

УДК 504.3.0544

Р. А. Родригес Залепинос, Г. В. Аверин, д-р техн. наук, профессор
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ДИОКСИДА СЕРЫ И АЭРОЗОЛЯ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ УКРАИНЫ

Впервые по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) получены карты рисков загрязнения атмосферы Украины диоксидом серы (SO_2) и аэрозолем с разрешением $27,5 \times 18$ (км) и 110×72 (км), соответственно. Показано, что риски восточной и западной частей Украины относятся как 2:1. Впервые по данным ДЗЗ получены зависимости концентрации SO_2 от скорости и направления ветра. Установлено распространение SO_2 от крупных ТЭС на 30–45 км, а также повышенные уровни риска содержания диоксида серы в районах дельты Дуная и Черного моря.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы; уровень, Украина, карта, диоксид серы

Состояние вопроса

В Украине данные о загрязнении атмосферного воздуха поступают из малочисленной сети экологического мониторинга Украинского гидрометеоцентра, которая охватывает 162 стационарных поста в 53 городах. Получить по этим наблюдениям целостную картину загрязнения атмосферы над территорией всего государства невозможно.

Методы ДЗЗ позволяют определять концентрации веществ в атмосфере с высоким пространственным и временным разрешением. Сегодня эти данные не находят широкого применения для решения практических задач экологического мониторинга из-за высокой сложности доступа к ним, а также трудоемкости их представления и анализа.

На примере изучения загрязнения атмосферы диоксидом серы и аэрозолем, продемонстрированы ранее недоступные возможности в области природоохранной деятельности, предоставляемые новым комплексом подсистем экологического мониторинга [1].

Цель исследования

Необходимо построить и проанализировать карты высокого разрешения рисков загрязнения атмосферы над территорией Украины на основе данных дистанционного зондирования Земли. По рассчитанным рискам определить, насколько уровень загрязнения атмосферы на востоке Украины выше, чем на западе; какой регион страны имеет самые высокие риски загрязнения. Рекомендовать перспективные направления дальнейших исследований.

Изложение основного материала исследования

Данные. Используются ежедневные данные содержания SO_2 в вертикальном атмосферном столбе приземного слоя атмосферы (спутник Aura, радиометр OMI) на регулярной широтно-долготной решетке ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$, около $27,5 \times 18$ (км) для Украины) с 01.10.2004 по 20.06.2012. Концентрация определяется в единицах Добсона (ед), $1 \text{ ед} = 2,69 \cdot 10^{16}$ молекул/см² [2].

Используются ежедневные данные оптической толщины аэрозоля (ОТА) в вертикальном атмосферном столбе атмосферы (спутник Terra, радиометр MODIS) на регулярной широтно-долготной решетке ($1.0^\circ \times 1.0^\circ$, около 110×72 (км) в пределах территории Украины) с 01.03.2000 по 05.10.2012. Величина ОТА безразмерна и лежит в диапазоне от – 0,05 до 5 [3].

© Родригес Залепинос Р. А., Аверин Г. В., 2012

Для каждой ячейки $1,0^\circ \times 1,0^\circ$ взято максимальное значение ОТА среди пикселей сцен уровня 2, разрешением 10×10 (км), которые попадают в ячейку. Выбор обусловлен интересом в основном к загрязнению антропогенного характера, а также предположением, что максимальная величина ОТА должна наблюдаться преимущественно над городами и зонами влияния предприятий.

Данные скорости и направления ветра взяты на высоте 50 м от поверхности Земли из базы повторного анализа MERRA ($1/2^\circ \times 2/3^\circ$, $55 \text{ км} \times 48 \text{ км}$) с интервалом 1 час [4]. Ежедневные данные получены путем отбора и усреднения значений с 9.00 до 12.00 по местному украинскому времени.

Впервые для каждой ячейки сформированы временные ряды содержания диоксида серы, аэрозоля, скорости и направления ветра [1], доступные напрямую из среды анализа данных R [5, 6].

По данным экологических паспортов регионов Украины за 2010 г. [7] отобраны все предприятия, ТЭС и ТЕЦ, выбрасывающие диоксид серы. По космическим снимкам Google найдены крупные организованные источники выбросов предприятий. Координаты дымовых труб взяты в качестве фактического расположения источников выбросов.

Риски загрязнения атмосферы Украины диоксидом серы и аэрозолем. В данном исследовании под риском загрязнения атмосферы понимается вероятность случаев, когда наблюдается определенный уровень загрязнения воздуха диоксидом серы либо аэрозолем над изучаемой территорией.

Учитывая диапазон изменения значений концентрации SO_2 , для каждой ячейки подсчитано количество дней с концентрацией в диапазонах $[0,5 \cdot i] \dots [0,5 \cdot i + 0,5]$ еД, $S(i)$, где $i = 1 \dots 9$, а также количество дней T , для которых имеются данные наблюдений (концентрация в пределах от -5 до 5 еД). Риск загрязнения для ячейки считается равным $R(i) = S(i) / T$.

Предполагается, что погрешность измерения для взятых ячеек (Украина) имеет одинаковое значение. Экспериментально установлено, что шаг $0,5$ еД позволяет учесть все особенности распределения загрязнения. Величина T составляет примерно от 1400 (для юга Украины) до 2200 дней (для западных областей).

В данном исследовании низким уровнем загрязнения считается диапазон значений $0,05 \dots 1,5$ еД, умеренным – $1,5 \dots 2,5$ еД (рисунок 1), высоким – $2,5 \dots 3,5$ еД, очень высоким – $3,5 \dots 5,0$ еД. Шаг $1,0$ еД подобран экспериментально для обеспечения приемлемого количества интервалов рисков. Шкала начинается от $0,5$ еД, чтобы частично устранить погрешности измерений.

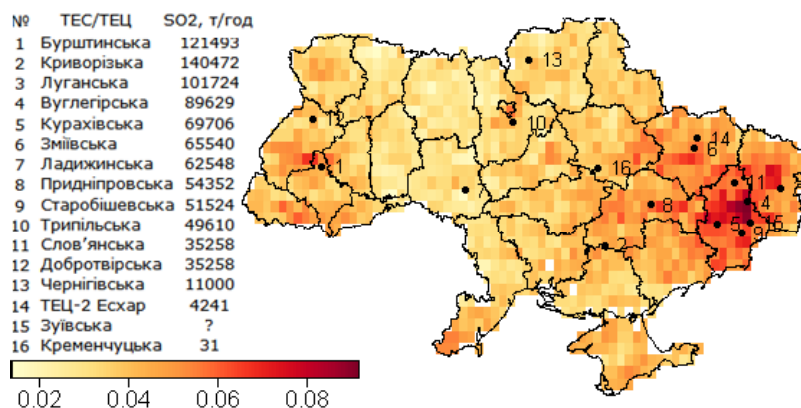


Рисунок 1 – Карта рисков умеренного уровня загрязнения атмосферы Украины диоксидом серы с разрешением $27,5 \times 18$ (км)

Рядом указан объем выброса SO_2 согласно экологическому паспорту. Карты рисков с промышленными предприятиями и ТЭС (формат KML) находятся в свободном доступе по адресу <http://wikience.donntu.edu.ua/rodrigis>.

Из приведенных на рисунке 1 данных, видны явные отличия по уровню рисков для восточной и западной частей Украины. Довольно контрастно выглядят Донецкая (50 % площади имеет риск 8 % и выше) и Луганская (6–8 % – треть площади) области в сравнении с западными регионами страны, где уровень риска в основном ниже 3 %. Центральная часть Украины не выделяется на карте в отдельную зону с какой-либо своей характерной особенностью уровня загрязнения атмосферы.

Район Луганской области с наибольшим риском ($\approx 7\%$) ориентировочно находится под влиянием Луганской ТЭС. Заметно выделяются зоны влияния Угледорской, Приднепровской, Старобешевской и Славянской ТЭС. Выделяется также район на границе Тернопольской, Ивано-Франковской и Львовской областей, который, видимо, находится под воздействием Бурштынской ТЭС. Меньший, но заметный уровень риска соответствует территории Киева. Возможен трансграничный перенос в Луганской, Харьковской, Закарпатской и Одесской областях.

Учитывая диапазон изменения значений концентрации ОТА, для каждой ячейки подсчитано количество дней с концентрацией в диапазонах $[0,2 \times i] \dots [0,2 \times i + 0,2]$ еД, $S(i)$, где $i = 0..24$, а также количество дней T , для которых имеются данные наблюдений (ОТА в пределах от $-0,05$ до 5). Экспериментально установлено, что шаг $0,2$ позволяет учесть все особенности распределения загрязнения. Риск загрязнения для ячейки считается равным $R(i) = S(i) / T$. Экспериментально подобрана шкала рисков для обеспечения приемлемого количества интервалов рисков (таблица 1).

Таблица 1 – Шкала рисков аэрозольного загрязнения атмосферы

Диапазон	Категория риска
0,0..0,2	Очень низкий
0,2..0,4	Низкий
0,4..0,6	Умеренный
0,6..0,8	Высокий
0,8..1,0	Очень высокий
1,0..5,0	Катастрофический

Шесть карт рисков расположены в соответствии с приведенной шкалой слева направо и сверху вниз (рисунок 2). Таким образом, крайняя верхняя карта слева соответствует очень низкому риску (0,0..0,2), а крайняя правая нижняя – катастрофическому (1,0..5,0).

Поскольку очень низкий риск аэрозольного загрязнения довольно высок для всей территории Украины, то, вероятно, величины ОТА в диапазоне от 0,0 до 0,2 вызваны природными факторами.

Низкий риск аэрозольного загрязнения атмосферы характерный для Донецкой, Запорожской, Днепропетровской, Херсонской и Одесской областей, а также для Киева. Повышенные уровни рисков наблюдаются в Крыму, которые, вероятно, вызваны природными факторами присутствия аэрозоля над Черным морем. Заметные уровни рисков на юге Одесской области и юго-западе Украины частично могут быть вызваны трансграничным переносом аэрозоля из соседних стран.

Хочется отметить особенность, что указанные выше области с повышенными рисками низкого уровня загрязнения и город Киев имеют более низкие значения уровня риска на карте рисков очень низкого загрязнения, чем остальные области страны. Это еще раз свидетельствует о более высоких уровнях присутствия аэрозоля в атмосфере указанных областей по сравнению с другими регионами страны.

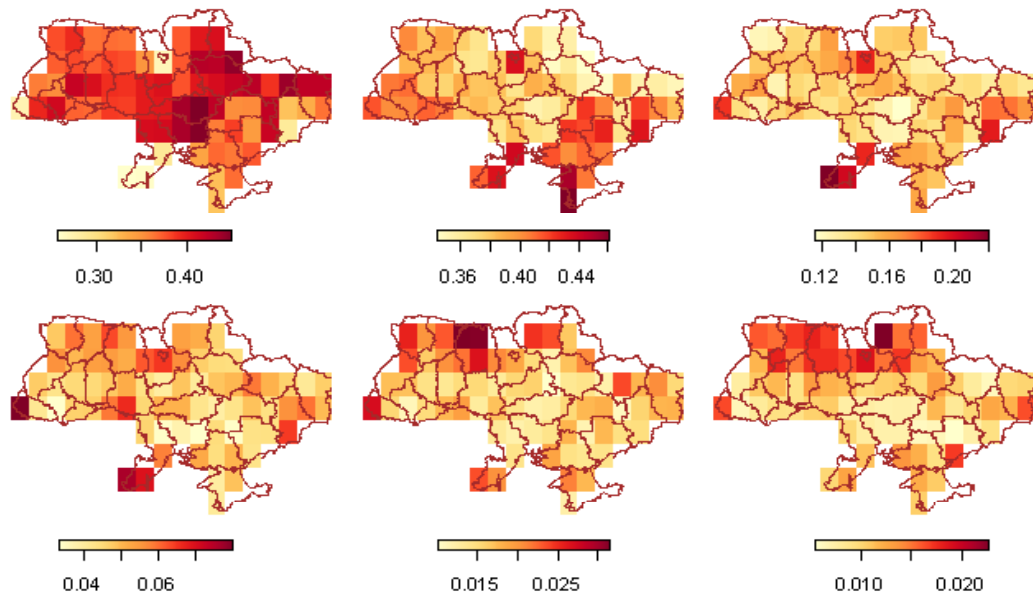


Рисунок 2 – Карты рисков аэрозольного загрязнения атмосферы над территорией Украины

Умеренный риск аэрозольного загрязнения характерный для Донецкой и Одесской областей, а также для Киева. Начиная с карты умеренных рисков вплоть до карты катастрофических рисков, на крайнем западе Украины (Ужгородская область) прослеживается район заметно повышенных рисков. Это может быть вызвано трансграничным переносом аэрозоля.

Высокий уровень риска существенно ниже для территории Украины, чем предыдущие уровни. Наибольшие уровни наблюдаются на крайнем западе Украины, юге Одесской области, Донецкой, Киевской областях. Меньшие, но заметные уровни наблюдаются на юге Винницкой области и севере Житомирской и Луцкой областей.

Очень высокие и катастрофические уровни рисков наблюдаются в основном на севере страны, в районе от Луцкой до Черниговской областей.

Загрязнение территории дельты Дуная и Черного моря. Гипотетически, вклад в заметные уровни рисков (рисунок 1) на юге Одесской области, побережье Крыма и над Черным морем ($\approx 4\%$), в отсутствие техногенных факторов, может вносить природный фактор – наличие сероводорода (H_2S) в зонах дельты Дуная [7] и Черного моря [8]. Радиометр ОМІ не чувствителен к H_2S , а вода не влияет на точность обнаружения SO_2 . Известно, что одним из продуктов окисления сероводорода может быть SO_2 ($2H_2S + 3O_2 = 2H_2O + 2SO_2$).

Классификация территории Украины. Ранжирование территории страны ведется в шкале классификации, которая имеет 7 градаций. Территория выделяется в отдельный класс в том случае, если наблюдается: высокая либо низкая концентрация диоксида серы над размещенным на ней техногенным объектом, который выбрасывает SO_2 (2 класса); высокая концентрация загрязняющего вещества над объектом, который не выбрасывает SO_2 согласно экологическому паспорту (1 класс); существенный уровень концентрации диоксида серы над территориями и городами, в окрестностях которых нет техногенных источников загрязнения (2 класса); повышенная концентрация загрязняющего вещества над территориями на границе государства (1 класс). Выделяются также территории, куда вредные вещества предположительно переносятся ветром от удаленных источников загрязнения (1 класс).

Ожидается, что предложенная классификация поможет специалистам в области природоохранной деятельности скоординировать дальнейшее исследование территории Украины и объяснить причины загрязнения атмосферного воздуха над территориями, где нет промышленной деятельности или других явных факторов загрязнения.

Перенос загрязнения ветром на прилегающие территории. Наличие временных рядов метеорологических параметров позволяет установить зависимости концентрации загрязня-

ющего вещества в ячейке от скорости и направления ветра. Это дает возможность оценить степень загрязнения атмосферы вблизи техногенных объектов, установить наиболее подверженные загрязнению территории, а также дальность распространения вредного вещества.

В процессе исследований было установлено, что максимальный риск наблюдается практически всегда не в ячейке, которая соответствует крупному источнику выбросов, а на некотором расстоянии от нее.

Поскольку концентрация вещества определяется для всей ячейки, можно предположить, что чувствительность радиометра OMI не позволяет обнаружить узкую полосу дымового шлейфа вблизи источника. На некотором расстоянии от дымовой трубы за счет диффузии облако загрязнения становится достаточно широким и содержание вещества в атмосфере уже может определяться радиометром. Если это так, то можно судить о дальности переноса SO₂ от источника выброса и зоне его влияния.

На полярной диаграмме, на основе наблюдений за весь доступный период времени, для каждой скорости и направления ветра из узла (48²/₃, 24) решетки MERRA показана средняя концентрация SO₂ в ячейке (49,25, 24,25), которая расположена на северо-западе от Бурштынской ТЭС (рисунок 3а). Аналогичные данные представлены для узла решетки MERRA (49, 38) и ячейки (49, 38), которая расположена на северо-востоке от Славянской ТЭС (рисунок 3б). Указаны левые нижние углы ячеек SO₂.

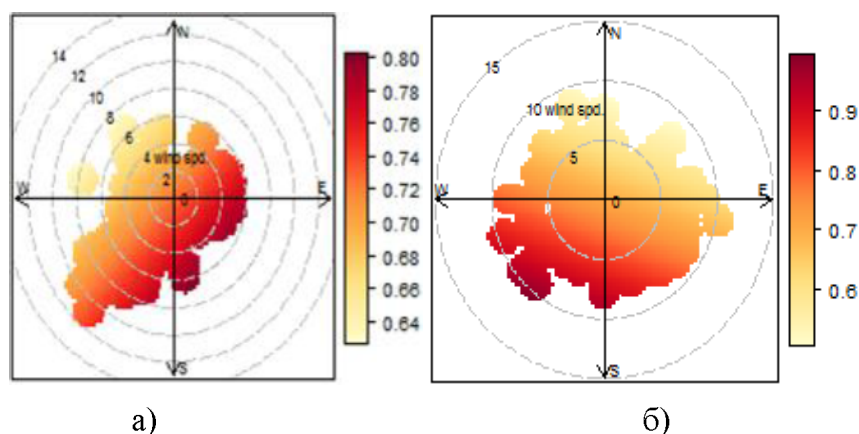


Рисунок 3 – Влияние (а) Бурштынской и (б) Славянской ТЭС на уровень загрязнения воздуха SO₂ в зависимости от скорости и направления ветра

Центру диаграммы соответствует нулевая скорость ветра, которая возрастает радиально. Как видно из рисунка 3а, максимальные концентрации SO₂ наблюдаются при юго-восточном ветре со скоростью 2–4 м/с, а минимальные при северо-западном ветре. На юго-востоке, на расстоянии 30 км от центра ячейки (49,25; 24,25) находятся источники выбросов Бурштынской ТЭС. Для Луганской ТЭС расстояние, где наблюдается влияние станции, может достигать 45 км.

Также замечены случаи, когда заметные концентрации SO₂ наблюдаются при направлении ветра не со стороны источника выброса, например при юго-западном ветре (рисунок 3а). Вероятно, это объясняется дрейфом облака SO₂ по ячейке. Когда ветер направлен в сторону ячейки, облако SO₂ накапливается и рассеивается по ячейке. При изменении ветром направления, оно не исчезает мгновенно. Иногда это приводит к повышению концентрации, фиксируемой радиометром, поскольку ветер может перераспределить облако над территорией ячейки. Часть облака могла выйти за пределы ячейки, а затем возвратиться назад при изменении ветра, сохраняя высокие показатели загрязнения.

Выводы

Риски загрязнения атмосферы диоксидом серы для восточной и западной частей Украины относятся примерно 2:1. Распространение диоксида серы от крупных ТЭС возможно на расстояние 30–50 км. Радиометр ОМІ в основном не позволяет обнаружить узкую полосу дымового шлейфа вблизи источника, что может быть связано с особенностями его чувствительности. Заметный уровень риска в районах дельты Дуная и Черного моря связан с возможным процессом окисления сероводорода. Дальнейшие исследования следует перспективно направить на уточнение характера загрязнения дельт Дуная и Днестра, акватории Черного моря, а также зон с заметными уровнями рисков, где поблизости отсутствуют промышленные предприятия. Созданные в ДонНТУ информационные ресурсы и базы данных несут исключительно обширную информацию об экологической обстановке на территории Украины.

Список литературы

1. Rodrigues Zalipynos R. A. Representing Earth remote sensing data as time series / R. A. Rodrigues Zalipynos // Donetsk National Technical University. Series: System analysis and information technology in environmental and social sciences. – 2012. – № 2.
2. Aura OMI Sulphur Dioxide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/OMI/omso2e_v003.shtml.
Aura OMI Sulphur Dioxide [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/OMI/omso2e_v003.shtml.
3. MODIS Atmosphere [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/>.
MODIS Atmosphere [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/>.
4. MERRA: Modern Era Retrospective-Analysis [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/research/merra/>.
MERRA: Modern Era Retrospective-Analysis [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/research/merra/>.
5. A language and environment for statistical computing [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.R-project.org/>.
A language and environment for statistical computing [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.R-project.org/>.
6. Carlsaw D. C. Openair – an R package for air quality data analysis / D. C. Carlsaw, K. Ropkins // Environmental Modeling. – 2012. – № 27. – P. 52–61.
7. Екологічні паспорти регіонів [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.menr.gov.ua/content/category/65>.
Ekologichni pasporty regioniv (Region's ecological certificates) [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.menr.gov.ua/content/category/65>.
8. A model for early diagenetic processes in sediments of the continental shelf of the Black Sea / J. W. M/ Wijnsman, P. M. J. Herman, J. J. Middelburg, K. Soetaert // Estuarine Coastal. – 2002. – № 54. – P. 403–421.
9. Взрыв сероводорода Черного моря [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ufodos.org.ua/publ/7-1-0-136>.
Vzryv serovodoroda Chernogo morya (Hydrogen sulfide explosion of the Black Sea) [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <http://ufodos.org.ua/publ/7-1-0-136>.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С. П. Висоцький, АДІ ДонНТУ.

Стаття надійшла до редакції 21.12.12

Р. А. Родрігес Залепинос, Г. В. Авєрін
Донецький національний університет, м. Донецьк
**Екологічний аналіз вмісту діоксиду сірки й аерозоля в
атмосферному повітрі над територією України**

Вперше за даними дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) отримано карти ризиків забруднення атмосфери України діоксидом сірки (SO₂) і аерозолем із роздільною здатністю 27,5×18 (км) та 110×72 (км) відповідно. Показано, що ризики забруднення східної та західної частин України співвідносяться як 2:1. Вперше за даними ДЗЗ отримано залежності концентрації SO₂ від швидкості й напрямку вітру. Встановлено поширення SO₂ від великих ТЕС на 30–45 км, а також підвищення рівнів ризику вмісту діоксиду сірки в районах дельти Дунаю та Чорного моря.

ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ: РІВЕНЬ, УКРАЇНА, КАРТА, ДІОКСИД СІРКИ

R. A. Rodrigues Zalepinos, G. V. Averin
Donetsk National University, Donetsk
**Ecological Analysis of Sulphur Dioxide and Aerosol Content in
Atmospheric Air above the Territory of Ukraine**

The Earth remote sensing data and new complex of ecological monitoring subsystems have made it possible for the first time to create maps of risks of atmospheric contamination by sulphur dioxide (SO₂) and aerosol with resolution of 27,5×18 (km) and 110×72 (km) respectively in Ukraine.

For the first time the risks for the eastern and the western parts of Ukraine are shown to be related as 2:1. The risks analysis has been carried out with taking into account the anthropogenic objects location and their emission levels. Based on the analysis the new classification of the territory of Ukraine is proposed according to the factor of atmospheric contamination.

Also for the first time using the Earth remote sensing data and reanalysis the dependencies of SO₂ concentration on wind speed and direction are received. The fact that sulphur dioxide spreading from large thermal power plants within 30–45 km distance has made it possible to make the idea of rather vast zones affected by enterprises is established.

The hypotheses about peculiarities of OMI radiometer sensitivity and transporting SO₂ cloud by wind are noticed and suggested. The hypothesis of that fact that noticeable risk level in the Danube delta and the Black Sea area is related to the possible hydrogen sulfide oxidation process is formulated.

ATMOSPHERE CONTAMINATION: LEVEL, UKRAINE, SULFUR DIOXIDE