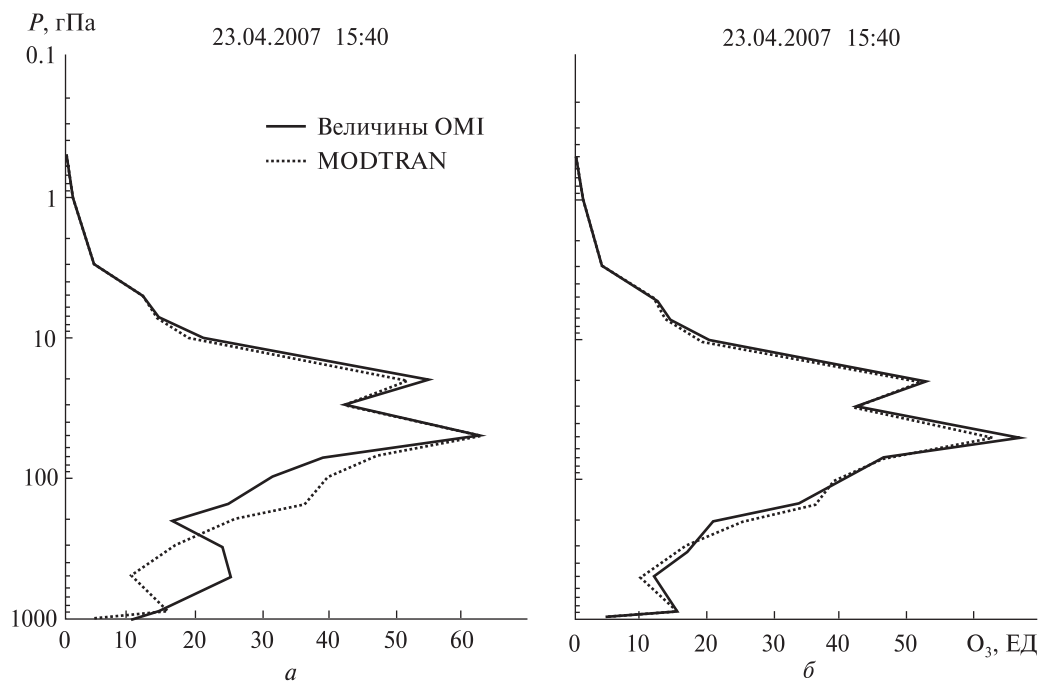
В 2008 г. появились спутниковые данные Aura-OMI по профилям концентрации озона в атмосфере OMO3PR ([http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/OMI/omo3pr\\_v003.shtml](http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/OMI/omo3pr_v003.shtml)), включающие содержание озона в нижнем слое атмосферы, начиная с 2005 г. Мы выполнили сравнение этих профилей озона для Киева и полученных нами из наблюдений с инфракрасным фурье-спектрометром и модели-

рования программой MODTRAN4 [3, 4]. Первое сравнение нашего профиля для 23 апреля 2007 г. показало существенное различие с профилем Aura-OMI в тропосферной части профиля (рис. 2, а). Однако данные OMI версии 2009 г. хорошо согласуются с нашим профилем для этой же даты (рис. 2, б). Это дает основание для использования данных OMI при оценке концентраций приземного озона во всех крупных городах Украины.

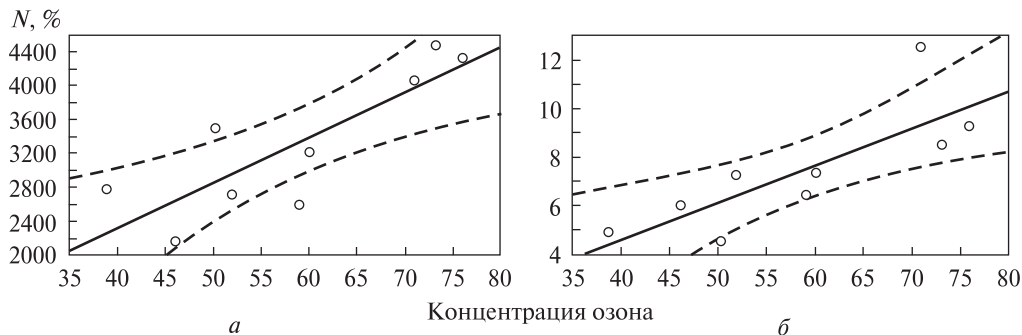
Статистическое исследование имеющихся данных было проведено при помощи пакета прикладных программ «Statistica» (например [http://softnic.ru/soft/programm\\_4456.html](http://softnic.ru/soft/programm_4456.html)). Оно включало корреляционное сопоставление данных порайонной озоновой загрязненности и усредненных показателей состояния СВД в районах города. При этом определялись коэффициенты корреляции между значениями сопоставляемых факторов, проводился регрессионный анализ, строились прогностические модели регрессии.

#### ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА НА СОСТОЯНИЕ СВД ЖИТЕЛЕЙ г. КИЕВА (2000 г.)

Первое в Украине эпидемиологическое исследование проблемы озона было проведено нами по данным моделирования концентраций озона в 2000 г. [2]. В то время административное устройство г. Киева включало 14 районов, каждый из которых обслуживался сетью районных поликлиник, поставляющих статистические данные в киевский центр «Мединстат». Это дало возможность провести полноценное статистическое сопоставление усредненных порайонных показателей состояния СВД населения города и усредненных максимальных порайонных концентраций озона, рассчитанных по результатам моделирования программой UAM-V[12] (рис. 2). Проведенное корреляционное исследование показало, что для социально-возрастной группы «взрослые», составляющей более 70 % населения города, статистически существенные связи про-



**Рис. 2.** Сравнение нашего восстановленного атмосферного профиля озона с данными OMI (ОМОЗР): а — данными OMI версии 2008 г., б — данными OMI версии 2009 г. Концентрации озона выражены в суммарных количествах (ЕД) для каждого из 18 слоев атмосферы, определенных в данных ОМЗР



**Рис. 3.** Распространенность  $N$  заболеваемости взрослого населения (на 100 000 человек) болезнями органов дыхания (*а*) и детей (на 1000 детей) астматическим бронхитом (*б*) со средними максимальными концентрациями озона для «спальных» районов г. Киева. Штриховые линии — уровень достоверности 95 %

явились по показателям «болезни органов дыхания» и «пневмония». По социально-возрастной группе «дети» статистически достоверная связь обнаружилась по показателю «астматический бронхит» ( $r = 0.66$ ). Связь между заболеваниями астмой у детей и пиковыми концентрациями озона исследовалась, например, в работе [13].

При выделении из исследованных районов города девяти окраинных, «спальных» районов с примерно одинаковой плотностью населения (5 тыс. жителей на 1 км<sup>2</sup>) оказалось, что в этом случае отмечаются более высокие корреляционные связи между сопоставляемыми факторами. У взрослых они достигали значений  $r = 0.83$ , у детей  $r = 0.80$  (рис. 3). Далее с учетом обнаруженных корреляционных связей был проведен регрессионный анализ исследуемых данных, и были построены уравнения линейной регрессии, которые позволили прогнозировать состояние СВД жителей г. Киева по показателям «болезни органов дыхания» у взрослых и «астматический бронхит» у детей — в зависимости от летних пиковых концентраций приземного озона в районах их проживания.

Прогнозирование эпидемиологической ситуации относительно патологий СВД в г. Киеве в 2002—2006 гг. было осуществлено с привлечением данных измерений приземного озона, проводимых в Национальном ботаническом саду им. Н. Н. Гришко НАН Украины, спутниковых данных (Augs-OMI), а также результатов моделирования концентраций приземного озона для

Европы (включающим территорию Украины), проведенного Рейнским институтом проблем экологии при Кельнском университете. Предполагалось, что полученные данные характеризуют средние по городу максимальные концентрации озона в 2000—2006 гг. На их основе для Киева была спрогнозирована общая заболеваемость болезнями органов дыхания (взрослые) и астматическим бронхитом (дети).

Сравнение результатов прогнозирования и данных медицинской статистики за 2000—2006 гг. по г. Киеву (таблица) показало, что прогнозы, построенные по результатам моделирования в основном подтвердились. Так, коэффициент корреляции по «болезням органов дыхания» (взрослые) составил 0.76 для концентраций озона по данным моделирования и 0.72 для данных, полученных при помощи УФ-анализатора озона (ТЕСО-49С). По спутниковым данным Auga-OMI (2005, 2006 гг.) для этих же показателей были получены достаточно близкие к фактическим значениям оценки заболеваемости патологиями СВД. Отметим также, что если в центральной и южной Европе пик концентрации приземного озона пришелся на 2003 г., за которым последовало некоторое уменьшение, то для Восточной Европы этого не произошло, по-видимому из-за увеличения количества автомобильного транспорта со старыми системами сжигания топлива, которые запрещены в странах ЕС.

Следует отметить, что Всемирная организация здравоохранения ВОЗ [15] выделяет как осо-

бо опасные для здоровья людей четыре загрязняющих воздух вещества: твердые частицы, озон, двуокись азота и двуокись серы. Если озон непосредственно повышает риск заболеваний системы дыхания, то остальные три загрязнителя усугубляют действие озона. Являясь продуктами выбросов автотранспорта и промышленных предприятий, они также участвуют и в процессах формирования озона в качестве его предшественников. В работе [8] сообщается о значительном усилении эффектов  $O_3$  на функциональные изменения в здоровье людей в сочетании с другими неблагоприятными факторами окружающей среды. В рекомендациях ВОЗ 2005 г. [15] понижена рекомендуемая максимальная средняя 8-ч концентрация поверхностного озона с 120 до 100  $\mu\text{кг}/\text{м}^3$ , что было обусловлено пополнением знаний о влиянии озона на здоровье за счет эпидемиологических исследований.

Мы рассчитали среднюю квадратичную ошибку  $\epsilon$  одного прогноза для каждой строки таблицы.

Для заболеваний «болезни органов дыхания» у взрослых она составила 15 % по данным моделирования уровней концентраций приземного озона и 16.5 % по данным инструментального измерения озона. По правилу  $2\epsilon$  (вероятность 95 %) мы можем считать достоверными все значения прогнозируемых величин. Коэффициент корреляции данных медицинской статистики и прогноза по данным озонметра составил 0.78. Для заболеваний детей астматическим бронхитом средние квадратичные ошибки одного прогноза составили 12.46 % по данным моделирования и 14.98 % по данным озонметра.

Таким образом, мы также можем считать достоверными все значения прогноза с указанной погрешностью. Коэффициент корреляции данных медицинской статистики по астматическому бронхиту у детей и прогноза по данным озонметра составил 0.76. Заметим, что среднее значение концентрации приземного озона для г. Киева по данным моделирования (UAM-V)

**Прогнозирование заболеваемости системы дыхания населения г. Киева в 2000—2007 гг. (в скобках — ошибка прогнозирования)**

Источник данных	2000 г.	2001 г.	2002 г.	2003 г.	2004 г.	2005 г.	2006 г.	2007 г.
Рейнская модель	—	—	75.0	75.0	55.0	78.5	71.5	90.5
УФ-озонметр	56.9	74.4	75.5	71.1	67.9	84.2	77.0	91.5
Ауга-ОМІ	—	—	—	—	—	63.0	61.9	74.0
<i>Взрослые (болезни СВД)</i>								
Фактически (случаев на 100 000 чел.)	2996	3093	3236	3534	3391	3561	3600	3836
Прогноз по Рейнской модели	—	—	3886 (20 %)	3884 (10 %)	2902 (14 %)	4058 (14 %)	3714 (3 %)	4649 (21 %)
Прогноз по озонметру	2996	3857 (25 %)	3911 (21 %)	3694 (4.5 %)	3537 (4.3 %)	4339 (22 %)	3985 (11 %)	4699 (22 %)
Прогноз по Ауга-ОМІ	—	—	—	—	—	3295 (7 %)	3241 (10 %)	3837 (0.003 %)
<i>Дети (астматический бронхит)</i>								
Фактически (случаев на 1000 чел.)	7.37	8.39	8.75	9.2	7.12	9.2	8.75	—
Прогноз по Рейнской модели	—	—	9.7 (11 %)	9.7 (5.4 %)	9.3 (24 %)	10.1 (11 %)	9.0 (3 %)	—
Прогноз по озонметру	7.69 (4 %)	9.9 (18 %)	11 (26 %)	9.2 (0.0 %)	8.8 (6 %)	10.9 (18 %)	9.95 (14 %)	—
Прогноз по Ауга-ОМІ	—	—	—	—	—	8.8 (8 %)	8.3 (5 %)	—

озонового эпизода в 2000 г. практически совпало со значением, полученным на основе УФ-анализатора озона в Национальном ботаническом саду. Поэтому использование инструментальных показаний концентраций приземного озона является оправданным для прогнозирования заболеваемости СВД как среднего значения для города.

Из таблицы видно, что почти все данные прогноза заболеваемости по рейнской модели и наземному озонметру выше данных медицинской статистики. Причин может быть несколько, и среди них — снижение числа обращений в районные поликлиники (одна часть населения предпочитает лечиться в частных клиниках, другая, малообеспеченная, занимается самолечением). Появились более действенные медицинские препараты, в частности от аллергического астматического бронхита.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема прогнозирования индивидуальных рисков действия приземного озона на здоровье человека стоит в Украине особенно остро, так как действенные реакции государственных структур на проблемы экологии, как правило, значительно отстают от потребностей населения.

Полученные нами результаты позволяют сделать вывод о том, что создание мониторинговой сети измерения приземного озона в крупнейших городах Украины, расширение базы данных относительно загрязнённости приземным озоном атмосферы городов Украины, а также базы статистических данных по состоянию здоровья и специфике заболеваемости населения этих городов — необходимое условие изучения вредного воздействия приземного озона на здоровье людей. В результате проведенной работы стало очевидным, что моделирование приземного озона в городской среде следует повторять хотя бы через каждые 3–4 года для поиска корреляций между концентрациями озона и заболеваемости населения по районам, учитывая темпы развития города, а также изменения количественных характеристик заболеваемости населения озонозависимыми патологиями СВД. Такие исследования в сочетании с данными спутников

и моделированием открывают возможности для прогнозирования рисков вредного воздействия озона на здоровье населения крупных городов Украины.

1. Блюм О. Б., Будак І. В., Дячук В. А., Сосонкін М. Г., Шаврина А. В. Приземний озон у Києві, умови його утворення і стоку // Наук. праці УкрНДГМІ. — 2002. — Вип. 250. — С. 61–77.
2. Микульська І. О., Шаврина А. В., Кіфоренко С. І. Забрудненість міста Києва приземним озоном як медико-екологічна проблема // Біомедичні інформаційні технології в охороні здоров'я. — Київ, 2008. — С. 41–44.
3. Шаврина А. В., Павленко Я. В., Велесь А. А. и др. Общее содержание озона в тропосфере и тропосферные профили озона над Киевом в 2007 г. // Космічна наука і технологія. — 2008. — 14, № 5. — С. 85–94.
4. Шаврина А. В., Шеминова В. А., Павленко Я. В. и др. Содержание озона над Киевом в 2005–2008 гг. // Космічна наука і технологія. — 2010. — 16, № 4. — С. 3–12.
5. Blum O. Long-term monitoring of tropospheric ozone in Kyiv, Ukraine: formation, temporal patterns and potential adverse effects // Proc. NATO Advanced Research Workshop on Ecotoxicology, Ecological Risk Assessment and Multiple Stressors / Eds G. Arapis, et al. — NATO Earth and Environmental Ser., 2006. — 6. — P. 337–344.
6. Blum O., Bytnerowicz A., Manning W. and Popovicheva L. Ambient tropospheric ozone in the Ukrainian Carpathian mountains and Kiev region: detection with passive samplers and bioindicator plants // Environ. Poll. — 1997. — 98, N 3. — P. 299–304.
7. Air pollution by ozone across Europe during summer 2009 // Techn. Rept. — 2010. — N 2. (<http://www.eea.europa.eu/publications/air-pollution-by-ozone-across-europe-during-summer-009>).
8. Lippmann M. Health effects of ozone. A critical review // J. Air Pollut. Contr. Assoc. — 1989. — 39, N 5. — P. 672–695.
9. Shavrina A. V., Pavlenko Ya. V., Veles A. A., et al. Ozone columns obtained by ground-based remote sensing in Kiev for Aura Ozone Measuring Instrument validation // J. Geophys. Res. — 2007. — 112. — D24S45.
10. Shavrina A. V., Sosonkin M. G., Veles A. A., et al. Integrated modelling of surface and tropospheric ozone for Kiev city // Simulation and Assessment of Chemical Processes in a Multiphase Environment / Eds I. Barnes, M. M. Kharytonov. — NATO Science for Peace and Security, Ser. C: Environmental Security. — 2008. — 25. — P. 345–357.

11. *Shavrina A. V., Veles A. A., Nochvaj V., et al.* Modelling of Ozone Episode in Kiev Metropolitan Area // NewsLetters of the FP7 EC MEGAPOLI Project. — 2008. — N 8. — P. 31.
12. *Systems Applications International, 1995: Users Guide to the Variable Grid Urban Airshed Model (UAM-V).* — San Rafael, CA, 1995. — 131 p.
13. *White M. C., Etzel R. A., Wilcox W. D., Lloyd C.* Exacerbations of childhood asthma and ozone pollution in Atlanta // *Environ. Res.* — 1994. — **65**. — P. 56—58
14. *WHO Air quality guidelines for Europe.* — 2nd ed. — Copenhagen, World Health Organization Regional Office for Europe, 2000. — (WHO Regional Publications, European Ser. N 91).
15. *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Summary of risk assessment. Global update 2005.* — World Health Organization.
16. *Yang Q., Chen Y., Shi Y., et al.* Association between ozone and respiratory admissions among children and the elderly in Vancouver // *Canada. Inhal Toxicol.* — 2003. — **15**. — P. 1297—1308.

Ндійшла до редакції 17.12.10

*A. V. Shavrina, I. A. Mikulskaaya, S. I. Kiforenko, V. A. Sheminova, A. A. Veles, O. B. Blum*

#### THE STUDY OF GROUND-LEVEL OZONE OVER KYIV AND ITS IMPACT ON PUBLIC HEALTH

Ground-level ozone in Kyiv for the episode of its high concentration in August 2000 is simulated with the model of urban air pollution UAM-V. The study of total ozone over Kyiv and of its concentration changes with height in the troposphere is made on the basis of ground-based observations with the infrared Fourier-spectrometer at the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine as a part of the ESA-NIVR-KNMI project no 2907. In 2008, the satellite Aura-OMI data OMO3PR on profiles of the atmosphere ozone became available. The data include the ozone content in the lower layer of the atmosphere, beginning in 2005. They can be used for the evaluation of the ground-level ozone concentrations in all cities of Ukraine. Some statistical investigation of ozone air pollution in Kyiv and medical statistics data on respiratory system diseases is carried out with the application of the «Statistica» package. The regression analysis, prognostic regression simulation, and retrospective prognosis of the epidemiological situation with respect to respiratory system pathologies in Kyiv during 2000—2007 are performed.