



СЕКЦІЯ 2
ПРИРОДНИЧО-ГЕОГРАФІЧНІ ТА ГЕОЕКОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

УДК 551.51; 504.3.054

DOI <https://doi.org/10.32999/ksu2413-7391/2020-12-6>

Надточій Л.М.,
науковий співробітник
*Український гідрометеорологічний інститут
Державної служби України з надзвичайних ситуацій
та Національної академії наук України*
onoslyuda@uhmi.org.ua
<https://orcid.org/0000-0003-3038-5960>

**ОГЛЯД СУЧАСНИХ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
МЕХАНІЗМІВ ВПЛИВУ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВ
НА ПРОСТОРОВО-ЧАСОВУ ДИНАМІКУ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ
РЕЧОВИН В АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ**

У статті проаналізовано сучасні наукові дослідження, що стосуються впливу метеорологічних характеристик на рівень забруднення атмосферного повітря, і зазначено, що за однакового метеорологічного впливу може спостерігатися різна динаміка вмісту забруднювальних речовин (ЗР). Час перебування домішок в атмосфері різний і залежить як від характеристик самої ЗР, так і від метеорологічних умов. Від цього, у свою чергу, залежать і умови їх виведення із атмосфери. У результаті за наявності численних зв'язків хімічного складу з метеорологічними та кліматичними умовами постійно спостерігається перебіг різноманітних процесів переносу та хімічної трансформації ЗР. Це зумовлює складність аналізу вмісту домішок в атмосферному повітрі та потребує поглиблення знань щодо впливу метеорологічних процесів на рівень забруднення атмосферного повітря. Найбільший внесок в динаміку рівня забруднення атмосферного повітря серед інших метеорологічних параметрів мають вітрові характеристики. Також розглянуто дослідження, які присвячені впливу місцевої циркуляції, температури повітря та температурної стратифікації атмосфери, температурних інверсій, вологості повітря на формування забруднення міст, процеси великомасштабного перенесення забруднення і т.д. У статті здійснено аналіз робіт щодо дослідження мінливості забруднювальних речовин різних часових масштабів, а саме: добових, тижневих, сезонних та міжрічних. Наголошено, що з метою розробки заходів щодо покращення якості атмосферного повітря необхідно визначати рівні його забруднення у конкретному місці, оцінювати негативний вплив та можливі наслідки. Результати моделювання характеристик та динаміки ЗР за різних метеорологічних умов часто не узгоджуються з очікуваними результатами та потребують подальшого вивчення механізмів формування різних рівнів забруднення. Виділено перспективні напрямки досліджень в Україні, а саме: вплив місцевих вітрів на формування загального фонового забруднення міст прибережних територій та розташованих поблизу Карпатських гір; обчислення параметрів, що характеризують ступінь вертикального та горизонтального розсіювання домішок для окремих фізико-географічних зон; планування та експлуатації об'єктів промисловості.

Ключові слова: забруднювальні речовини, концентрації забруднювальних речовин, метеорологічні характеристики, сезонна мінливість, міжрічна мінливість.

Nadtochii L.M. THE REVIEW OF CURRENT SCIENTIFIC RESEARCH ABOUT GENERAL MECHANISMS FOR METEOROLOGICAL CONDITIONS INFLUENCE ON SPATIO-TEMPORAL POLLUTANTS' VARIABILITY IN THE ATMOSPHERIC AIR

The paper contains analysis of modern scientific studies concerning problems about influence of meteorological characteristics on atmospheric air pollution level. It was noted that the same meteorological impact could cause different dynamics of the pollutants' content in the ambient air. Life time significantly

vary for different chemical constituents and depends on its physical and chemical characteristics together with meteorological conditions. The opportunities of their removal from the atmosphere depends on the same factors. As a result, numerous links between chemical composition and meteorological and climatic conditions cause variety of pollutants' chemical transformation and transportation. These processes determine difficulties of pollutants' analysis in the atmosphere and require greater knowledge of the possible impact of meteorological processes on the atmospheric air pollution levels. Wind characteristics make the greatest contribution to the dynamics of air pollution levels among all meteorological parameters. Also, it was reviewed studies, which are dedicated to the influence of local circulation, air temperature and temperature stratification of the atmosphere, inversions, air humidity on the formation of urban air quality, large-scale pollution transportation, etc. The paper contains analysis of the research connected with variability of pollutants within different time scales, such as daily, weekly, seasonal and interannual. It is necessary to determine the levels of air pollution in a particular place to assess the negative impact and possible consequences for the purpose to develop measures of air quality improvement. The modelling results of characteristics and dynamics for pollutants in different meteorological conditions often do not coincide with the expected results and need further study of the mechanisms which form different levels of pollution. The relevant directions of further researches in Ukraine were defined. For example, the formation of general background pollution in the coastal territories and Carpathians under local wind conditions; calculations of the parameters that characterize the level of vertical and horizontal pollutants dispersion for different physico-geographical zones; planning and management of industrial objects, etc.

Key words: pollutants, concentrations of pollutants, meteorological characteristics, seasonal variability, interannual variability.

Постановка проблеми. Рівень забруднення атмосферного повітря в містах залежить від ряду чинників, а саме: викидів від стаціонарних і пересувних джерел (їх потужність та розташування), метеорологічних, ландшафтних та мікрокліматичних умов місцевості і т.д. На різних часових масштабах роль антропогенних джерел емісії та внесок метеорологічних умов у загальну динаміку забруднювальних речовин (ЗР) суттєво відрізняється. Такий вплив не завжди є однозначним, що ускладнює встановлення зв'язків між метеорологічними умовами та концентраціями ЗР, тому вплив метеорологічних характеристик на рівень забруднення потрібно вивчати в кожному місті окремо.

Звичайно, знання щодо зв'язку осереднених концентрацій із повторюваністю певних метеорологічних умов та змін кліматичних особливостей території практично не відіграє ролі під час короткострокового прогнозування рівня забруднення в містах (у цьому випадку необхідно використовувати строкові дані). Але така інформація є визначальною для визначення ймовірності повторюваності екстремальних перевищень допустимих рівнів забруднення та під час планування розвитку міста, зокрема (Внуков, 1992; Scorer, 2002; Moller, 2010):

- розбудови нових житлових районів по відношенню до діючих джерел викидів;
- розміщення нових об'єктів промисловості;

– створення планів управління якістю атмосферного повітря тощо.

На сьогодні чинна мережа моніторингу атмосферного повітря розташована в основному у великих містах. Проте згідно з нормативними документами, зокрема Директивами ЄС (Directive 2004/107/ЄС, 2004; Directive 2008/50/ЄС, 2008; Баштаннік та ін., 2016), є необхідними спостереження й у сільській місцевості. Тому отримана українською мережею інформація, за відсутності пунктів спостережень у сільській місцевості, не може повністю відображати рівень забруднення у країні.

Метою роботи є аналіз сучасних уявлень та проблем при вивченні впливу метеорологічних умов на внутрішньорічну та міжрічну динаміку ЗР.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розгляд впливу метеорологічних величин на рівень забруднення атмосферного повітря зазвичай проводиться за кожною характеристикою окремо, враховуючи природні умови території, та за загальним станом атмосфери у певний момент часу. Загальні метеорологічні умови території визначають здатність накопичувати та розсіювати домішки у цілому, незалежно від розташування джерел емісії (Jacobson, 2002). Їх описують з огляду на баричне поле, що характеризує процес у цілому. Зазвичай баричні системи з низьким



атмосферним тиском супроводжуються швидкими вітрами та хмарністю. Дія таких баричних систем на рівень забруднення сприяє зменшенню концентрацій ЗР: швидкі вітри розсіюють домішки, тоді як хмарність перешкоджає проникненню прямої сонячної радіації, зменшуючи при цьому інтенсивність фотохімічних реакцій (Jacobson, 2002; Scorer, 2002; Moller, 2010; Akimoto, 2016). Баричні системи з високим тиском характеризуються меншими швидкостями вітру, низхідними рухами повітря та безхмарним небом. У таких системах низхідні рухи повітря справляють значний внесок на приземний рівень забруднення. Незначні швидкості вітру сприяють накопиченню ЗР, а більша кількість сонячного випромінювання за безхмарного неба посилює перебіг фотохімічних реакцій з утворенням фотохімічного смогу (Jacobson, 2002; Moller, 2010; Akimoto, 2016). Повторюваність тих чи інших баричних утворень, у цілому, визначає загальну сприятливість метеорологічних умов території до накопичення домішок. Значну роль також відіграють розташування та інтенсивність джерел емісії. З їх урахуванням для правильної оцінки рівня забруднення території, особливо у великих містах, необхідно також аналізувати дію кожної метеорологічної величини окремо.

Вплив вітрових характеристик.

Серед метеорологічних умов значний внесок у динаміку рівня забруднення атмосферного повітря вносять вітрові характеристики (Кіптенко та ін., 2007; Lazaridis, 2011). У міських умовах дію та вплив вітру на вміст забруднювальних речовин розглядають обов'язково з огляду на розташування джерел емісії, їх висоти та інтенсивності надходження забруднювальних речовин (Scorer, 2002; Lazaridis, 2011). Вплив вітру неоднозначний і пояснюється різними факторами: з одного боку, сильні вітри здатні пришвидшувати процеси розсіювання домішок в атмосфері, з іншого боку, за значних швидкостей вітру збільшується кількість ґрунтового пилу та інших видів аерозолі, що піднімаються вітром у повітря (Jacobson, 2002). За умов слабого вітру збільшується роль вертикальних потоків у граничному шарі атмосфери (Безуглая и др., 1983; Lazaridis, 2011). Рівень забруднення в такому разі залежить і від характеристик ЗР, зокрема їхньої температури та ваги (Moller, 2010; Akimoto, 2016).

На даний момент детально вивчено вплив вітру на динаміку ЗР із використанням моделювання їх розповсюдження у конкретний момент часу. За умов наявності повної інформації щодо джерел емісії, рельєфу, забудови, а також швидкості і напрямку вітру сучасні моделі здатні достатньо точно описати розповсюдження домішок (Baklanov et al., 2009; Baklanov et al., 2011). Зовсім інша ситуація виникає за необхідності аналізу впливу вітру на значних часових проміжках. У такому разі основним фактором стає тривалість дії тих чи інших джерел емісії та мінливість характеристик вітру (Безуглая и др., 1983). Аналіз проводиться на осереднених даних, у результаті чого суттєво розширюється спектр факторів, що призвели до формування загального рівня забруднення. Тобто зі збільшенням часового інтервалу, ускладнюється аналіз впливу конкретних метеорологічних характеристик серед усіх процесів (Scorer, 2002).

Одним із процесів, що вивчають тільки на основі осередненої інформації, є великомасштабне перенесення забруднення. Часто високі концентрації шкідливих домішок визначаються саме рівнем транскордонного перенесення та описуються з використанням знань щодо метеорологічних процесів значних часових масштабів, зокрема, сезонних та міжрічних (Суркова, 2002; Jacobson, 2002).

Актуальними, на сьогодні, є дослідження впливу місцевої циркуляції на формування забруднення міст (Jacobson, 2002; Lazaridis, 2011; Liss et al., 2014). Знайдено відмінності у динаміці концентрацій, пов'язаною з вітровим режимом поблизу морських акваторій (Lazaridis, 2011; Liss et al., 2014), великих озер (Jacobson, 2002) та з гірсько-долинними вітрами (Lazaridis, 2011). Основний вплив має перенесення місцевими вітрами первинних ЗР від джерел емісії, з утворенням вторинних ЗР на деякій відстані від таких джерел. Так, у різних районах міста можуть формуватися високі концентрації вторинних ЗР навіть за відсутності у них джерел викидів речовин, що їх утворюють. В умовах місцевих вітрів у горах часто утворюються випадки підвищених концентрацій не у містах, а вище на схилах, створюючи при цьому так звані припідняті шари забруднення (elevated pollution layers) (Jacobson, 2002; Padmakumari et al.,

2013). Подібні шари забруднення сприяють винесенню ЗР у вільну тропосферу, навіть коли загальні метеорологічні умови не є для цього достатньо сприятливими.

Вплив температурних характеристик атмосфери.

Температура повітря та температурна стратифікація атмосфери суттєво визначає умови накопичення домішок та швидкість перебігу хімічних реакцій. У цілому можна розглядати два механізми. Перший пов'язаний із відсутністю хмарності та постійною дією сонячного випромінювання на поверхню Землі. Прогрівання приземного шару зменшує його стабільність, зумовлюючи конвекцію та підняття ЗР разом із повітрям. Більш того, різниця у прогріванні різних частин поверхні зумовлює збільшення швидкостей вітру та дисперсії ЗР. Таким чином, рівень забруднення визначатиметься комплексним впливом температури та вітру. Другий механізм спостерігається за умов радіаційного охолодження поверхні. У такому разі за значної стабільності системи у приземному шарі можуть формуватися температурні інверсії, що унеможливають винесення ЗР та сприяють їх накопиченню (Jacobson, 2002; Lazaridis, 2011). Залежно від інтенсивності прогрівання та температури повітря спостерігаються різні швидкості перебігу хімічних реакцій, інтенсивність емісії біогенних речовин із рослинності, інтенсивності викидів CO із двигунів автомобілів тощо (Jacobson, 2002; Akimoto, 2016).

Температурні інверсії важливі для формування високих рівнів забруднення, утримують ЗР біля земної поверхні, перешкоджаючи їх винесення у вільну тропосферу (Внуков, 1992; Jacobson, 2002; Scorer, 2002; Lazaridis, 2011). Проте сучасні дослідження впливу інверсій на забруднення атмосферного повітря показують неоднозначний вплив та залежність від природи інверсій. Наприклад, інверсії радіаційної природи постійно сприяють затримці ЗР поблизу земної поверхні. При цьому спостерігається підвищення концентрацій саме первинних речовин: аерозолів, CO, NO_x. Такі інверсії не сприятливі до накопичення вторинних ЗР: приземного озону, вторинних аерозолів, тощо. Їх максимума починають спостерігатися після руйнування інверсій та посиленні ступеня хімічної активності атмосфери (Jacobson, 2002;

Akimoto, 2016). Морські інверсії та ті, що утворюються на гірських схилах, визначають стан забруднення виключно з огляду на розташування та висоту джерел емісії ЗР. Фронтальні інверсії не асоціюються з підвищеними рівнями забруднення, у зв'язку з переважаючою роллю процесів розсіювання домішок (Jacobson, 2002; Lazaridis, 2011).

Прогрівання урбанізованих території відбувається швидше, що сприяє формуванню міських островів тепла (Jacobson, 2002). Сьогодні вважається, що збільшення інтенсивності міських островів тепла сприяє зменшенню рівня забруднення атмосферного повітря у зв'язку з більшою товщиною шару активного перемішування повітря та збільшенню приземних швидкостей вітру (Jacobson, 2002; Baklanov et al., 2009).

Вплив вологості атмосферного повітря.

Вплив вологості на рівень забруднення визначається, в першу чергу, через інтенсивність вологого осадження (Moller, 2010; Lazaridis, 2011; Liss et al., 2014). Вологе осадження є комплексним процесом, що складається із трьох механізмів: захоплення ЗР хмарними елементами, з випадінням опадів та виведенням через тумани. Варто зауважити, що моделювання вологого осадження є надзвичайно складним завданням (наприклад, у порівнянні із сухим осадженням), тому прямі виміри інтенсивності вологого осадження можуть давати кращі результати (Moller, 2010). Таким чином, дослідження зв'язку вологості повітря із концентраціями забруднювальних речовин потребують вивчення фактичного матеріалу на основі прямих вимірів. На відміну від сухого осадження, вологе осадження є випадковим. Наприклад, середні потоки речовини із сухим та вологим осадженням у цілому однакові. Проте, враховуючи повторюваність опадів та туманів, кількість речовини, що виводиться під час одномоментного вологого осадження, на порядки перевищує сухе (Moller, 2010; Liss et al., 2014).

Дослідження мінливості забруднювальних речовин різних часових масштабів.

Мінливість ЗР характеризується добовими, тижневими, сезонними та міжрічними коливаннями. При цьому, зі збільшенням часового масштабу, для якого проводиться



аналіз, ускладнюється визначення механізмів формування мінливості.

Для таких забруднювальних речовин, як діоксид азоту, діоксид сірки, тверді частки (particle matter (PM) та оксид вуглецю виявлені добові коливання з періодами 12 і 24 години (Tcherpel et al., 2010). Потужні добові коливання характерні для приземного озону (Sebald et al., 2000). У багатьох міських районах максимальні концентрації приземного озону у вихідні дні не менше ніж на 5% перевищують показники у будні дні (Cerverny et al., 1998; Marr et al., 2002; Fujita et al., 2003; Heuss et al., 2003). Ураховуючи хімічний механізм залежності концентрації приземного озону та NO_x , тижневі цикли повинні спостерігатися і для NO_2 . За допомогою вейвлет-аналізу концентрацій PM та метеорологічними величинами знайдено коливання, близькі до тижневих (Zeri et al., 2011). Існує думка, що наявність циклів близьких до тижневих пов'язана з переважаним впливом погодних умов (зокрема зі зміною синоптичних процесів), а не інтенсивністю автотранспортного навантаження (Zeri et al., 2011).

Сезонні зміни вмісту ЗР зазвичай краще проявляються, ніж міжрічні (Andersson et al., 2007a; Andersson et al., 2007b; Seinfeld et al., 2016). Формування сезонності домішкоу міста часто залежить від внутрішньорічних варіацій граничного шару атмосфери у співвідношенні із джерелами антропогенної емісії (Liu et al., 2015). Тому визначення причин формування максимумів концентрацій (навіть за умови їх співпадіння у часі для різних міст) необхідно проводити для кожного міста окремо з оцінкою викидів поблизу постів спостережень.

Сезонна динаміка NO_2 та SO_2 суттєво відрізняється в різних регіонах (Seinfeld et al., 2006; Martin et al., 2008; Сніжко та ін., 2011; Mulla et al., 2013; Дворецька та ін., 2014; Khokhar et al., 2015; Hagenbjork et al., 2017), а механізми формування такої мінливості залишаються недостатньо вивченими. Для NO_2 найбільший внесок на формування сезонності справляють зміни у спалюванні палива (промисловість та транспорт). Гроза активність, горіння біомаси, мікробіологічна активність у міській атмосфері не є визначальною.

Сезонність CO залежить, у першу чергу, від основного джерела емісії (Koike et al., 2005;

Te et al., 2016). Більш того, знайдено зміщення максимумів концентрацій між граничним шаром та вільною тропосферою. Зазвичай максимуми CO спостерігають впродовж березня – квітня та мінімумами у вересні – жовтні (Koike et al., 2007; Te et al., 2016). У приземному шарі внутрішньорічні зміни зазвичай є результатом антропогенних викидів, тоді як у вільній тропосфері визначальну роль відіграє великомасштабне перенесення повітря та надходження забруднення з віддалених джерел викидів. У регіонах, де основним джерелом є горіння біомаси, не спостерігається різниця сезонного ходу у граничному шарі та вільній тропосфері (Te et al., 2016).

Порівняльний аналіз забруднення атмосферного повітря формальдегідом у холодний і теплий періоди року показав перевищення його вмісту в теплий період (Бургаз та ін., 2012; Leuchner et al., 2016). Значна сезонна варіативність формальдегіду є результатом дії багатьох факторів, серед яких – вплив рельєфу, перемішування повітря у граничному шарі атмосфери, адвекція повітря відносно до джерел емісії, та місцеві метеорологічні умови (Leuchner et al., 2016).

Міжрічна мінливість ЗР може бути пов'язана із міжрічною мінливістю загальних метеорологічних умов території або з мінливістю окремих процесів, що визначають умови накопичення, хімічних трансформацій та виведення домішок (Abbot et al., 2003; Liu et al., 2005; Wang et al., 2012; Lin et al., 2013; Zhang et al., 2015; Schiferl et al., 2016; Hakan et al., 2016; Hou et al., 2016; Pawar et al., 2017; Leung et al., 2018). У першому випадку, коли спостерігається зміна кліматичних умов території, мінливість ЗР буде узгоджуватися з комплексом метеорологічних характеристик та мати відповідні часові масштаби (Liu et al., 2005; Hakan et al., 2016). У другому випадку зв'язок буде проявлятися лише із окремими метеорологічними характеристиками або фізико-хімічними процесами (Abbot et al., 2003; Schiferl et al., 2016; Pawar et al., 2017).

Загалом міжрічна мінливість ЗР складає близько 3% для приземного озону, 5% для NO_2 , 9% для PM. Міжрічні варіації нітрогеновмісних та сульфуровмісних сполук, пов'язаними із механізмами сухого осадження складають 6-9%, та з процесами вологого осадження – до

20%. На сьогодні знайдено позитивні тренди сухого осадження. У південній та західній Європі виявлено негативні тренди вологого осадження, що сприятиме зменшенню частки ЗР, які виводяться із дощем та туманами (Andersson et al, 2007a; Andersson et al, 2007b). Загальне підвищення відносної вологості на території сприяє утворенню гідроксильного радикалу та окислення SO_2 (Schiferl et al., 2016).

В останні кілька десятиріччів спостерігаються тенденції до збільшення числа екстремальних метеорологічних явищ, пов'язаних із забрудненням повітря, особливо в континентальних регіонах. Підтверджено, що збільшення повторюваності температурних інверсій в зимовий час підвищують ймовірність забруднення більш ніж у два рази (Hou et al, 2016).

Сильні вітри та інтенсивність перемішування у граничному шарі має важливий «вентиляційний» ефект для пилу (Wang et al., 2012; Zhang et al, 2015; Leung et al., 2018). За допомогою вейвлет-аналізу в роботі (Shaharuddin et al., 2008) вивчався взаємозв'язок між твердими частинками та швидкістю вітру, температурою повітря, кількістю опадів, було встановлено, що низькочастотні спектри метеорологічного ряду мають високі значення взаємозв'язку з PM_{10} , в той час як високочастотні суттєвого зв'язку не показали.

На основі спектральних методів статистичного аналізу були виявлені характерні періоди міжрічних коливань концентрацій PM_{10} (тверді частки діаметром менше 10 мкм), оксиду вуглецю, оксидів азоту (NO_x) і оксидів сірки (SO_x) (Kandlikar, 2007). Максимуми у спектрі коливань знаходяться в межах 1–2 років.

Розвиток знань щодо взаємодії хімічного складу атмосферного повітря та кліматичних змін зумовило появу наукового напрямку, що отримав назву хімічна кліматологія (Moller, 2010). Це відносно новий напрямок досліджень, в якому сьогодні найбільша увага приділена двом аспектам: парниковим газам, як можливій вагомій причині кліматичних змін, та забрудненню атмосферного повітря, що прямим чином впливає на якість життя населення. Розвиток хімічної кліматології, тобто знань щодо взаємодії хімічних речовин з кліматичними змінами, важливі для людства. Довготерміновий прогноз вмісту ЗР в атмосфері важливий з огляду на тісну взаємодію фізичної та

хімічної систем (Moller, 2010). Більшого, стратегії розвитку та зменшення викидів ЗР потребують багатьох років та навіть десятиріч, для того щоб отримати видимий ефект. У глобальному плані особливо актуальними вважаються дослідження наступних зв'язків ЗР із метеорологічними величинами на значних часових проміжках: атмосферний аерозоль – сонячна радіація і температура повітря, концентрації газових складових – вологість повітря, хімічні реакції – хмарність, вологе осадження – опади, осідання ЗР – характеристики вітру (Moller, 2010; Lazaridis, 2011).

Перспективні напрямки досліджень в Україні.

В Україні постійно проводять дослідження стану забруднення атмосферного повітря (Кіптенко та ін., 2007; Лоева та ін., 2008; Шевченко та ін., 2008; Сніжко та ін., 2011; Івус и др., 2012; Турос та ін., 2012; Баштаннік та ін., 2014; Дворецька та ін., 2014). Проте багато питань залишаються відкритими, зокрема питання залежності концентрацій ЗР та фонового забруднення міст від кліматичних змін, вітрового режиму території та загального збільшення повторюваності штилю або сильного вітру, що визначатимуть сприятливість умов розсіювання та накопичення домішок.

Незважаючи на велику кількість досліджень за кордоном, в Україні мало уваги приділено вивченню впливу місцевих вітрів на формування загального фонового забруднення міст. Адже знайдені залежності зв'язку забруднення із метеорологічними величинами (Кіптенко та ін., 2007; Шевченко та ін., 2008; Івус и др., 2012; Баштаннік та ін., 2014) можуть мати суттєві відмінності в містах прибережних територій та розташованих поблизу Карпатських гір.

Для оцінки небезпечності природних умов території до накопичення домішок часто використовуються параметри або коефіцієнти, що характеризують ступінь вертикального та горизонтального розсіювання та його залежність від температурної стратифікації (Безуглая и др., 1983; Внуков, 1992). Обчислення подібних коефіцієнтів виконуються для окремих фізико-географічних зон та потребують детального попереднього аналізу осереднених характеристик забруднення, разом із залежністю осереднених концентрацій від кліматичних характеристик території.



Урахування осереднених показників забруднення міста є обов'язковим під час планування та експлуатації енергетичних об'єктів промисловості. Для цього обчислюють значення фонових концентрацій для кожного окремого міста. Ці показники враховують залежність від характеристик вітру, серед яких основним є напрямок. Більш того, для визначення висоти труби будь-якого промислового об'єкта рекомендовано використовувати осереднені концентрації по місту (що вважаються фоновими) з огляду на швидкість та напрямок вітру, перерахованих на висоту 100 м. (Внуков, 1992). Враховуючи сучасні кліматичні зміни та мінливість вітрового режиму території (Клімат України, 2003), існує потреба в перерахунку таких показників фонових концентрацій для міст України, що можливо виконати тільки на основі отриманні оновленої інформації щодо зв'язку рівня забруднення кожного окремого міста із характеристиками вітру.

Недостатня точність моделювання вологого осадження (Moller, 2010; Liss et al, 2014) потребує проведення досліджень залежності ЗР від вологісних характеристик на фактичному вимірному матеріалі.

Важливим в Україні є розвиток хімічної кліматології, для розуміння динаміки хімічних складових частин атмосфери на різних часових проміжках в умовах кліматичних змін та можливості на регіональному рівні відділити внесок природних та антропогенних чинників у формування тієї чи іншої концентрації.

Висновки з проведеного дослідження.

У сучасний період дослідження механізмів впливу метеорологічних умов на внутрішньорічну та міжрічну динаміку ЗР спрямовані на вирішення прикладних завдань довготермінового планування розвитку території. Фундаментальні дослідження спрямовані переважно на вивчення великомасштабного перенесення, впливу локальної циркуляції та покращенні модельних схем вологого осадження. Вивчення сезонної та міжрічної мінливості ЗР при цьому стає потужним додатковим інструментом до розуміння умов накопичення та виведення домішок в атмосферу.

Перспективними в Україні можуть стати дослідження впливу місцевих вітрів на формування загального фонового забруднення міст прибережних територій та розташованих

поблизу Карпатських гір; обчислення параметрів, що характеризують ступінь вертикального та горизонтального розсіювання домішок для окремих фізико-географічних зон; планування та експлуатація об'єктів промисловості; дослідження в галузі хімічної кліматології.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Баштаннік, М.П., Жемера, Н.С., Кіптенко, Є.М., Козленко, Т.В. (2014). Стан забруднення атмосферного повітря над територією України. Наукові праці УкрНДГМІ. 2014. Вип. № 266. С. 70–93. [Bashtannik, M., Zhemera, N., Kiptenko, E., Kozlenko, T. (2014). Air pollution state the territory of Ukraine. Scientific papers of UkrGMI. Vol.266, 70–93 (in Ukrainian)].
2. Баштаннік, М.П., Дворецька, І.В., Онос, Л.М., Савенець, М.В. (2016). Основні засади виділення зон якості атмосферного повітря на території України та їх класифікація згідно з вимогами директив 2004/107/ЄС та 2008/50/ЄС. *Наукові праці УкрНДГМІ*. Вип. 269 С. 123–137. [Bashtannik, M.P., Dvoretzka, I.V., Onos, L.M., Savenets, M.V. (2016). Basic principles of air quality zone's establishment in Ukraine according to the Directive 2004/107/EC and 2008/50/EC. Scientific papers of UkrGMI. Vol. 269, P.123-137 (in Ukrainian)].
3. Безуглая, Э.Ю., Берлянд, М.Е. Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосферу. Ленинград : Гидрометеоздат, 1983. 328 с. [Bezuglaya, E.Yu., Berlyand, M.E. (1983). Climatic characteristics of the conditions of impurity propagation in the atmosphere: reference book]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 328 p. (in Russian)].
4. Бургаз, О.А., Гарабажій, Т.А. (2012) Забруднення атмосфери над територією Європи формальдегідом. *Український гідрометеорологічний журнал*. № 10. С. 20–27. [Burgaz, A., Garabagii, T. Contamination of atmosphere above European territory by formaldehyde. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*. Vol. 10. 20–27].
5. Внуков, А.К. (1992). Защита атмосферы от выбросов энергообъектов. Москва: Энергоатомиздат. 176 с. [Vnukov, A. (1992). Sewn up the atmospheres from emissions of power facilities. Moscow, Energoatomizdat. 176 p. (in Russian)].
6. Дворецька, І.В., Савенець, М.В., Савченко, В.М. (2014). Основні характеристики сезонно-широтного розподілу діоксиду азоту над територією України за даними наземних та супутникових спостережень. *Фізична географія та геоморфологія*. № 4(76). С. 81–85. [Dvoretzka, I., Savenets, M., Savchenko, V. (2014). The main characteristics of nitrogen dioxide seasonal-latitude's distribution over the territory of Ukraine by ground-based and satellite measurements data. *Physical geography and geomorphology*. Vol. 4(76), 81–85 (in Ukrainian)].
7. Ивус, Г.П., Хоменко, Г.В., Семергей-Чумаченко, А.Б., Гурская, Л.М. (2012). Метеорологические и синоптические условия загрязнения атмосферного воздуха города Одеса. *Український гід-*

- рометеорологічний журнал. 2012. № 10. С. 28–35. [Ivus, G., Homenko, G., Semergei-Chumachenko, A., Gurscaia, L. (2012). Meteorological and synoptic conditions of atmospheric air pollution in Odessa city. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*. Vol. 10, P. 28–35 (in Ukrainian)].
8. Кіптенко, Є.М., Козленко, Т.В. (2007). Вплив метеорологічних умов забруднення повітря у промислових містах України. *Гідрологія, гідрохімія і гідро екологія*. 2007. № 13. С. 208–216. [Kiptenko, E., Kozlenko, T. (2007). Influence of meteorological conditions of air pollution in industrial cities of Ukraine. *Hidrolohiiia, hidrokhiimia i hidroekolohiia*. Vol. 3, P. 208–216. (in Ukrainian)].
9. Клімат України / За редакцією Ліпінського, В.М., Дячука, В.А., Бабіченко, В.М. (2003). Київ, 2003. 343 с. [Climate of Ukraine. Lipinsky, V. M., Dyachuk, V. A., Babichenko, V. M.. (2003). Kyiv. 343 p. (in Ukrainian)].
10. Лоева, І.Д., Владимірова, О.Г., Верлан, В.А. (2008). Оцінка стану забруднення атмосферного повітря великого міста: методи аналізу, прогнозу, регулювання. Монографія. Київ : КНТ, 220 с. [Loieva, I.D., Vladymyrova, O.G., Verlan, V.A. (2008). Estimation of the state of air atmosphere pollution of the big city (methods of analysis, forecast, regulations). K., 220 p. (in Ukrainian)].
11. Сніжко, С.І., Шевченко, О.Г. (2011). Урбо-метеорологічні аспекти забруднення атмосферного повітря великого міста. Київ, Обрії, 2011. 297 с. [Snizhko, S.I., Shevchenko, O.H. (2011). Meteorological aspects of air pollution of urban areas. Kyiv. 297 p. (in Ukrainian)].
12. Суркова, Г.В. Химия атмосферы. Москва : Изд-во Моск. ун-та, 2002. 210 с. [Surkova, G.V. (2002). Chemistry of the atmosphere. Moscow: Moscow University Press, 210 p. (in Russian)].
13. Турос, О.І., Петросян, А.А., Ананьева, О.В., Картавец, О.М., Загородній, В.В. Порівняльний аналіз ризику для здоров'я населення від викидів промислових підприємств різних галузей народно-господарської діяльності. ENVIRONMENT, HEALTH. 2012. № 4. С. 34–38. [Turos, O.I., Petrosian, A.A., Ananyeva, O.V., Kartavtsev, O.M., Zagorodny, V.V. (2012) Comparative analysis of health risks related to emissions of industrial enterprises of different types. ENVIRONMENT, HEALTH № 4. С. 34–38 (in Ukrainian)].
14. Шевченко, О.Г., Сніжко, С.І. Вплив напрямку та швидкості вітру на рівень забруднення атмосферного повітря міста Києва. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2008. № 3. С. 33–38. [Shevchenko, O., Snizhko, S. (2008). The influence of wind direction and wind speed on the atmosphere pollution level in Kiev city. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*. Vol. 3, P. 33–38 (in Ukrainian)].
15. Abbot, Dorian S., Paul I. Palmer, Randall V. Martin et al. (2003). «Seasonal and Interannual Variability of North American Isoprene Emissions as Determined by Formaldehyde Column Measurements from Space». *Geophys. Res. Lett.* 30(17). p.1886, DOI: 10.1029/2003gl017336 (дата звернення: 05.04.2020).
16. Akimoto, H. Atmospheric Reaction Chemistry. Asakura Publishing, Springer. 2016. 448 p.
17. Andersson, C., Langner, J., Bergstroumm, R. (2007a). Interannual variation and trends in air pollution over Europe due to climate variability during 1958–2001 simulated with a regional CTM coupled to the ERA40 reanalysis. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 59:1, 77–98 p.
18. Andersson, C., Langner, J. (2007b). Inter-annual variations of ozone and nitrogen dioxide over Europe during 1958–2003 simulated with a regional CTM. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus* 7, 15–23 p. DOI: 10.1007/s11267-006-9088-4 (дата звернення: 05.04.2020).
19. Baklanov, A., Mahura, A., Sokhi, R. (2011). Integrated Systems of Meso-Meteorological and Chemical Transport Models. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 260 p.
20. Baklanov, A., Grimmond, S., Mahura, A., Athanassiadou, M. (2009). Meteorological and Air Quality Models for Urban Areas. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 181 p.
21. Cerveny, R., Balling, R. (1998). Weekly cycles of air pollutants, precipitation and tropical cyclones in the coastal NW Atlantic region. *Nature*, 394(6693),561-563. DOI: 10.1038/29043 (дата звернення: 05.04.2020).
22. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. Official Journal of the European Union, L 152/1.
23. Directive 2004/107/EC of the European Parliament and of the Council of 15 December 2004 relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air. Official Journal of the European Union, L 23/3.
24. Fujita, E.M., Campbell, D.E., Zielinska, B. et al. (2003). Diurnal and weekday variations in the source contributions of ozone precursors in California's South Coast Air Basin. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 53:844–863. DOI: 10.1080/10473289.2003.10466226 (дата звернення: 05.04.2020).
25. Hagenbjork, A., Malmqvist, E., Mattisson, K., et al. (2017). The spatial variation of O₃, NO, NO₂ and NO_x and the relation between them in two Swedish cities. In *Environ. Monit. Assess.* 189(4). 161 p.
26. Hakan, P., Grundström, M., Karlsson, G. Pihl et al. (2016). A method to assess the inter-annual weather-dependent variability in air pollution concentration and deposition based on weather typing. *Atmospheric Environment*. Volume 126, pp. 200–210. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.11.05 (дата звернення: 05.04.2020).
27. Heuss, J. M., Kahlbaum, D.F., Wolff, G.T. (2003). Weekday/weekend ozone differences: What can we learn from them? *J. Air Waste Manage. Assoc.* 53:772–788. DOI: 10.1080/10473289.2003.10466227 (дата звернення: 05.04.2020).
28. Hou, P., Wu, S. (2016). Long-term Changes in Extreme Air Pollution Meteorology and the Implications for Air Quality. *Sci. Rep.* 6, 23792. DOI: 10.1038/srep23792 (дата звернення: 05.04.2020).



29. Jacobson, M. (2002). Atmospheric pollution. History, science and regulation. New York : Cambridge University Press, 2002. 412 p.
30. Kandlikar, M. (2007). Air pollution at a hotspot location in Delhi: detecting trends, seasonal cycles and oscillations. *Atmospheric Environment*, 41, 5934–5947.
31. Khokhar, M., et al. (2015). Detection of Trends and Seasonal Variation in Tropospheric Nitrogen Dioxide over Pakistan. In *Aerosol and Air Quality Research*, 15, pp. 2508–2524.
32. Koike, M., Jones, N.B., Palmer, P.I. et al. (2006) Seasonal variation of carbon monoxide in northern Japan: Fourier transform IR measurements and source-labeled model calculations. *JGR: Atmospheres*. Volume 111, Issue D15. DOI: 10.1029/2005JD006643 (дата звернення: 05.04.2020).
33. Lazaridis, M. (2011). *First Principles of Meteorology and Air Pollution*. Springer Science + Business Media P.V. 373 p.
34. Leuchner, M., Ghasemifard, H., Lüpke, M. et al. (2016). Seasonal and Diurnal Variations of Formaldehyde and its Meteorological Drivers at the GAW Site Zugspitze. *Aerosol and Air Quality Research*. 16, pp. 801–815.
35. Leung, D. M., Tai, Amos P. K., Mickley, L. J. et al. (2018). Synoptic meteorological modes of variability for fine particulate matter (PM_{2.5}) air quality in major metropolitan regions of China. *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 6733–6748, <https://doi.org/10.5194/acp-18-6733-2018> (дата звернення: 05.04.2020).
36. Lin, J., Pan, D., Zhang, X. (2013). Trend and Interannual Variability of Chinese Air Pollution since 2000. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*. Volume 6, Issue 2, pp. 84–89.
37. Liss, P.S., Johnson, M.T. (2014) *Ocean-Atmosphere Interaction of Gases and Particles*. Springer Heidelberg. 366 p.
38. Liu, J., Mauzerall, D., Horowitz, L. (2005). Analysis of seasonal and interannual variability in transpacific transport. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, D04302.
39. Liu, Z.R., Hu, B., Wang, L.L et al. (2015).: Seasonal and diurnal variation in particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) at an urban site of Beijing: analyses from a 9-year study, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 22, P. 627–642, <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3347-0> (дата звернення: 05.04.2020).
40. Marr, L.C., Harley, R.A. (2002). Spectral analysis of weekday-weekend differences in ambient ozone, nitrogen oxide, and non-methane hydrocarbon time series in California. *Atmos. Environ.* 36:2327–2335. DOI: 10.1016/S1352-2310(02)00188-7 (дата звернення: 05.04.2020).
41. Martin, M. Val., Honrath, R. E., Owen, R. C. et al. (2008). Seasonal variations of nitrogen oxides in the central North Atlantic lower free troposphere. In *Journal of Geophysical Research JGR: Atmospheres*, 113, D17307, DOI: 10.1029/2007JD009688 (дата звернення: 05.04.2020).
42. Moller, D. (2010). *Chemistry of the Climate System*. Walter de Gruyter GmbH & Co, Berlin. 741 p.
43. Mulla, E.F., Totoni, R., Prifti, L. (2013). Seasonal variation of NO₂ and SO₂ concentrations in Tirana's Air. In *J. Int. Environmental Application & Science*, Vol. 8. P. 272-279.
44. Padmakumari, B., Maheskumar, R.S., Morwal, S.B. et al. (2013) Aircraft observations of elevated pollution layers near the foothills of the Himalayas during CAIPEEX-2009. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Vol. 139, pp. 625–638.
45. Pawar, V.S., Domkawale, M.A., Pawar, S.D. et al. (2017). Inter annual variability of tropospheric NO₂ and tropospheric ozone over Maharashtra (India): the role of lightning. *Remote Sensing Letters*. Vol. 8, 2017, Issue 11, pp. 1015–1024.
46. Schiferl, L.D, Heald, C.L., Damme, M.V. et al. (2016). Interannual variability of ammonia concentrations over the United States: Sources and implications. *Atmospheric Chemistry and Physics*. Vol. 16 (18), pp. 12305-12328.
47. Scorer, R.S. (2002). *Air pollution meteorology*. Woodhead Publishing. 153 p.
48. Sebald, L., Treffeisen, R., Reimer, E. et al. (2000). Spectral analysis of air pollutants. Part 2: ozone time series, *Atmos. Environ.*, 34, 3503–3509.
49. Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2006) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York.
50. Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to climate Change*, 3rd Edition, New York: Wiley, 1152 p.
51. Shaharuddin, M., Zaharim, A., Jailani, M. et al. (2008) Application of wavelet transform on airborne suspended particulate matter and meteorological temporal variations/ *Wseas Transactions on Environment and Development*. Issue № 2, Volume 4, February 2008, 89–98.
52. Tchepel, O., Borrego, C. (2010). Frequency analysis of air quality time series for traffic related pollutants. *Journal of environmental monitoring : JEM*. 12. 544-550. DOI: 10.1039/b913797a (дата звернення: 05.04.2020).
53. Te, Y., Jeseck, P., Franco, B. et al. (2016). Seasonal variability of surface and column carbon monoxide over the megacity Paris, high-altitude Jungfraujoch and Southern Hemispheric Wollongong stations. *Atmos. Chem. Phys.*, Vol.16 (17), 10911–10925. DOI: 10.5194/acp-16-10911-2016 (дата звернення: 05.04.2020).
54. Wang, L. Xu, J., Yang, J. et al. (2012). Understanding haze pollution over the southern Hebei area of China using the CMAQ model. *Atmospheric Environment* 56, 69–79.
55. Zeri, M., Oliveira-Junior, J.F. Lyra, G.B. (2011). Spatiotemporal analysis of particulate matter, sulfur dioxide and carbon monoxide concentrations over the city of Rio de Janeiro, Brazil, *Meteorol. Atmos. Phys.* 113 (2011) 139– 152. DOI: 10.1007/s00703-011-0153-9 (дата звернення: 05.04.2020).
56. Zhang, Y. L., Cao, F. (2015). Fine particulate matter (PM_{2.5}) in China at a city level, *Sci. Rep.*, 5, 1–11. DOI: 10.1038/srep14884 (дата звернення: 05.04.2020).

Стаття надійшла до редакції 15.04.2020

The article was submitted for publication on 15.04.2020