УДК 550.348.098.45:528.85

С. А. Станкевич, О. В. Титаренко, Н. Н. Харитонов, В. Н. Хлопова

Картирование загрязненности атмосферы Приднепровского промышленного района диоксидами азота и серы с использованием спутниковых данных

(Представлено академиком НАН Украины В. И. Лялько)

Проведен анализ пространственного распределения и распространения динамики загрязнения атмосферы Приднепровского промышленного района соединениями диоксида азота и серы путем сопоставления данных стационарных наземных измерений и спутниковых наблюдений атмосферы в 2009–2011 гг. Установлено, что концентрация диоксида азота в воздухе Днепропетровска и Днепродзержинска превышает в два раза предельно допустимую, а наибольшая площадь распространения диоксида серы наблюдается над индустриальной агломерацией городов Кривой Рог, Вольногорск и Днепродзержинск.

Степень загрязнения атмосферы от антропогенных источников зависит от определенного сочетания метеорологических факторов. При постоянных параметрах выбросов уровень загрязнения атмосферы характеризуется направлением, видом переноса и рассеивания примесей в воздухе, интенсивностью солнечной радиации, которая приводит к фотохимическим превращениям токсических веществ, возникновению вторичных продуктов загрязнения, росту количества и продолжительности выпадения осадков, способствующих "вымыванию" примесей из атмосферы. Рассеивающая способность атмосферы зависит от вертикального распределения температуры и скорости ветра, условий интенсивного турбулентного обмена воздушных слоев [1]. В итоге, в одном случае одни вещества будут разноситься на большие расстояния от источника загрязнения, а в другом — концентрироваться в районе их выброса.

В последнее десятилетие, вследствие возобновления темпов промышленного развития и урбанизации, загрязнение воздушной среды становится главной экологической проблемой в промышленных городах юго-востока Украины [2]. Постоянное превышение уровня предельно допустимых концентраций (ПДК) техногенной пыли, диоксида азота, формальдегида, фенола и аммиака и некоторых других поллютантов в атмосфере городских агломераций приводит к образованию кислотных дождей, фотохимического смога, а также способствует росту числа заболевания среди местного населения, в особенности детей [3]. Опасность кислотных дождей состоит в том, что они могут выпадать на расстоянии многих сотен и тысяч километров от источника первичного выброса веществ. Сернистый ангидрид поступает в атмосферу при сжигании органического топлива, а диоксид азота образуется в результате окисления азота воздуха при высоких температурах, а также при разложении и окислении азотных соединений, присутствующих в топливе. В атмосферу диоксид азота поступает как в виде теплых выбросов крупных промышленных предприятий и электростанций, так и в виде "низких" холодных выбросов транспорта [4].

Целью наших исследований было проведение анализа пространственного распределения и распространения динамики загрязнения атмосферы Приднепровского промышленного района соединениями диоксида азота и серы путем сопоставления данных стационарных наземных измерений и спутниковых наблюдений атмосферы в 2009–2011 гг.

© С. А. Станкевич, О. В. Титаренко, Н. Н. Харитонов, В. Н. Хлопова, 2013

Спутниковые системы дистанционного зондирования атмосферы. Базовым принципом дистанционного зондирования атмосферы является измерение спектральной интенсивности электромагнитного излучения в определенных спектральных диапазонах с целью исследования физических параметров среды. Это возможно вследствие наличия спектральных полос поглощения и собственного инфракрасного или микроволнового излучения в соответствии с законом Кирхгофа. Следовательно, спектральная интенсивность проходящего через атмосферу излучения является функцией ее газового состава и температуры [5].

Для измерения параметров атмосферы Земли используются специализированные сенсоры оптического или микроволнового диапазонов, устанавливаемые на спутниковые системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Из функционирующих в настоящее время спутниковых систем дистанционного зондирования атмосферы наиболее известны европейские Envisat (спектрометры GOMOS, MIPAS, SCIAMACHY), MetOp (спектрометры IASI, GOME-2, HIRS/4) и американские EOS (инфракрасные спектрометры MOPITT, AIRS, OMI, TES, микроволновые радиометры HIRDLS, MLS) и NPOESS (спектрометр ультрафиолетового/видимого диапазона OMPS) [6].

Основные технические характеристики бортовой аппаратуры для измерения параметров атмосферы Земли функционирующих спутниковых систем приведены в табл. 1.

Условия исследований и методы наземных наблюдений. Основные крупные индустриальные центры природно-экономического региона Приднепровья представлены городами Днепропетровской, Кировоградской и Запорожской областей. Добыча и переработка железной, урановой и полиметаллических руд связаны с городскими агломерациями: территории Днепропетровска, Днепродзержинска, Кривого Рога, Желтых Вод и Вольногорска. Все они расположены в центральной и западной частях Днепропетровской области. Анализ розы ветров показывает, что за период 2009–2011 гг. на территориях Днепропетровска и Кривого Рога преобладали северо-восточные направления ветра, а территории Днепродзержинска — южные. Ландшафт Днепропетровской области представляет собой волнистую равнину высотой 100–200 м. Реки Ингулец, Саксагань, Желтая и Базавлук протекают в западной части области, расположенной в Приднепровской возвышенности. Северо-западная часть области постепенно понижается в юго-восточном направлении и обрывается к Днепру крутым уступом.

Обработка данных. Оценка загрязнения атмосферы Приднепровского промышленного района диоксидами азота и серы проводилась по результатам измерений спутникового спектрометра EOS/OMI с заверкой по наземным данным. В качестве исходных данных использовались информационные продукты уровня 3 Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) NASA за 2009–2011 гг.: содержания тропосферного NO_2 в молекулах на квадратный сантиметр (http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/OMI/omno2e_v003.shtml), а также приземного SO_2 в единицах Добсона (http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/OMI/omso2e_v003.shtml), доступные через поисковую подсистему Mirador (http://mirador.gsfc.nasa.gov/). Вырезка территориальных сегментов, выбор требуемых слоев данных и ежемесячное осреднение значений производились при помощи web-сервиса Giovanni (http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/). В результате было получено 36 сегментов измерений на регулярной сетке (рис. 1) для каждого информационного продукта EOS/OMI.

Наземные измерения состояния приземного слоя воздуха проводились в трех лабораториях городов Днепропетровск, Днепродзержинск, Кривой Рог, находящихся в подчинении

ISSN 1025-6415 Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2013, № 3

Таблица 1

Спутниковая система	Аппаратура	Спектральный диапазон, мкм	Спектральное разрешение, мкм	Полоса обзора, км	Пространственное разрешение, км	Атмосферные продукты
Envisat	GOMOS	0,25–0,95	0,17–0,20	120	15–40	O_3, NO_2, NO_3, O_2, H_2O, аэрозоли
	MIPAS	4,15–14,6	1,6–2,0	150	$3 \cdot 30$	O_3, NO, NO_2, HNO_3, N_2O_5, $ClONO_2$, CH_4
	SCIAMACHY	0,24–2,40	$0{,}2 \cdot 10^{-3}$–$0{,}5 \cdot 10^{-3}$	960	$32 \cdot 215$	O_3, NO_2, BrO, SO_2, HCHO, H_2O, CH_4, CO, CO_2, аэрозоли
MetOp	IASI	3,62–15,5	$1{,}4 \cdot 10^{-3}$	1066	12–18	O_3, аэрозоли
	GOME-2	0,24–0,79	$0{,}135 \cdot 10^{-3}$	960	$80 \cdot 40$	O_3, NO_2, BrO, SO_2, HCHO
	HIRS/4	3,8–15,0	0,5–0,7	2160	10–16	CO_2, O_3, N_2O
EOS	MOPITT	2,2–4,7	0,22–0,55	650	22	CO, CH_4
	AIRS	3,74–15,4	$4{,}9 \cdot 10^{-3}$	1650	13,5–19,5	CO_2, CO, CH_4, O_3, SO_2, аэрозоли
	OMI	0,27–0,5	$0{,}45 \cdot 10^{-3}$–$1{,}0 \cdot 10^{-3}$	2600	$13 \cdot 24$	O_3, NO_2, SO_2, HCHO, BrO, OClO, аэрозоли
	TES	3,2–15,4	$2{,}9 \cdot 10^{-4}$–$8{,}5 \cdot 10^{-4}$	$5{,}3 \cdot 8{,}5$	$0{,}53 \cdot 5{,}3$	H_2O, O_3, CH_4, CO, HNO_3
	HIRDLS	6–18 мм	$4 \cdot 10^{-5}$–$8 \cdot 10^{-5}$	500	$10 \cdot 300$	O_3, HNO_3, NO_2, N_2O_5, $CHClF_2$, CCl_2F_2
	MLS	118–2250 ГГц	400–510 МГц	300	$1{,}5 \cdot 3$	H_2O, HNO_3, HCN, ClO, N_2O, O_3, SO_2, CH_3CN, CO, HCl, HOCl, BrO, CH_3CN
NPOESS	OMPS	0,25–0,38	10^{-3}	2800	50–250	O_3, BrO, HCHO, NO_2, OClO, SO_2

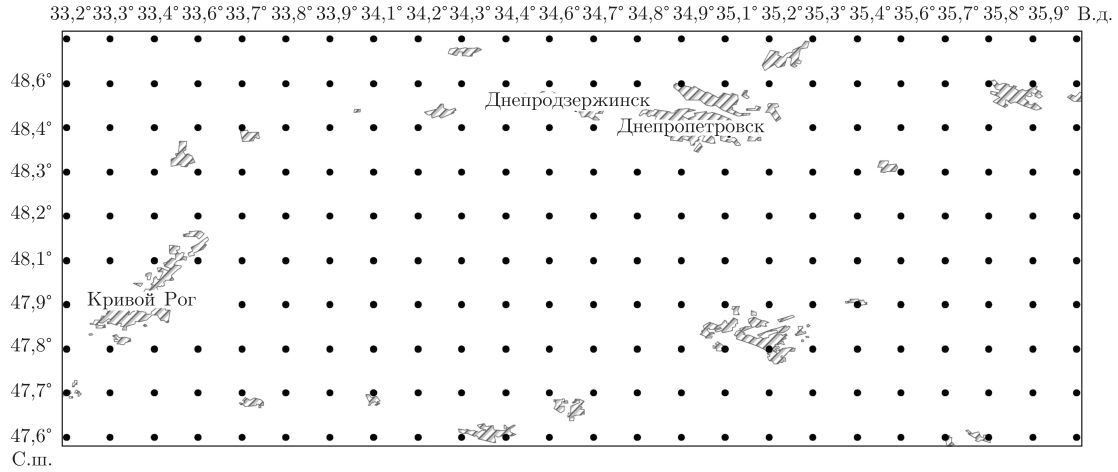

Рис. 1. Сетка спутниковых атмосферных измерений Приднепровского промышленного района

Днепропетровского областного центра по гидрометеорологии. Систематическая информация о содержании токсикантов собирается в Гидрометцентре благодаря организации сети стационарных постов: 6 — в Днепропетровске и по 5 — в Днепродзержинске и Кривом Роге. Уровень загрязнения воздуха устанавливался с помощью лабораторных, экспрессных и автоматических методов контроля. Полученные среднесуточные, среднемесячные и среднегодовые данные фонового мониторинга исследуемых веществ в атмосферном воздухе сравнивались с ПДК.

Для наземной заверки спутниковых данных использовались среднемесячные значения концентрации NO_2 и SO_2 за 2009–2011 гг. Значения спутниковых измерений на регулярной сетке интерполировались методом обратных квадратов в точки наземных измерений и по этим данным строилась линейная регрессия. Средняя оценка надежности регрессии по 36 измерениям в каждой точке при помощи статистики Фишера составила 0,62 [7]. Далее спутниковые измерения на регулярной сетке пересчитывались, согласно уравнениям регрессии, для района исследований.

Полученные 36 карт среднемесячных концентраций NO_2 и SO_2 позволили провести анализ временных рядов наблюдений. Картировались: среднемесячные за период наблюдений значения, определяемые в мг/м^3; среднегодовой прирост концентрации — в %; годовая периодическая составляющая концентрации — в ‰. Результирующие карты распределений указанных величин представлены на рис. 2 и 3.

Результаты исследований. Анализ карт распределения концентраций диоксида азота и серы в атмосфере Днепропетровского промышленного района свидетельствует о формировании определенных циркуляционных потоков аэрозолей. Очевидно, что их образование зависит от мощности источников загрязнения. Несомненно, что характер распространения факелов по территории области обусловлен фотохимическими свойствами токсикантов, особенностями мегарельефа местности, включая русла рек. Концентрация диоксида азота в воздухе городов Днепропетровск и Днепродзержинск превышала в два раза значение ПДК (см. *а* на рис. 1) [8]. Несколько меньшее содержание NO_2 в воздухе зафиксировано вблизи Кривого Рога, а также над городами Вольногорск и Запорожье. Сопоставление данных анализа временных рядов, согласно оценке среднегодового прироста концентраций NO_2 в атмосфере (см. *б* на рис. 2), также свидетельствует о повышенном риске накопления диоксида азота над указанными городскими агломерациями.

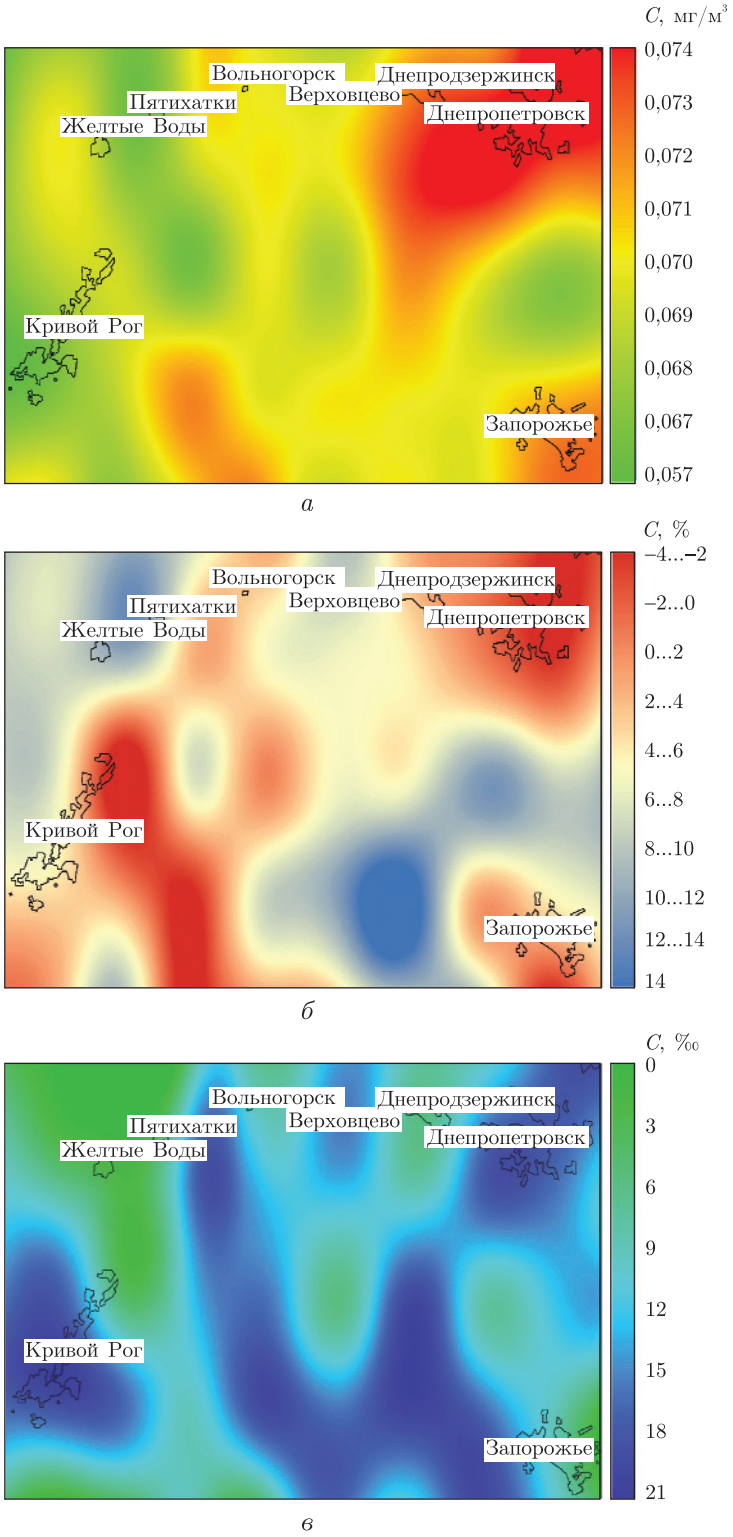

Рис. 2. Пространственное распределение характеристик динамики содержания NO_2 в атмосфере Приднепровского промышленного района в 2009–2011 гг.
Здесь и на рис. 3: а — среднемесячное значение концентрации, мг/м^3; *б* — среднегодовой прирост концентрации, %; *в* — годовая периодическая составляющая концентрации, ‰

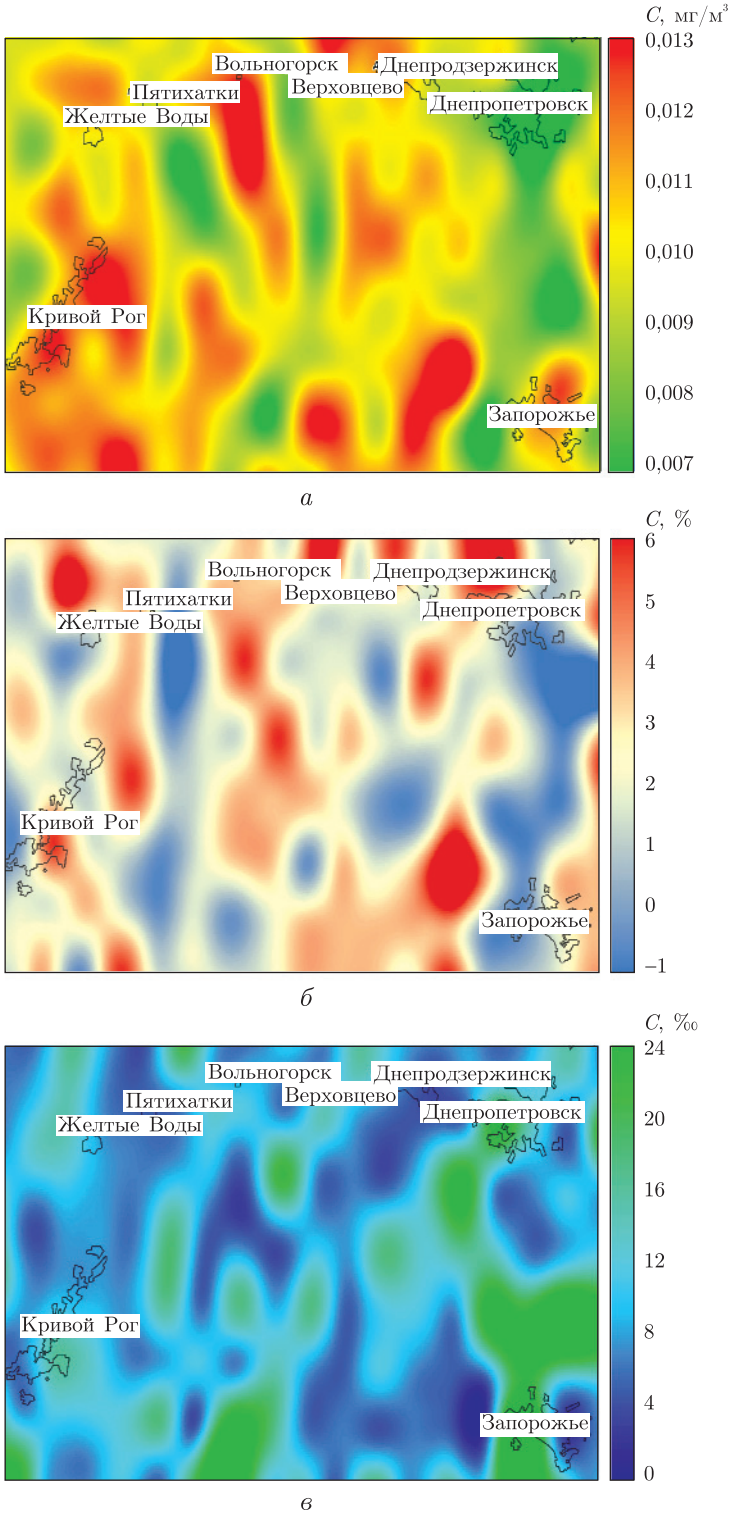

Рис. 3. Пространственное распределение характеристик динамики содержания SO_2 в атмосфере Приднепровского промышленного района в 2009–2011 гг.

Судя по данным карты (см. *а* на рис. 3), наибольшая площадь распространения аэрозоля диоксида серы наблюдалась над индустриальными агломерациями городов Кривой Рог, Вольногорск и Днепродзержинск. В настоящее время ни в одном из индустриальных центров пока еще не зафиксированы случаи превышения ПДК. Изучение темпов среднегодового прироста концентраций SO_2 в атмосфере по карте (см. *б* на рис. 3) свидетельствует о тенденции накопления диоксида серы не только над индустриальными центрами, но и о продвижении факелов над сельской местностью. Исходя из того, что в подавляющем своем числе городские теплоэлектроцентрали работают на угле, необходимым представляется контроль за содержанием серы в топливе. Необходимо также учитывать, что диоксид азота и серный ангидрид обладают эффектом суммации. Вступая в химическую реакцию друг с другом и с некоторыми другими химическим соединениями, они образуют высокотоксичные вещества [9]. Следовательно, игнорирование тенденций накопления диоксида азота и серы может привести к увеличению частоты выпадения кислотных дождей, случаев повреждения состояния сельскохозяйственных посевов, роста числа заболеваний среди населения и т. п.

Пространственные распределения годовых периодических составляющих атмосферных загрязнителей антикоррелируют с расположением промышленных центров, что говорит о влиянии сохранившихся природных растительных экосистем, подверженных сезонным циклам активности атмосферной абсорбции.

Таким образом, дистанционное зондирование является гибким и оперативным инструментом картирования и оценки динамики загрязнения атмосферы диоксидами азота и серы в региональном масштабе.

Анализ карт распространения факелов NO_2 и SO_2 позволил выявить определенные различия в рассеивании токсикантов. Очевидно, что формирование циркуляционных потоков аэрозолей диоксида азота и серы связано с фотохимическими свойствами токсикантов, особенностями климата и мегарельефа местности. Полученные нами результаты могут быть приняты во внимание при составлении краткосрочных прогнозов выпадения кислотных дождей в сельской местности, возникновения риска нанесения ущерба состоянию сельскохозяйственных посевов.

Использование карт среднегодового прироста концентрации токсикантов представляется перспективным для количественной и качественной оценки образования фотохимического смога и роста числа заболеваний среди населения индустриальных городов. Наложение данных карт по двум изучаемым показателям может помочь разработать превентивные мероприятия снижения риска возникновения сочетанного эффекта, связанного с образованием высокотоксичных промежуточных веществ.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на получение тематических карт комплексного показателя загрязненности атмосферы промышленного района, учитывающего сразу несколько токсикантов с собственными ПДК, по примеру индекса загрязнения атмосферы [10].

Авторы выражают признательность Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) NASA, обеспечившему архив спутниковых измерений.

1. *Ровинский Ф. Я., Егоров В. И.* Озон, оксиды азота и серы в нижней атмосфере. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1986. – 182 с.
2. *Копач П. И., Шапарь А. Г., Шварцман В. М.* Техногенез и кислотные дожди. – Киев: Наук. думка, 2006. – 173 с.

3. *Болтина И. В., Костик Е. Л.* Подходы к исследованию экологической безопасности // Зб. наук. ст. III Всеукр. з'їзду екологів з міжнар. участю, 21–24 верес., 2011, Вінниця. – Вінниця: Ін-т екології та екол. безпеки Вінниц. нац. техн. ун-ту, 2011. – Т. 1. – С. 111–114.
4. *Vasilyeva T., Duka Y., Kharytonov M.* Alleviation of toxic impact of chemical agents on human organism // Medical treatment of intoxications and decontamination of chemical agents in the area of terrorist attack / Ed. by C. Dishovsky, A. Pivovarov and H. Benschop. – Dordrecht: Springer, 2006. – P. 263–274.
5. *Maini A. K., Agrawal V.* Satellite Technology: Principles and Applications. – Chichester: Wiley, 2011. – 694 p.
6. *Kokhanovsky A. A., de Leeuw G.* Remote Sensing of the Atmosphere from Space. – Chichester: Springer, 2013. – 576 p.
7. *Себер Дж.* Линейный регрессионный анализ / Пер. с англ. – Москва: Мир, 1980. – 456 с.
8. *Хлопова В. М., Харитонов М. М.* Формування кислотних дощів в мегаполісі // Вісн. Дніпропетр. держ. аграр. ун-ту, 2011. – № 1. – С. 8–14.
9. *Пинигин М. А.* Теория и практика оценки комбинированного действия химического загрязнения атмосферного воздуха // Гигиена и санитария. – 2001. – № 1. – С. 9–13.
10. *Безуглая Э. Ю.* Мониторинг состояния загрязнения атмосферы в городах. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1986. – 200 с.

ГУ "Научный центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины", Киев
Днепропетровский государственный аграрный университет
Лаборатория оценки загрязнения воздуха Днепропетровского областного центра гидрометеорологии

Поступило в редакцию 16.08.2012

С. А. Станкевич, О. В. Титаренко, М. М. Харитонов, В. М. Хлопова

Картування забрудненості атмосфери Придніпровського промислового району діоксидами азоту і сірки з використанням супутникових даних

Проведено аналіз просторового розподілу та поширення динаміки забруднення атмосфери Придніпровського промислового району сполуками діоксиду азоту і сірки шляхом зіставлення даних стаціонарних наземних вимірів і супутникових спостережень атмосфери в 2009–2011 рр. Встановлено, що концентрація діоксиду азоту у повітрі Дніпропетровська та Дніпродзержинська перевищує в два рази гранично припустиму, а найбільша площа поширення діоксиду сірки спостерігається над індустріальною агломерацією міст Кривий Ріг, Вільногірськ і Дніпродзержинськ.

S. A. Stankevich, O. V. Titarenko, N. N. Kharytonov, V. N. Khlopova

Mapping the atmosphere pollution by nitrogen and sulfur dioxides over the Pridneprovsky industrial area using satellite observations

Analysis of the spatial distribution and the dynamics of the pollution of the atmosphere by nitrogen and sulfur dioxides over the Pridneprovsky industrial area is carried out by the processing of ground-based measurements and satellite observations of the atmosphere in 2009–2011. Two-time exceeding of the permissible concentration of nitrogen dioxide in air over Dnepropetrovsk and Dneprodzerzhinsk is detected. The largest spreading area of sulphur dioxide is observed over the industrial agglomerations of the cities of Krivoy Rog, Volnogorsk, and Dneprodzerzhinsk.