

## Исследование загрязнения атмосферного воздуха Европы аэрозолем с использованием данных дистанционного зондирования Земли

Родригес Залепинос Р.А.

Донецкий национальный технический университет,  
rodrigues@csm.donntu.edu.ua

### Abstract

*Rodriges Zalipynis R.A. "Aerosol pollution over Europe study using Earth remote sensing data" For the first time the maps of air pollution risks by aerosol over the territory of Europe with resolution  $1.0^\circ \times 1.0^\circ$  ( $110 \text{ km} \times 72 \text{ km}$  for the territory of Ukraine) were obtained. It is shown that moderate and high risk levels of the areas that are most polluted by aerosol in Europe (except the north of Italy) and in Ukraine (Kyiv city, Donetsk and Odessa regions) are related approximately as 1:1. Moderate risk levels of the regions that are most susceptible to air pollution by aerosol in Ukraine (Donetsk and Odessa regions) are related to moderate risk levels of other regions approximately as 1:1.8.*

Keywords: aerosol, Earth remote sensing data, air pollution risk maps.

### Введение

На сегодняшний день данные о загрязнении атмосферного воздуха преимущественно поступают из сети стационарных наземных постов, которые находятся в основном в крупных городах. Посты измеряют точечные концентрации вредных веществ на высоте до 10 метров над уровнем поверхности. В некоторых странах, например в Украине, измерение аэрозоля не выполняется (за исключением взвешенной пыли). Химические реакции, перенос ветром веществ в атмосфере и другие факторы обуславливают низкую достоверность результатов численных моделей в районах отсутствия постов контроля атмосферного воздуха. Получить по наблюдениям разреженных наземных постов целостную картину загрязнения атмосферы над территорией всей Европы невозможно.

Методы дистанционного зондирования Земли (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 этим данным, а также трудоемкости их представления и анализа.

Новый комплекс подсистем экологического мониторинга предоставляет ранее недоступные инструменты для решения актуальных задач природоохранной деятельности [1]. С их помощью удалось выполнить построение карт рисков аэрозольного загрязнения атмосферы над территорией Европы на основе данных дистанционного зондирования Земли.

Карты рисков загрязнения атмосферного воздуха высокого разрешения позволяют ответить на ряд актуальных вопросов в области экологической безопасности. Например, насколько

отличается уровень загрязнения атмосферы над Украиной от уровня загрязнения над другими странами; какие страны имеют самые высокие риски загрязнения аэрозолями, какова степень загрязнения атмосферы стран по сравнению друг с другом.

### Анализ исследований и публикаций

Благодаря инициативам НАСА по предоставлению данных ДЗЗ в открытом доступе, например [2], на сегодняшний день активно ведутся исследования оптической толщины аэрозоля (ОТА) практически над всей территорией Земли. Анализируются тренды ОТА, в том числе и в атмосфере Европы [3], сравниваются показания концентрации аэрозоля с наземных станций и радиометров космических аппаратов [4]. Наиболее обширные данные наземных измерений ОТА предоставляет сеть AERONET [5]. Данные ДЗЗ используются также для изучения эпизодов высоких концентраций аэрозоля над территорией Европы во время извержения вулканов [6]. Выясняются связи между изменчивостью ОТА над территорией Европы и климатическими колебаниями [7], а также степени вкладов антропогенного и природного факторов в общий уровень ОТА [8].

Целью исследования, приведенного в данной статье, является получение характерной картины аэрозольного загрязнения атмосферного воздуха над всей территорией Европы, а не климатологического среднего либо изучение отдельных случаев загрязнения. Предложенный ниже подход позволяет существенно снизить влияние на результирующую карту значений содержания аэрозоля, которые не характерны для атмосферного воздуха над рассматриваемой территорией.

### Изложение материала и результаты

Использованы ежедневные данные ОТА в вертикальном атмосферном столбе атмосферы (спутник Тегга, радиометр MODIS) на регулярной широтно-долготной решетке ( $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ , около  $110 \text{ км} \times 72 \text{ км}$  в пределах территории Украины) с 01.03.2000 по 05.10.2012. Величина является безразмерной и находится в диапазоне от -0.05 до 5 [2]. Для каждой ячейки  $1.0^\circ \times 1.0^\circ$  взято максимальное значение ОТА среди пикселей сцен уровня 2 разрешением  $10 \text{ км} \times 10 \text{ км}$ , которые попадают в ячейку.

Выбор максимального значения обусловлен интересом в основном к загрязнению антропогенного характера, а также предположением, что максимальная величина ОТА должна наблюдаться преимущественно над городами и зонами влияния промышленных предприятий. Впервые для каждой ячейки сформированы временные ряды ОТА [1], доступные напрямую из среды анализа данных R [9].

В данном исследовании под риском загрязнения атмосферы понимается вероятность случаев, когда наблюдается определенный уровень ОТА в воздухе над изучаемой территорией.

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 (табл. 1).

Таблица 1. – Шкала рисков аэрозольного загрязнения атмосферы над территорией Европы

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 (рис. 1). Таким образом, самая левая верхняя карта соответствует очень низкому риску (0.0..0.2), а самая правая нижняя катастрофическому (1.0..5.0).

Карты охватывают территорию Европы примерно от Лондона (Англия) на западе до Баку (Азербайджан) на востоке и от Стокгольма (Швеция) на севере до Тирана (Греция) на юге.

Для ориентировки дана политическая карта Европы, охватывающая примерно такую же область (рис. 2).

Из всех карт, кроме первых двух (низкого и очень низкого уровней рисков), исключена область на севере Италии между широтами 44 и 46, долготами 7 и 13. Среди крупных городов, которые находятся в этой географической области, можно выделить города Турин, Милан, Генуя, Парма, Болонья, Падуа.

Область была исключена из общих карт по причине чрезвычайно высоких уровней рисков содержания аэрозоля в ее атмосфере, что приводит к низкой детализации цветовой шкалы для остальной части Европы. Одним из факторов высоких уровней содержания аэрозоля в этой области может являться активная деятельность промышленных предприятий либо специфические природные факторы.

Очень низкая концентрация аэрозоля характерна для Швеции и Норвегии. На остальных картах, риски содержания аэрозоля в атмосферах этих стран наиболее низкие, что свидетельствует об относительной чистоте атмосферного воздуха над этими странами. К низким рискам аэрозольного загрязнения также относится атмосфера над территорией юга Франции.

Заметно выделяются ячейки, в которых находятся города Киев и Москва, что свидетельствует о не характерности низкого уровня содержания аэрозоля в их атмосфере. Аналогичным образом выделяется область западной Европы, для которой характерны более высокие концентрации аэрозоля в атмосфере, чем для остальной территории Европы.

Эта область Европы начинает выделяться, начиная с карты рисков умеренного загрязнения. Она имеет вид полосы, северная часть которой состоит из территорий Польши и Германии. Затем она тянется на юго-восток через территории стран Словакии, Венгрии, Сербии, Болгарии и через юг Румынии.

Территории, которые имеют наиболее высокие уровни низких рисков можно разделить на две категории: море и сушу. Практически над всеми морями (Черное, Азовское, Северное, Балкарское, Тирренское, Адриатическое) наблюдается заметный уровень риска.

Над сушей повышенный уровень риска находится в центре западной Европы (Польша, Германия, Чехия, Австрия).

Выделяются города Киев и Москва. Заметен север Италии с низкими уровнями рисков. Это свидетельствует о не характерности низкого содержания аэрозоля над этой областью Италии, а также над указанными городами.

Хотя над морями и сушей примерно одинаковые уровни рисков, над морями они, вероятно, вызваны природными факторами, а над сушей антропогенными.

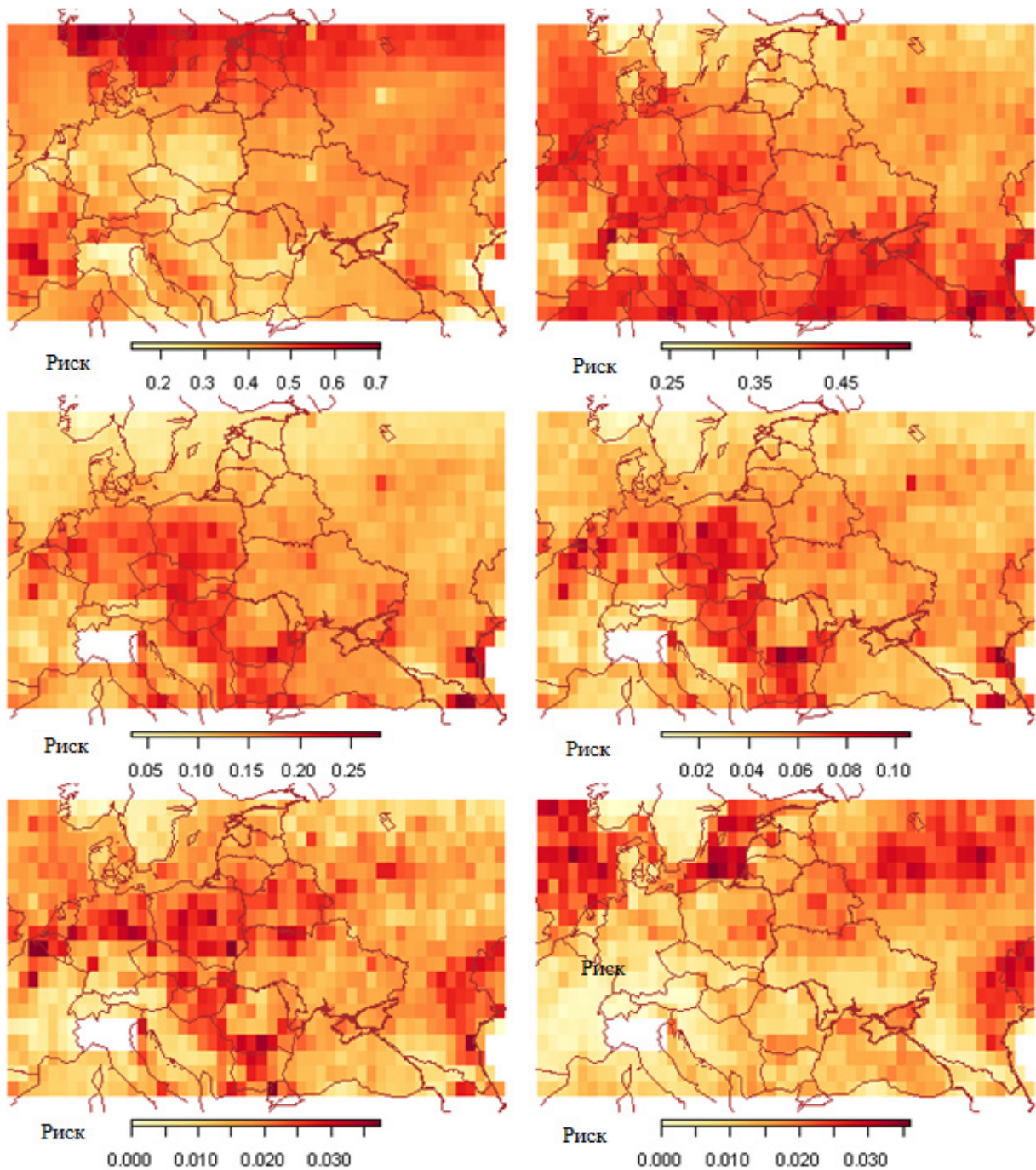


Рисунок 1. – Карти ризиків аерозольного забруднення атмосфери над територією Європи

Это имеет место быть, поскольку в основном области с повышенными рисками охватывают те же территории, что и области с повышенными уровнями риска на последующих картах. Более низкие риски наблюдаются над территориями стран восточной Европы и северных стран.

Вероятно, что карты рисков умеренного, высокого и очень высокого аерозольного загрязнения атмосферного воздуха более отчетливо выделяют промышленные области. Как было отмечено ранее, к таким областям относится север Италии, а также характерная полоса, которая на севере начинается с Германии и Поль-

ши и оканчивается в Болгарии.

По-прежнему заметны города Киев и Москва, но районы других городов, например, Париж, Варшава и Прага имеют более высокие риски. Похожий риск умеренного загрязнения по сравнению с западной Европой наблюдается над территориями Донецкой и Луганской областей. На картах рисков более высоких категорий указанные области Украины имеют заметно меньший риск относительно промышленных районов западной Европы.

На карте очень высоких и катастрофических рисков заметные значения уровней рисков выделяются в Белоруссии и на севере Украины.

В обеих странах, вероятно, такой уровень рисков вызван трансграничным переносом аэрозоля из России в результате природных катастроф, например, пожаров. Остальная часть Европы, по всей видимости, помимо вклада природных явлений в уровни риска, подвержена также загрязнению аэрозолями антропогенного происхождения.

На карте катастрофического уровня рис-

ков выделяются две зоны. Во-первых, Северное и Балтийское моря. Во-вторых, европейская и южная (республика Калмыкия, Астраханская, Атырауская, Западно-Казахстанская области) части России. Вероятно, такие уровни рисков в этих районах вызваны в основном природными факторами: в случае морских территорий, возможно, морской солью, а сухопутных, по всей видимости, пожарами.



Рисунок 2. – Область Европы, для которой показаны риски аэрозольного загрязнения атмосферы на рисунке 1

Отдельно рассмотрим карты рисков аэрозольного загрязнения атмосферного воздуха над территорией Украины (рис. 3).

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 естественными природными факторами.

Низкий риск аэрозольного загрязнения атмосферы характерен Донецкой, Запорожской, Днепропетровской, Херсонской и Одесской областям, а также городу Киеву. 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 следующую особенность. Указанные выше области с повышенными рисками низкого 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 том, что для атмосферы над этими регионами характерны более высокие уровни концентрации аэрозоля по сравнению с другими регионами страны.

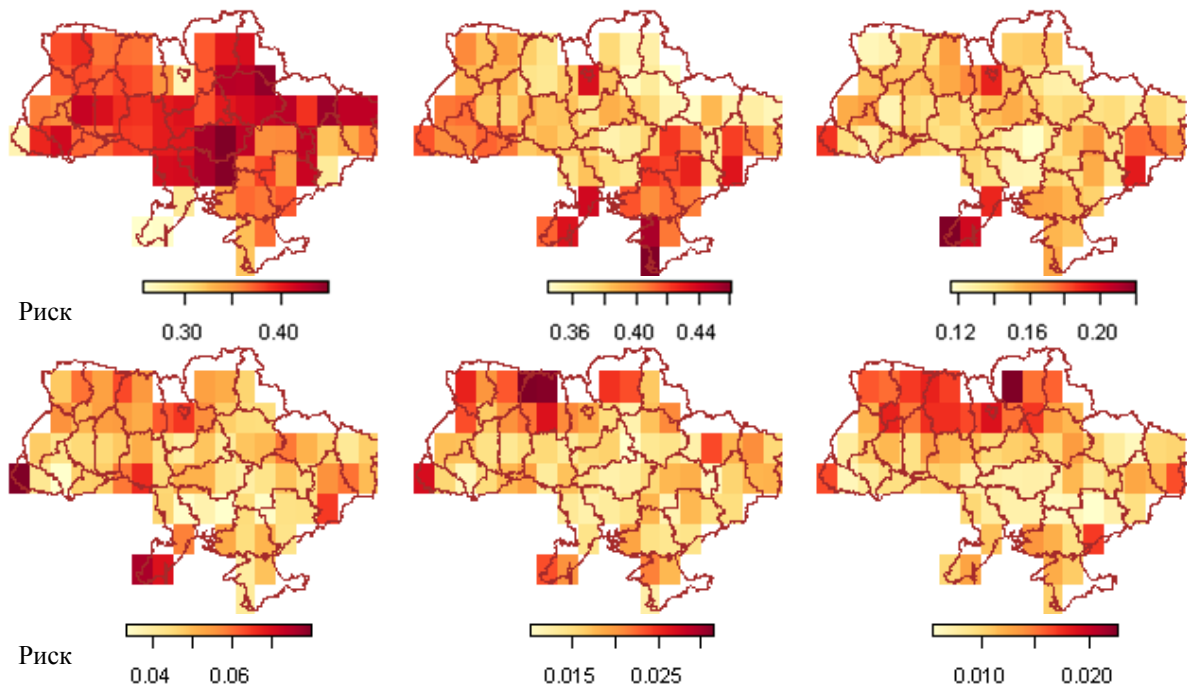


Рисунок 3. – Карты рисков аэрозольного загрязнения атмосферы над территорией Украины

Умеренный риск аэрозольного загрязнения характерен для Донецкой и Одесской областей, а также города Киев. 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.

Значения рисков для категории высокого уровня риска значительно ниже для территории Украины, чем для предыдущих категорий.

Наибольшие значения риска 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.

Для анализа атмосферы над городом необходимо иметь временной ряд загрязняющего вещества, который покрывает как можно меньшую территорию. Предельно малую возможную площадь для какого-либо продукта ДЗЗ либо ПА покрывает одна ячейка РШДР.

Благодаря представлению данных ДЗЗ в виде временных рядов можно провести такой анализ. Это демонстрирует еще одно преимущество предложенного представления данных ДЗЗ.

В ходе анализа установлено, что обычно над городами величина ОТА редко поднимается выше 1,0. Например, для Москвы, одного из наиболее подверженных аэрозольному загрязнению городов, зафиксировано всего лишь более 30 случаев значения ОТА выше 1,0 за последние 12 лет. Частично это можно отнести к природным факторам, например, пожарам. Для большинства городов Европы такие случаи наблюдаются еще реже.

Диаграмма Тьюки на рисунке 4 свидетельствуют о выраженной сезонности аэрозоля в атмосфере, а также о характерном уровне его содержания в разные периоды года. Для построения диаграммы выбраны значения ОТА ниже 1,5, чтобы экстремальные значения не влияли на общую картину.

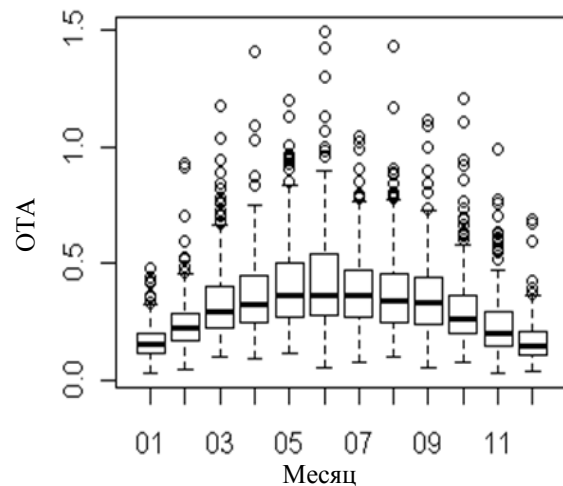


Рисунок 4. – Диаграмма Тьюки помесечных концентраций аэрозоля на основе ежедневных данных над Римом за 2000 – 2012 гг.

Временные ряды среднемесячных значений содержания аэрозоля над некоторыми городами Европы имеют ярко выраженные тренды снижения его концентрации (рис. 5). Пробелы во временных рядах вызваны отсутствием данных для некоторых зимних месяцев.

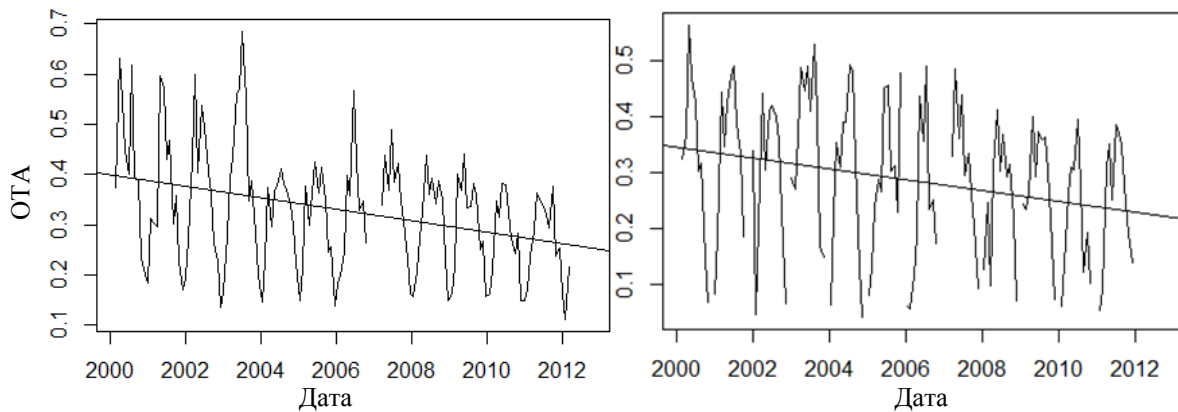


Рисунок 5. – Среднемесячная концентрация аэрозоля над городами Рим (слева) и Лондон (справа) с линиями регрессии

### Выводы

Наиболее загрязненной аэрозолями областью Европы является север Италии, уровни высоких рисков которой в 1,6 раз превышают риски других областей Европы, что, возможно, объясняется развитой промышленностью либо специфическими природными факторами. В этом районе можно выделить города Турин, Милан, Генуя, Парма, Болонья, Падуя.

Наиболее высокие риски аэрозольного загрязнения Европы (после севера Италии) выделяются в виде характерной полосы, которая состоит на севере из территорий стран Польши и Германии, а затем простирается на юго-восток через территории стран Словакии, Венгрии, Сербии, Болгарии и юга Румынии. Наиболее низкие уровни рисков в Европе наблюдаются над Швецией, Норвегией и южной Францией.

Дальнейшие исследования перспективно направить на ранжирование стран Европы в соответствии с уровнями рисков аэрозольного загрязнения их атмосферы. Также возможно использование данных более высокого разрешения, например, спутника Aura (радиометр OMI), что позволит выполнить более детальный анализ состояния загрязнения внутри одной страны. Использование данных из повторного анализа климата позволит определить зависимости концентрации аэрозоля в любой ячейке от скорости и направления ветра. При этом в некоторых случаях можно определить промышленные предприятия, которые вносят наибольший вклад в аэрозольное загрязнение атмосферы ближайших территорий и пути следования крупных облаков аэрозоля.

### Благодарности

Эта работа была поддержана грантом No. UKM1-2973-DO-09 Фонда гражданских исследований и развития США (CRDF). Любые мнения, анализы, выводы либо рекомендации, выраженные в этой статье, принадлежат автору, и

не обязательно отражают официальные взгляды либо мнения CRDF.

Электронная версия этой статьи с цветными картами рисков находится в свободном доступе по адресу

<http://wikience.donntu.edu.ua/rodriges>

### Литература

1. Climate Wikience [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://wikience.donntu.edu.ua/> (24.11.2012).
2. MODIS Atmosphere [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/> (24.11.2012).
3. Koukouli, M.E. Signs of a negative trend in the MODIS aerosol optical depth over the Southern Balkans / M.E. Koukouli, S. Kazadzis, V. Amiridis, C. Ichoku, D.S. Balis, A.F. Bais // *Atmos. Environ.*, № 44, 2010, P. 1219 – 1228.
4. Yoon, J. Analysis of linear long term trend of aerosol optical thickness derived from SeaWiFS using BAER over Europe and South China / J. Yoon, W. von Hoyningen-Huene, M. Vountas, J.P. Burrows // *Atmos. Chem. Phys.*, № 11, 2011, P. 12149 – 12167.
5. Aerosol Robotic Network (AERONET) Homepage [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> (24.11.2012).
6. Ansmann, A. The 16 April 2010 major volcanic ash plume over central Europe: EARLINET lidar and AERONET photometer observations at Leipzig and Munich, Germany / A. Ansmann, M. Tesche, S. Gross, V. Freudenthaler, P. Seifert, A. Hiebsch, J. Schmidt, U. Wandinger, I. Mattis, D. Müller, M. Wiegner // *Geophys. Res. Lett.*, № 37, L13810, 2010.
7. Chiacchio, M. Decadal variability of aerosol optical depth in Europe and its relationship to the temporal shift of the North Atlantic Oscillation in the realm of dimming and brightening / M. Chiacchio, T. Ewen, M. Wild, M. Chin, T. Diehl // *J. Geophys. Res.*, № 116, D02108, 2011.
8. Streets, D. G. Anthropogenic and natural contributions to regional trends in aerosol optical depth, 1980–2006 / D.G. Streets, F. Yan, M. Chin, T. Diehl, N. Mahowald, M. Schultz, M. Wild, Y. Wu, C. Yu // *J. Geophys. Res.*, № 114, D00d18, 2009.
9. R: A language and environment for statistical computing [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.R-project.org/> (24.11.2012).