

УДК: 504.1.064.104

Д.В. Доровський

DOI: 10.36919/2312-7812.1.2022.107

## МОНІТОРИНГ МЕРЕЖІ ПОСТІВ КОНТРОЛЮ ДЖЕРЕЛ ЗАБРУДНИКІВ ПОВІТРЯ

Постановка задачі аналізу структури мережі моніторингу та розміщення стаціонарних постів. Моніторинг стаціонарних джерел забруднювача частково може проводитися з використанням стаціонарних постів контролю стану повітря. У зв'язку з високою вартістю впровадження та експлуатації таких постів, а також стохастичним характером поширення домішки в атмосфері ефективність роботи групи стаціонарних постів регіону істотно залежить від розташування їх у просторі. Необхідною умовою успішного проведення заходів щодо зниження концентрації шкідливих викидів у навколишнє середовище та робіт з охорони чистоти атмосфери є контроль стану атмосферного повітря, що дає об'єктивну оцінку працездатності та ефективності всієї діяльності запобігати забрудненню навколишнього середовища. Сформульовано завдання аналізу структури мережі стаціонарних постів спостереження атмосферного повітря з метою підвищення якості поінформованості про забруднення за мінімальних витрат. Вперше запропоновано метод розміщення мережі постів спостереження, заснований на відомих моделях розсіювання домішки в атмосфері, теорії про регіоналізовану змінну та методи кригінгу для отримання адекватних оцінок про викиди стаціонарних техногенних джерел емісії домішки.

Setting the task of analyzing the structure of the monitoring network and placement of stationary posts. Monitoring of stationary pollutant sources can be partially carried out using stationary air condition monitoring stations. In connection with the high cost of implementation and operation of such stations, as well as the stochastic nature of the spread of impurities in the atmosphere, the efficiency of the group of stationary stations in the region depends significantly on their location in space. A necessary condition for the successful implementation of measures to reduce the concentration of harmful emissions into the environment and work to protect the purity of the atmosphere is the control of the state of the atmospheric air, which provides an objective assessment of the efficiency and effectiveness of all activities related to the prevention of environmental pollution. The task of analyzing the structure of the network of stationary atmospheric air monitoring stations was formulated in order to improve the quality of awareness about pollution at minimal costs. For the first time, a method of placing a network of observation posts is proposed, based on known models of impurity dispersion in the atmosphere, the theory of a regionalized variable, and kriging methods to obtain adequate estimates of the emissions of stationary man-made sources of impurity emission.

Ключові слова: моніторинг, мережа постів контролю, джерела забрудників повітря.

Key words: monitoring, network of control posts, sources of air pollutants.

**Постановка проблеми.** Постановка задачі аналізу структури мережі моніторингу та розміщення стаціонарних постів. Моніторинг стаціонарних джерел забруднювача частково може проводитися з використанням стаціонарних постів контролю стану повітря. У зв'язку з високою вартістю впровадження та експлуатації таких постів, а також стохастичним характером поширення домішки в атмосфері ефективність роботи групи стаціонарних постів регіону істотно залежить від розташування їх у просторі. З одного боку необхідно вибрати таку кількість постів та їх розміщення, щоб протягом часу нормування спостережень ймовірність виявлення концентрацій викидів, що перевищують ГДК, була не менше встановленого довірчого інтервалу (зазвичай обирають 95% ймовірність виявлення для сукупності стаціонарних постів), з іншого боку вартість експлуатації всіх постів протягом часу нормування не повинна перевищувати очікуваної шкоди від детермінованих джерел забруднення, інакше використання таких постів є економічно недоцільним [1]. Метою досліджень було розроблення оптимізаційного моніторингу мережі постів контролю джерел забруднювачів повітря промислових підприємств. Постановка задачі. Нехай  $m$  присутніх джерел викидів розміщено у різних точках  $P_1, P_2, \dots, P_m$  простору, а  $n$  стаціонарних постів спостереження – у точках  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . Позначимо витрати на забезпечення роботи одного стаціонарного посту через  $c_{ij}$ . Нехай також на досліджуваному просторі задана мінімально допустима можливість виявлення викидів мережею стаціонарних постів  $r_{\min}$ . Тоді багатоелементна задача розміщення може бути сформульована як завдання вибору додаткових постів і такого їх розташування в точках виділеного простору, при якому будуть виконані такі умови: Інтегральна ймовірність виявлення забруднення групою стаціонарних постів повинна бути не меншою за встановлене значення  $r_{\min}$  (зазвичай 0.95):  $p \geq r_{\min}$ ; розташування стаціонарних постів у місцях найбільш ймовірного виявлення викиду з урахуванням троянди вітрів, характерної для даної місцевості, для багатьох стаціонарних місць викиду має бути таким, щоб усі джерела забруднювачів були представлені максимальним чином; інтегральна експлуатаційна вартість всіх  $N$  постів стаціонарного спостереження має перевищувати сумарний очікуваний збиток від аналізованих стаціонарних джерел забруднювачів: Експлуатаційна вартість стаціонарних постів спостереження протягом часу нормування визначається на основі техніко-економічного аналізу, а очікувані збитки регламентовані вартістю квоти викидів та розміром штрафних санкцій їх перевищення. Через те, що величина перевищення квоти на прогнозований період невідома, допускається приймати її рівною розміру перевищень за попередній звітний період. Понад квотовані викиди від стаціонарних джерел для прогнозованого періоду можна віднести до стохастичної компоненти забруднювачів. Як вихідні дані для аналізу наявної структури мережі моніторингу лише на рівні території необхідна така інформація: план території; просторовий розподіл промислових підприємств (із зазначенням типу, технологій, що потенційно призводять до значних викидів забруднювальних речовин, та чинних засобів контролю викидів); дані про параметри та викиди з усіх значних точкових джерел забруднення та основних розосереджених джерел; шляхи проходження та інтенсивність основних транспортних потоків; топографічні та метеорологічні дані, з якими можуть бути пов'язані розсіювання викидів та перенесення забруднення; просторовий розподіл густини населення, що проживає на даній території; основні характеристики населення різних територій, включаючи стан здоров'я, розподіл за віком тощо.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Методика раціонального розташування стаціонарних постів спостереження. Методика розміщення стаціонарних постів складається з 3 самостійних пов'язаних один з одним частин, спрямованих на послідовне звуження зони пошуку найкращих місць розміщення та базується на використанні різних підходів, що забезпечують: визначення зони можливого перевищення гранично допустимих концентрацій домішок; моделювання розподілу концентрацій забруднювачів у приземному шарі повітря; визначення місць розміщення постів виходячи з розрахунків просторової мінливості забруднень. Визначення зони можливого перевищення гранично допустимих концентрацій домішок [2].

Для моніторингу викидів в атмосферу забруднювачів від стаціонарних промислових джерел з відомими характеристиками викидів необхідно визначити простір для якого можливе перевищення гранично допустимих концентрацій домішок (рис. 1). Таку інформацію можна отримати шляхом попереднього моделювання викидів з використанням відомих моделей розсіювання домішки в атмосфері, адекватних аналізованим процесам викидів, характерних для аналізованих стаціонарних техногенних джерел емісії домішки. До таких моделей можна віднести Гауссові моделі розсіювання нейтральних та важких газів.

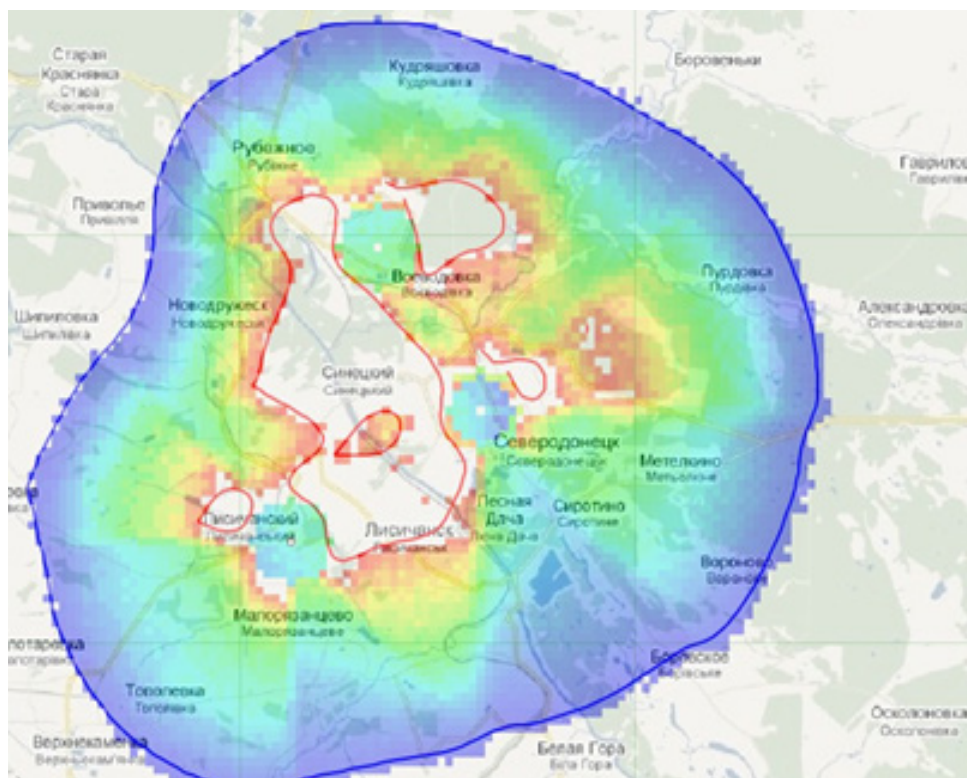


Рис. 1. Зона можливого перевищення гранично допустимих концентрацій домішок

Моделювання розсіювання від стаціонарних джерел дозволяє визначити масив розподілу максимальних концентрацій  $cm(x, y, z)$  у просторі у районі дії джерела забруднення. Вхідні дані наведених методик містять незалежних (спільних) стохастичних показників погодних умов та продуктивності джерела (швидкість вітру, клас стабільності атмосфери, напрям вітру, потужність джерела та ін.). Поєднання кількісних значень стохастичних показників визначають можливість реалізації розподілу концентрацій у просторі:

$$x \in [x_{\min}, x_{\max}]; y \in [y_{\min}, y_{\max}]; z \in [z_{\min}, z_{\max}] \quad (1)$$

де  $x_{\min}$ ,  $x_{\max}$  - максимальна та мінімальна координата зони визначення концентрацій по осі;

$y_{\min}$ ,  $y_{\max}$  - максимальна та мінімальна координата зони визначення концентрацій по осі  $y$ ;

$z_{\min}$ ,  $z_{\max}$  - максимальна та мінімальна координата зони визначення концентрацій по осі  $z$ ;

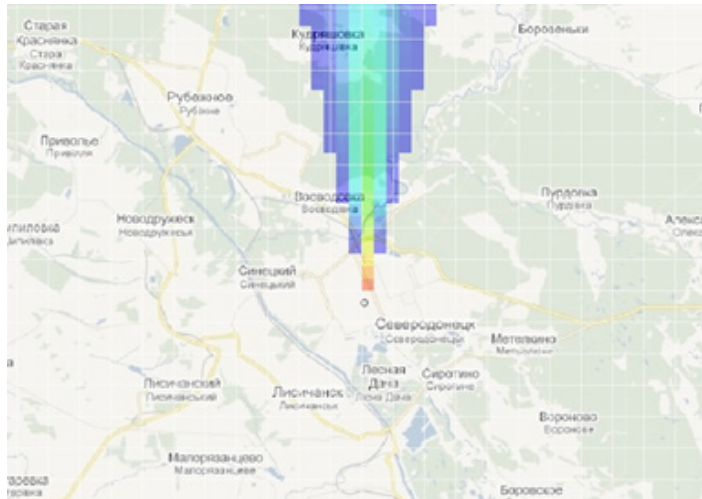
Через війну моделювання отримуємо масив  $cm(x, y, x)$  з урахуванням троянди вітрів цієї місцевості. Тоді можна виділити простір, у якому концентрація перевищує гранично допустиме значення. У межах цього простору потрібно проводити виміри. Визначення просторової мінливості забруднення.

Для отримання інформації про очікувані концентрації забруднювачів використовуються відомі моделі поширення домішки в атмосфері від стаціонарних джерел, за допомогою яких обчислюється просторово-часовий розподіл концентрації домішки за умов викиду для заданого джерела забруднюючої домішки.

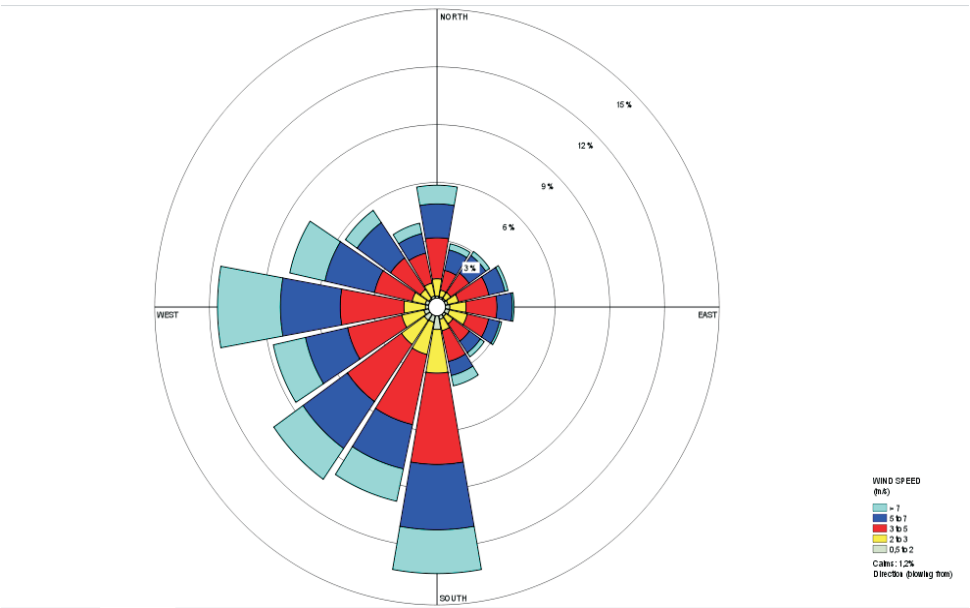
На рис. 2 відображається моделюється розподіл максимальних концентрацій забруднювача при викиді від окремого стаціонарного джерела забруднення, що перевищують ГДК (гранично допустимої концентрації для обраного для моніторингу речовини небезпечної домішки).

Модель дисперсії домішки в атмосфері відома та представлена в роботах, а також програмних кодах ЕФФЕКТ, АЛОНА, RIZEX-2 та інших. Вхідні дані для моделювання розподілу концентрацій у просторі є стохастичними ( $b_u$ ): напрям вітру; швидкість вітру; стабільність атмосфери (інверсія, конвекція, ізотермія); потужність джерела забруднення та інших. Кожен стохастичний  $i$ -й параметр характеризується ймовірністю перебування у межах діапазонів його зміни. Будь-який набір можливих вхідних параметрів виключає прояв іншого набору, отже, об'єднується з логічного зв'язку «що виключає АБО». Це означає, що за наявності вектора фазових змінних вхідних даних для кожного джерела, їх значення розподіляються з різною ймовірністю діапазонів повного набору значень. Метеорологічні дані, властиві цій місцевості характеризуються «трояндою вітрів». Троянда вітрів, побудована за реальними даними спостережень, дозволяє за довжиною променів збудованого багатокутника виявити ймовірність напрямків вітру, а також ймовірність швидкості на висоті 10 метрів.

На рис. 3 представлена діаграма для 16 секторів напрямів вітру. Існують дані для 4, 8 та 16 секторів. Найбільш поширені дані для 8 секторів, але краще для 16.



**Рис. 2.** Розподіл максимальних концентрацій (вище ГДК) від одного джерела забруднювача за заданих погодних умов.



**Рис. 3.** Троянда вітрів для обраної місцевості.

Дані в таблиці, число секторів та класів вітру редагується та задається відповідно до доступних дослідників даних. Рекомендується використовувати фіксоване, наведене в таблиці число діапазонів швидкостей вітру. При швидкості вітру понад 7 м/с інтенсивність розсіювання хмари досить висока, і загроза від нього суттєво зменшується. Дані для троянди вітрів можна отримати безпосередньо з метеорологічних даних або провести виміри (збирати дані інших вимірів) та обробити їх для наповнення таблиць за результатами спостережень наступним способом: фіксувати усереднені швидкості та напрямки вітру протягом часу усереднення для кожного окремого виміру (час усереднення, наприклад, Приймати рівним 1 годині). Чим більша кількість вимірів буде проведено протягом часу визначення троянди вітрів, тим точніший результат буде отримано. Рекомендується проводити щоденні виміри у різний час доби протягом чотирьох – п'яти років;

Троянда вітрів будується на підставі даних вимірювань, отриманих протягом певного періоду та представлені в табличному вигляді (табл. 1). сортувати отриманий масив швидкостей за зростанням та обчислити масив, що зберігає значення числа вимірів, для яких значення швидкостей вітру потрапляли у зазначені діапазони. Можна прийняти ймовірність відповідної швидкості вітру як, де - Число вимірів, що потрапляють у відповідний -й діапазон швидкостей (відповідно до таблиці 1), - Загальна кількість вимірів; провести аналогічну обробку результатів для напрямів вітрів, розрахувавши ймовірність того, що напрямок вітру потрапить у відповідний діапазон значень, отримати масив ймовірностей напрямків вітру як, де - число вимірів, що потрапляють у відповідний діапазон напрямків (відповідно до таблиці 1), - загальна кількість вимірів.

Таблиця 1

Дані троянди вітрів

|    | Directions /<br>Wind Classes (m/s) | 0,5 - 2 | 2 - 3 | 3 - 5 | 5 - 7 | >= 7 | Total |
|----|------------------------------------|---------|-------|-------|-------|------|-------|
| 1  | 348,75 - 11,25                     | 9       | 78    | 185   | 152   | 84   | 508   |
| 2  | 11,25 - 33,75                      | 8       | 30    | 91    | 94    | 28   | 251   |
| 3  | 33,75 - 56,25                      | 8       | 31    | 107   | 96    | 22   | 264   |
| 4  | 56,25 - 78,75                      | 13      | 51    | 148   | 78    | 15   | 305   |
| 5  | 78,75 - 101,25                     | 21      | 77    | 147   | 73    | 8    | 326   |
| 6  | 101,25 - 123,75                    | 20      | 87    | 104   | 53    | 10   | 274   |
| 7  | 123,75 - 146,25                    | 12      | 40    | 96    | 63    | 22   | 233   |
| 8  | 146,25 - 168,75                    | 17      | 52    | 142   | 65    | 47   | 323   |
| 9  | 168,75 - 191,25                    | 61      | 197   | 411   | 294   | 197  | 1160  |
| 10 | 191,25 - 213,75                    | 30      | 149   | 323   | 204   | 149  | 855   |
| 11 | 213,75 - 236,25                    | 33      | 133   | 313   | 257   | 169  | 905   |
| 12 | 236,25 - 258,75                    | 23      | 108   | 264   | 205   | 156  | 756   |
| 13 | 258,75 - 281,25                    | 15      | 102   | 303   | 284   | 299  | 1003  |
| 14 | 281,25 - 303,75                    | 17      | 64    | 183   | 241   | 171  | 676   |
| 15 | 303,75 - 326,25                    | 6       | 50    | 173   | 194   | 67   | 490   |
| 16 | 326,25 - 348,75                    | 11      | 59    | 138   | 90    | 48   | 346   |
|    | Sub-Total                          | 304     | 1308  | 3128  | 2443  | 1492 | 8675  |
|    | Calms                              |         |       |       |       |      | 109   |
|    | Total                              |         |       |       |       |      | 8784  |

Алгоритм отримання середніх значень напрямку вітру для заданого часу усереднення виміру за миттєвими значеннями напрямків такий: При наявності  $n$  значень напрямку вітру, отриманих протягом часу усереднення  $T$ , визначаємо середній напрямок вітру (град) за мінімальним відхиленням середнього значення від усіх миттєвих показників (град) отриманих протягом часу усереднення. Значення напрямку вітру отримуємо цілими величинами в градусах від напрямку на північ.

Перебираючи показник  $a_i$  для фіксованого отримуємо  $r_i$ :

$$\text{якщо, } |x - a_i| \leq 180 \text{ то } r_i = |x - a_i| \text{ інакше } r_i = 360 - |x - a_i|;$$

- розраховуємо суму всіх відхилень від величини  $X$ :  $z^n = \sum_{i=0}^n r_i$ ;

- проходимо в циклі всі значення від  $X = 0$  до 359 градусів з кроком 1 градус і обчислюємо значення  $z^n$  для кожного значення  $X$ ;

- у процесі циклу визначаємо мінімальне значення  $z^n$  для всіх значень  $X$  та відповідне йому значення  $X$ .

Отримане значення є величиною напрямку вітру, що відхиляється від масиву миттєвих значень на мінімальну величину.

Дані можуть бути отримані іншими методами. У більшості випадків дані метеорологічних спостережень доступні у вигляді стандартних файлів, представлених відкритим форматом (наприклад, LAKES FORMAT).

Підсумкова умовна ймовірність реалізації набору вхідних параметрів визначається як:

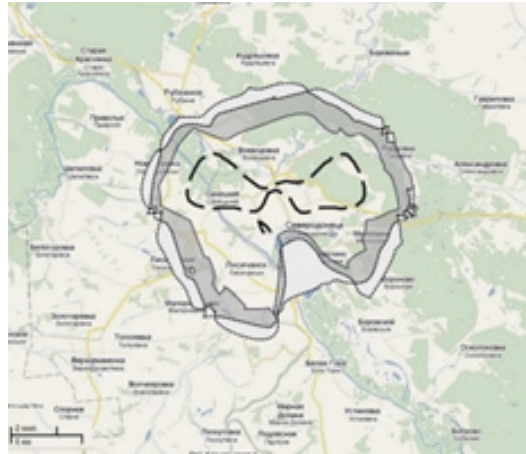
$$P_j = \prod_{k=1}^N P_k \quad (2)$$

де  $N$  - сумарна кількість незалежних вхідних параметрів, що визначають інтенсивність поширення забруднювача у просторі. Підсумкова ймовірність визначення концентрації речовини, що перевищує ГДК, обраного для моніторингу від одного джерела, у заданій точці поверхні землі  $(x, y)$  обчислюється як:

$$P_{I \text{ AE}}(x, y) = \sum_{j=1}^F \left( \prod_{k=1}^N P_k \right)_j \quad (3)$$

де  $F = \prod b_u$  - кількість можливих поєднань можливих незалежних вхідних властивостей. "Ймовірність того, що вітер матиме напрямок від джерела викиду в координату  $(x, y)$ , визначається з «троянди вітрів».

Наприклад, для окремого джерела забруднення підсумкове поле умовної ймовірності виявлення концентрацій, що перевищують ГДК (за умови реалізації викидів заданої продуктивності від джерела), обмежене нижньою ймовірністю порядку 0.005 (рис. 3).



**Рис. 3.** Поле ймовірності виявлення концентрацій, що перевищують ГДК від одного джерела забруднення

Пунктирною лінією обмежена територія, всередині якої ймовірність виявлення викидів від цього джерела перевищує мінімальну 0.005, жирною пунктирною лінією зазначено простір, ймовірність виявлення забруднювача в якому перевищує мінімально допустиму 0.05. Поле малюнку (і ізолінії) отримано території регіону Сєвєро-донецьк — Рубіжне шляхом урахування троянди вітрів і ймовірностей викидів домішки даного джерела небезпеки.

Сортування вектора ймовірностей (поля ймовірності) за спаданням дозволяє виділити набір координат, для якого підсумкова ймовірність. При цьому необхідний набір щонайменше 4-х стаціонарних постів [4].

Якщо враховувати множинні стаціонарні джерела забруднення, необхідно побудувати таке ж поле для всіх джерел, що враховуються. Об'єднане поле ймовірності від багатьох незалежних джерел інтегрується за формулою:

$$PI_{ПДК}(x, y) = 1 - \prod_{j=1}^{NI} \left( 1 - \sum_{j=1}^F \left( \prod_{k=1}^N P_k(x, y) \right) \right) \quad (4)$$

На рис. 4 представлено таке поле трьох різних джерел забруднювачів. Якщо кількість датчиків або стаціонарних постів відома, то при виборі вузлів координатної сітки для їх розміщення, в яких ймовірність виявлення викиду максимальна, сума цих ймовірностей дає уявлення про надійність виявлення викидів. Якщо сумарна ймовірність у цих вузлах нижче прийнятої, величина якої визначається шляхом узгодження з органами місцевого та державного управління, можна зробити висновок про необхідність додаткових точок контролю за станом атмосфери. Підсумовуючи значення ймовірностей далі за списком координат додаткових постів, до досягнення прийнятого значення ймовірності виявлення викидів дає нам необхідну кількість стаціонарних постів чи датчиків.



ський О. І. Моніторинг якості води / О. І. Троянський. Житомир : Волинь, 2004.— 192 с.; 6. Греков Л. Д. Космічний моніторинг забруднення земель техногенним пилом / Л. Д. Греков, Г. Я. Красовський, О. М. Трофимчук. Київ : Наукова думка, 2007. — 123 с.; 7. М.М. Біляєв, Т.І. Русакова. Комп'ютерна оцінка рівня забруднення атмосферного повітря під дією техногенних джерел. Збірник наукових праць НГУ, №54(36), Дніпро, 2018. с. 337-344.

1. V.V. Boyko, L.D. Plyatsuk Analysis of methods of mathematical modeling of the spread of pollutants in the atmosphere. Environmental safety: Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky National University of Kremenchug, vol. 6(65), - Kremenchuk, 2010. pp. 1-4; 2. Volodymyrov V. A. Risk assessment and technogenic safety management. Monograph. / Volodymyrov V. A., Izmailov V. I., Izmailov A. V. M.: FID «Business Express» 2002 - 184 p.; 3. Varzar R.L. Development of an automated air pollution monitoring system: [Electronic resource]/R.L. Varzar. - Mode of access to work: <http://masters.donntu.edu.ua/2009/fvti/varzar/diss/index.htm>; 4. Troyanskyi O. I. Air quality monitoring / O. I. Troyanskyi, O. A. Dashkovskyi. Zhytomyr: Volyn, 2004. — 160 p.; 5. Troyansky O. I. Water quality monitoring / O. I. Troyansky. Zhytomyr: Volyn, 2004.— 192 p.; 6. L. D. Grekov Space monitoring of land contamination with technogenic dust / L. D. Grekov, G. Ya. Krasovskiy, O. M. Trofymchuk. Kyiv: Naukova dumka, 2007. — 123 p.; 7. М.М. Билыев, Т.І. Русакова. Computer assessment of the level of atmospheric air pollution under the influence of man-made sources. Collection of scientific works of NSU, No. 54(36), Dnipro, 2018. p. 337-344