

УДК (574:+502.7)

О. М. ГЕТМАНЕЦЬ¹, канд. фіз.-мат. наук, доц. **К. Ю. ІВАНОВА²**,
М. М. ПЕЛІХАТИЙ², д-р фіз.-мат. наук, проф.

¹Харківська державна зооветеринарна академія,
п.м.т. М. Данилівка, Дергачівський р-н, Харківська обл., Україна 62341
e-mail: getmanets54@gmail.com

²Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна
майдан Свободи, 6, Харків, Україна 61022
e-mail: sun@univer.kharkov.ua

МОДЕЛЬ ПОБУДОВИ ПОЛЯ РАДІАЦІЙНОГО ФОНУ

Мета. Розробка нової регресійної моделі для побудови поля радіаційного фону. **Методи.** Експериментальні за допомогою дозиметра МКС-25 «ТЕРРА»; регресійний аналіз. **Результати.** Розроблено регресійну модель побудови поля радіаційного фону на місцевості за довжиною ломаної лінії, яка послідовно з'єднує усі відсортовані за зростанням потужності дози контрольні точки вимірювань, при цьому довільну точку зони з'єднують з попередньою до найближчої до неї контрольною точкою і цю сумарну відстань вздовж ломаної підставляють до рівняння регресії. **Висновки.** Модель дозволяє надійно будувати карту радіаційних забруднень на всій контрольованій території на підставі результатів локальних вимірювань в певній кількості контрольних точок. Модель може знайти застосування для моніторингу інших видів забруднень.

Ключові слова: радіаційний моніторинг, рентгенівське та гама-випромінювання, регресійні моделі

Getmanets O. M.¹, Ivanova K. Yu.², Pelikhaty N. M.²

¹Kharkiv State Zooveterinary Academy

²V. N. Karazin Kharkiv National University

A MODEL FOR CONSTRUCTION THE FILDS OF RADIATION BACKGROUND

The problem of building the field of radiation background on the place according to the measurements taken at a finite number of points is always actual. **Purpose.** Elaboration a new regression model for constructing the radiation background field. **Methods.** Measurements of the power of continuous X-ray's and gamma radiation's dose were carried out on the territory of the Nemishlyansky region of Kharkov in May-June 2017 using the dosimeter MКС-25 "TEPPA". Regression analysis has been used for processing of the measurement results. **Results.** A regression model for constructing a field of a radiation background on the place by the length of a broken line, which in turn joins all sorted by increasing power of the dose control points, while an arbitrary point of the zone is joined from the preceding to the nearest control point, and this total distance along the broken line is substituted to the regression equation, has been developed. **Conclusions.** The model makes it possible to reliably build a map of radiation contamination throughout the controlled area based on the results of local measurements in a certain number of control points. The model may find application for monitoring other types of contaminants.

Key words: radiation monitoring, X-ray and gamma-radiation, regression models

Гетманец О. М.¹, Иванова Е. Ю.², Пелихатый Н. М.²

¹Харьковская государственная зооветеринарная академия

²Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина

МОДЕЛЬ ПОСТРОЕНИЯ ПОЛЯ РАДИАЦИОННОГО ФОНА

Задача восстановления поля радиационного фона на местности по данным измерений, которые были проведены в конечном числе точек, всегда является актуальным. **Цель.** Разработка новой регрессионной модели для построения поля радиационного фона. **Методы.** Измерения при помощи дозиметра МКС-25 «ТЕРРА»; регрессионный анализ. **Результаты.** Разработана регрессионная модель построения поля радиационного фона на местности по длине ломаной линии, которая последовательно соединяет все отсортированы по возрастанию мощности дозы контрольные точки, при этом произвольную точку зоны соединяют с предыдущей до ближайшей к ней контрольной точкой и это суммарное расстояние вдоль ломаной подставляют в уравнение регрессии. **Выводы.** Модель позволяет надежно строить карту радиационных загрязнений на всей контролируемой территории на основании результатов локальных измерений в определенном количестве контрольных точек. Модель может найти применение для мониторинга других видов загрязнений.

Ключевые слова: радиационный мониторинг, рентгеновское и гамма-излучение, регрессионные модели

Вступ

Завдання відновлення поля радіаційного фону на місцевості за даними вимірювань, що були проведені в кінцевому числі контрольних точок, завжди є актуальним [1,2]. В певному сенсі воно подібно завданню відновлення зображення за його точковими фрагментами [3]. Існує підхід, який заснований на побудові регресійних моделей для поля радіації у вигляді поліномів різних ступенів за значеннями поточних координат довільної точки всередині зони спостережень або за її межами [4–11]. Не зважаючи на ряд переваг даного підходу, його основним недоліком є суттєве завищення значень радіації далеко від центру контрольованої зони (навіть на її границях). Це пов'язано з тим, що регресія будується за координатами в певних ступенях та за їх добутками. Тому, чим більше значення координат (відлік яких ведеться від геометричного центру зони) – тим більше помилка передбачень моделі.

В попередній роботі авторів [12] було запропоновано підхід, згідно якому регресія будується не за двома координатами точки $M(x, y)$ на місцевості, а за однією – від-

станню від цієї точки до найближчої до неї i -ої контрольної точки спостережень, яка лежить на деякій ламаній лінії, що послідовно з'єднує усі точки спостережень (від центральної до найдалшої зовнішньої). Перевагою цієї моделі є те, що завищення рівня радіації біля границі зони спостережень і за її межами відсутнє, оскільки запропонований алгоритм прив'язує значення потужності дози випромінювання в довільній точці зони до вимірюваного значення в найближчій точці спостереження. Але успішність застосування даного підходу ускладнена тим, що експериментальна залежність потужності дози від відстані уздовж ламаної, яка послідовно з'єднує усі контрольні точки (від центральної до найдалшої зовнішньої), майже завжди не є монотонною, а має дуже складний характер. Це ускладнює побудову рівняння регресії і призводить до підвищення її стандартної помилки і зменшення вірогідності передбачень моделі.

Тому завданням даної роботи є удосконалення алгоритму [12] з метою підвищення точності та надійності побудови поля радіаційного фону.

Методи досліджень

В якості матеріалів досліджень були використані результати вимірювань рівня амбінентного еквіваленту потужності дози

неперервного рентгенівського та гамма-випромінювання на частині території Нemişлянського району м. Харкова, що були

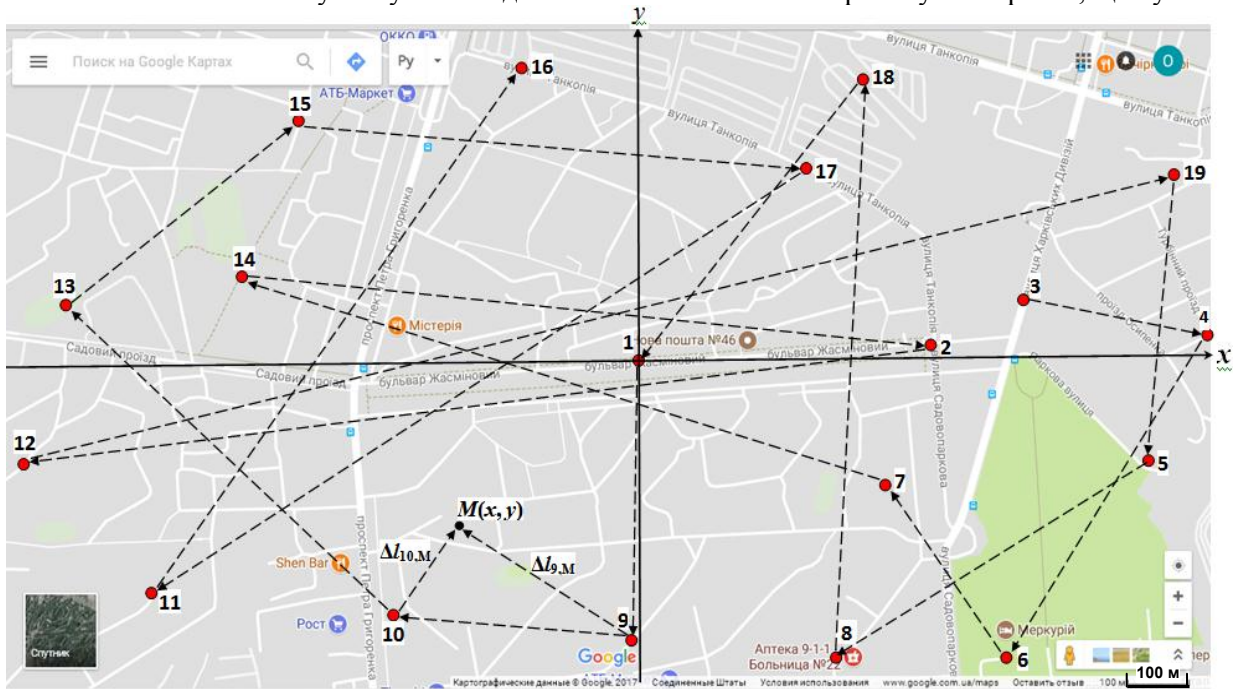


Рис. 1 – Схема розташування точок спостережень на контрольованій території та побудови ламаної

проведені в травні-червні 2017 року. Вимірювання проводилися за допомогою дозиметра МКС-25 «ТЕРРА» з абсолютною похибкою приладу 0,01 мкЗв/год, який застосовується для дозиметричного і радіометричного контролю на промислових підприємствах; для екологічних досліджень; для

контролю радіаційної чистоти житлових приміщень, будівель і споруд та прилеглих до них територій. Карта території, на якій проводилися дослідження, наведена на рисунку 1. На цій карті показано розташування усіх 19-ти контрольних точок спостережень.

Результати досліджень

На рисунку 2 в якості прикладу наведено результати вимірювань потужності дози в усіх контрольних точках за даним від 31 травня 2017 р. Цей рисунок свідчить про те, що залежність потужності дози від відс-

тані уздовж ламаної, яка послідовно з'єднує усі точки вимірювань від 1-ї до 19-ї, не є монотонною, а має складний характер. Побудова простого рівняння регресії за цими даними є дуже складним завданням

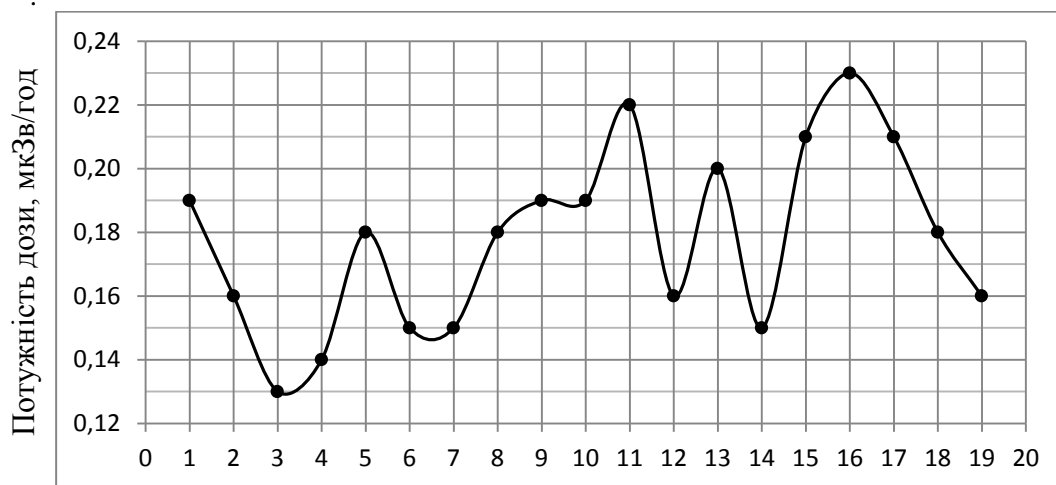


Рис. 2 – Залежність потужності дози від номеру точки спостережень (за даними від 31 травня 2017 р.)

Тому ми модифікуємо відомий алгоритм [9], попередньо зробивши сортування точок спостережень за зростанням потужності дози від мінімального до максималь-

ного значення. При цьому одержимо монотонну криву неспадної функції потужності дози, яка наведена на рисунку 3.

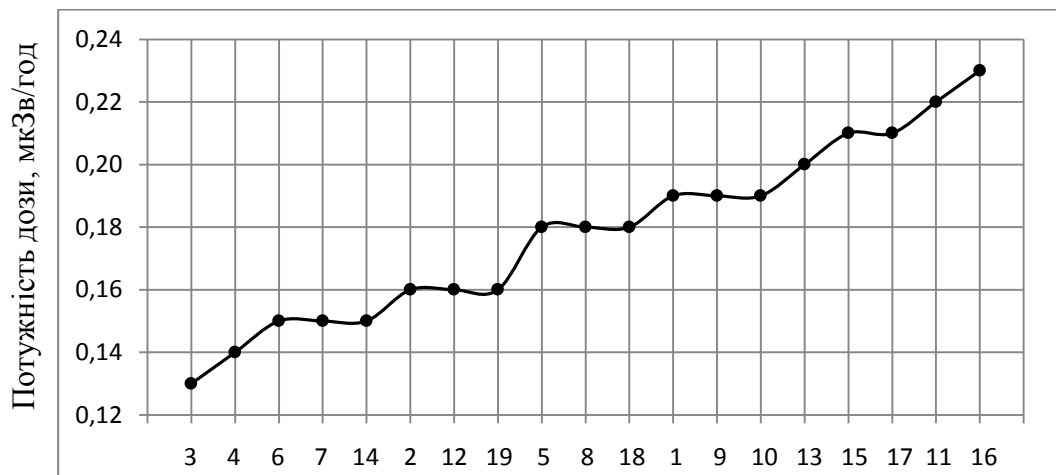


Рис. 3 – Залежність потужності дози від номеру точки спостережень (за даними від 31.05.2017)

Ламана, яка була побудована на карті контрольованої зони (рис. 1) вздовж відсортованих за потужністю дози точок (від 3-ї до 16-ї), показана на рисунку 1. Можна бачити, що ламана щільним «павутинням» накриває всю контрольовану зону. Відстань l вздовж ламаної можна обчислити за координатами точок спостережень відносно центру зони (точки № 1 на рисунку 1).

Залежність потужності дози від значень відстані уздовж ламаної зображена у вигляді діаграми на рисунку 4 (точки). По-

шук рівняння регресії за цими даними здійснювався в межах пакету аналізу даних MS Excel-2010 за допомогою команди «Додати лінію тренда». Тренд шукали у вигляді поліному 4-го ступеня за довжиною l . На рисунку 4 показана відповідна лінія регресії та наведені як само рівняння, так і значення коефіцієнта детермінації $R^2 = 0,9770$ для нього. Це високе значення свідчить про те, що рівняння регресії адекватно відображає більше за 97 % даних вимірювань.

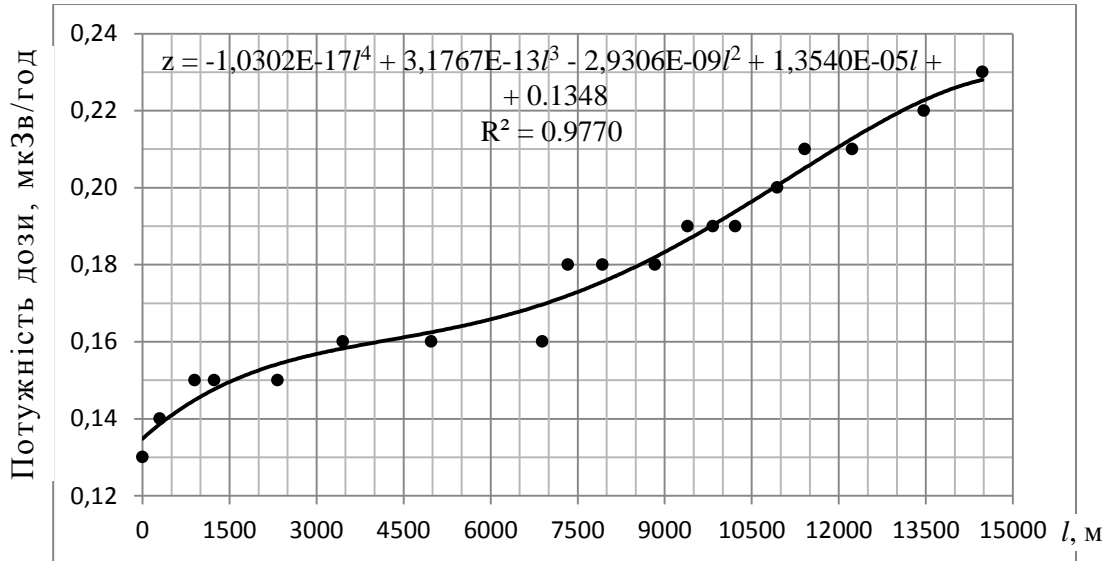


Рис. 4 – Залежність потужності дози від відстані l вздовж ламаної (за даними від 31.05.2017)

Для більш детального аналізу рівняння регресії було застосовано інструмент «Регресія» з пакету аналізу даних Excel-2010. Результати свідчать про те, що одержане рівняння регресії є дуже якісним: воно має високе значення коефіцієнту детермінації, нормованого на кількість ступенів свободи (0,9704); стандартна помилка регресії складає 0,0049 мкЗв/год, що більш, ніж у два рази нижче похибки приладу вимірювання; само рівняння є значущим за F -критерієм Фішера з високим рівнем надійності; його коефіцієнти є суттєво значущими за t -критерієм Стьюдента (тобто рівень значущості для них: $p < 0,05$). Так саме будувалися рівняння регресії для усіх наступних днів проведення спостережень. Ці рівняння також були якісними і мали стандартні помилки у два рази менші, ніж похибка приладу вимірювання.

Алгоритм побудови поля радіаційного фону, як всередині контрольованої зони, так і за її межами, виглядає наступним чином. Розглянемо довільну точку M з коор-

динатами x і y , в якій вимірювання не проводилися, яка показана на рисунку 1. За допомогою спеціальної програми в системі комп'ютерних обчислень «Maple-12» (фірми «Maplesoft») визначалася відстань від цієї точки до найближчої контрольної точки (наприклад, точки 10), як це показано на рисунку 1. Цю відстань позначимо як $\Delta l_{10,M}$. Для включення точки M до нашої ламаної визначимо відстань від неї до попередньої точки на ламаній (точка 9 на рисунку 1). Цю відстань позначимо як $\Delta l_{9,M}$. Положення точки $M(x, y)$ на ламаній будемо характеризувати довжиною $l_M = l_9 + \Delta l_{9,M}$. У випадку, коли точка M співпадає з точкою 10, маємо правильне значення: $l_{10} = l_9 + \Delta l_{9,10}$. Підкреслимо, що невірно визначати положення точки M , як $l_M = l_{10} + \Delta l_{10,M}$, оскільки, якщо ця точка знаходиться ближче до точки 9, ніж точка 10, то значення відстані вийде завищеним. Значення потужності дози у точці M будемо описувати за допомогою одержаного раніше рівняння регресії (рисунк 4): $z = -1,0302 \cdot 10^{-17} l^4 + 3,1767 \cdot 10^{-13} l^3 -$

$2,9306 \cdot 10^{-10} l^2 + 1,13540 \cdot 10^{-5} l + 0,1348$ (де потужність дози z виражена в мкЗв/год, а довжина l в метрах) з підстановкою $l = l_0 + \Delta l_{0,м}$.

Вважаючи на те, що одержані рівняння регресії за відсортованими відстанями описувалися досить гладкими кривими, ми інтерполювали і екстраполювали ці рівняння як всередину контрольованої зони, так і

недалеко за її межі. Таким чином були побудовані усі карти радіаційного фону для кожного дня спостережень. Для візуалізації результатів була також застосована програма «Maple-12». На рисунку 5 в якості прикладу наведено карту радіаційного фону на контрольованій території від 31 травня 2017 р.

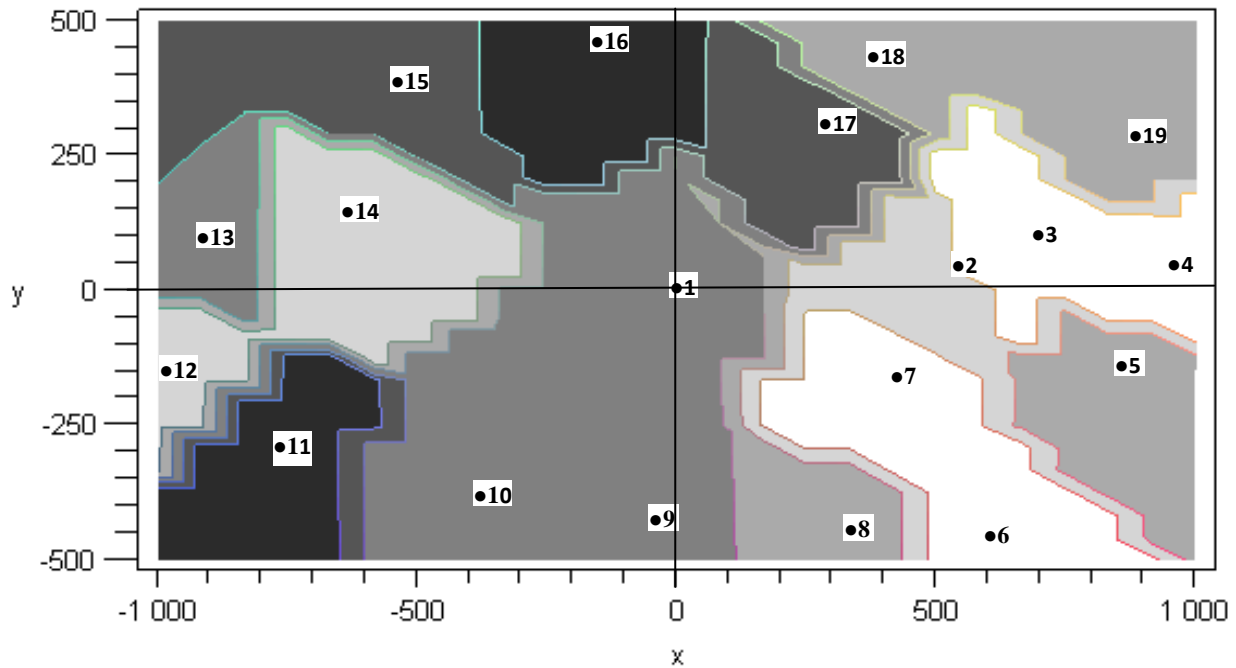


Рис. 5 – Карта радіаційного фону на 31.05.17: білий колір – 0,13 мкЗв/год, чорний – 0,23 мкЗв/год через 0,02 мкЗв/год за тоном (значення x і y вказані в метрах)

На цій карті для прив'язки до карти місцевості (рисунок 1) в якості реперних показані усі контрольні точки. Можна бачити, що значення потужності дози в контрольних точках на карті рисунку 5 практично збігаються з результатами вимірювань

(рисунки 2 і 3) в межах стандартної помилки регресії.

Для порівняння побудуємо рівняння регресії теж 4-го порядку за координатами x і y за даними від 31.05.2017 р. Для більшої надійності застосуємо програму «Maple-12». В результаті одержимо:

$$z = 3,2499 \cdot 10^{-13} x^4 + 6,5997 \cdot 10^{-13} y^4 + 9,7507 \cdot 10^{-14} x^3 y + 2,5910 \cdot 10^{-12} y^3 x + + 1,1163 \cdot 10^{-12} x^2 y^2 - 4,8464 \cdot 10^{-11} x^3 - 1,1163 \cdot 10^{-9} y^3 - 1,4655 \cdot 10^{-10} x^2 y - 5,8418 \cdot 10^{-10} x y^2 - - 3,2776 \cdot 10^{-7} x^2 - 2,3751 \cdot 10^{-8} y^2 - 4,2922 \cdot 10^{-7} x y + 0,00005819 x + 0,0002413 y + 0,1910.$$

Хоча ця регресія і має 15 коефіцієнтів, її коефіцієнт детермінації дорівнює лише $R^2 = 0,8904$; стандартна помилка регресії становить 0,0054 мкЗв/год; і взагалі регресія не є значущою за Фішером. Карта радіаційного фону, яка була побудована за цією регресією, наведена на рисунку 6. Ка-

ртина забруднення суттєво відрізняється від рисунку 5 (співпадіння має місце лише в декількох контрольних точках всередині зони). Біля границь передбачені значення фону суттєво перевищують максимально допустиме, тобто є значно завищеними.

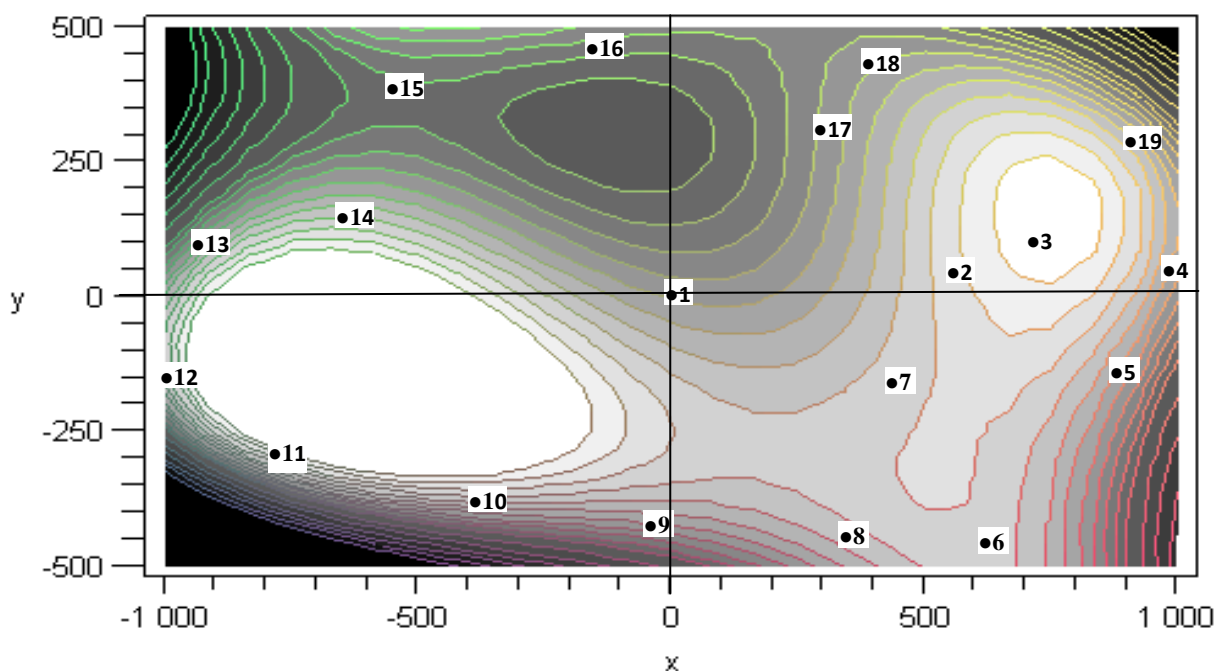


Рис. 6 – Карта радіаційного фону згідно регресійної моделі за координатами на 31.05.17: білий колір – 0,13 мкЗв/год, чорний – 0,35 мкЗв/год через 0,02 мкЗв/год за тоном (значення x і y вказані в метрах)

Висновки

Таким чином, модель, що була розроблена в даній роботі, дозволяє надійно будувати карту радіаційного забруднення на всій контрольованій території на підставі результатів локальних вимірювань в певній кількості контрольних точок. Оскільки використовується проста регресійна модель

лише за однією пояснювальною змінною, побудову карти радіаційного фону можна здійснювати швидко навіть в польових умовах за допомогою ноутбука або планшета. Модель також може знайти застосування для моніторингу інших видів забруднень в програмах екологічних досліджень.

Література

1. Некос В. Ю., Юшманова І. П., Пеліхатий М. М. Розробка систем радіаційного моніторингу довкілля . *Людина і довкілля. Проблеми неоекології*. № 9, 2007. С. 52 – 62.
2. Некос В. Ю. , Пеліхатий М. М., Юшманова І. П. Методи і алгоритми визначення радіаційного стану довкілля . *Людина і довкілля. Проблеми неоекології*. № 1–2 (11–12). 2008.. С. 90 – 98.
3. Василенко Г. И., Тараторин А. М. Восстановление изображений. М. : Радио и связь, 1986. 304 с.
4. Некос В. Е, Гетманец О. М., Пелихатый Н. М., Чуенко А. В., Дроздов А. А., Кривицкая И. А.. Алгоритмы радиационного мониторинга местности в режиме реального времени. *Людина і довкілля. Проблеми неоекології*. № 2 (13). 2009. С. 7 – 13.
5. Гетманец О. М., Гордієнко В. Г., Дроздов О. О., Пеліхатий М. М. Патент України на корисну модель № 50154. МКВ G01T1/167. Спосіб радіаційного моніторингу місцевості у режимі реального часу. заявл. 11.12.2009; опубл. 25.05.2010. Бюл. № 10. – 4 с.
6. Гетманец О. М. , Пелихатый Н. М., Дроздов А. А., Некос В. Е., Кучеров К. И. Радиационный мониторинг контролируемой территории в режиме реального времени. *Людина і довкілля. Проблеми неоекології*. 2010. № 2 (15). С. 3 – 33.
7. Гетманец О. М., Гордієнко В. Г., Дроздов О. О., Пеліхатий М. М. Патент України на корисну модель № 56883. МКВ G01T1/167. Спосіб радіаційного моніторингу реальної місцевості з реальним рельєфом. заявл. 23.07.2010; опубл. 25.01.2011. Бюл. № 2. – 6 с.
8. Гетманец О. М. , Гордиенко В. Г., Дроздов А. А., Пелихатый Н. М. Радиационный мониторинг местности в режиме реального времени при помощи волоконно-оптического дозиметра. *Вісник ХНУ ім. В. Н. Каразіна. Серія: Екологія*. 2011. № 944. Вип.6. С. 83 – 86.
9. Гетманец О. М. , Дроздов А. А., Дурасова Н. С., Пелихатый Н. М. Радиационный мониторинг местности (вблизи поселка Коропово в июне 2011 года). *Людина і довкілля. Проблеми неоекології*. 2012. № 3–4. С. 110 – 115.

10. Гетманець О. М., Гордієнко В. Г., Дроздов О. О., Пеліхатий М. М.; Патент України на корисну модель № 62252. МКВ G01T1/167. Спосіб радіаційного моніторингу реальної місцевості у режимі реального часу за допомогою волоконно-оптичного дозиметра. заявл. 18.12.2010; опубл. 25.08.2011. Бюл. № 16. 4 с.
11. Ємець В. М., Пеліхатий М. М., Гетманець О. М. Патент України на корисну модель № 84133. МКВ G01W 1/00,G08C 17/02. Система автоматичного моніторингу території. заявл. 15.04.2013; опубл. 10.10.2013. Бюл. № 19. – 5 с.
12. Гетманець О. М., Пеліхатий Н. М. Разработка алгоритма построения поля радиационного фона. *Вісник ХНУ ім. В. Н. Каразіна. Серія: Екологія.* 2016. Вип. 14. С. 41 – 45.

References

1. Nekos, V. Yu., Yushmanova, I. P., Pelikhatyy, M. M. (2007). Rozrobka system radiatsiyonoho monitorynhu dovkillya [Development of radiation monitoring systems of environment]. *Man and environment. Issues of neoeology.* 9. 52 – 62. [In Ukrainian].
2. Nekos, V. Yu. , Pelikhatyy, M. M., Yushmanova, I. P. (2008). Metody i alhorytmy vyznachennya radiatsiyonoho stanu dovkillya [The methods and algorithms for determining the radiation state of the environment]. *Man and environment. Issues of neoeology.* 1–2 (11–12) , 90 – 98. [In Ukrainian].
3. Vasilenko, G. I., Taratorin ,A. M. (1986). Vosstanovlenie izobrazhenij.[Image restoration]. Moscow, Russia : Radio and communication, 304. [In Russian].
4. Nekos, V. E, Getmanec, O. M., Pelihatyj ,N. M., Chuenko, A. V., Drozdov, A. A., Krivickaya, I. A. (2009). Algoritmy radiacionnogo monitoringa mestnosti v rezhime real'nogo vremeni. [The algorithms of radiation monitoring of areas in real time]. *Man and environment. Issues of neoeology.* 2 (13) , 7 – 13. [In Russian].
5. Hetmanets', O. M., Hordiyenko V. H., Drozdov O. O., Pelikhatyy M. M. (2010). Patent of Ukraine on the Utility Model The method of radiation monitoring areas in real time. No 50154. G01T1/167. / [In Ukrainian].
6. Getmanec, O. M. , Pelihatyj, N. M., Drozdov, A. A., Nekos ,V. E., Kucherov K. I. (2010). Radiacionnyj monitoring kontroliruemoy territorii v rezhime real'nogo vremeni. [Radiation monitoring of the controlled area in real time]. *Man and environment. Issues of neoeology.* 2 (15) , 3 – 33. [In Russian].
7. Hetmanets', O. M., Hordiyenko, V. H., Drozdov, O. O., Pelikhatyy, M.M. (2011). The method of radiation monitoring of real area with real relief . Patent of Ukraine for useful model. G01T1/167. № 56883; declared 23.07.2010; published 25.01.2011, № 2. [In Ukrainian].
8. Getmanec, O. M., Gordienko, V. G., Drozdov, A. A., Pelihatyj, N. M. (2011). Radiacionnyj monitoring mestnosti v rezhime real'nogo vremeni pri pomoshchi volokonno-opticheskogo dozimetra. [Radiation monitoring of the area in real time using a fiber optic dosimeter]. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University Series «Ecology».* 944 , 83 – 86. [In Russian].
9. Getmanec, O. M. , Drozdov, A. A., Durasova, N. S., Pelihatyj, N. M. (2012). Radiacionnyj monitoring mestnosti (vblizi poselka Koropovo v iyune 2011 goda). [Radiation monitoring of the area (near Koropovo settlement in June 2011)]. *Man and environment. Issues of neoeology* 3–4, 110 – 115. [In Russian].
10. Getmanets, O.M., Gordienko, V.G., Drozdov, A.A., Pelikhaty, N.M. (2011). The method of radiation monitoring of real area in real time using a fiber optic dosimeter. Patent of Ukraine for useful model. G01T1/167. № 62252; declared 18.12.2010; published 25.08.2011. № 16.
11. Yemets, V. M., Pelikhaty, N.M., Getmanets, O.M. (2013). The system of automatic monitoring of the area. Patent of Ukraine for useful model. G01W 1/00,G08C 17/02. No 84133; declared 15.04.2013; published 10.10.2013. № 19.
12. Getmanec, O. M., Pelihatyj, N. M. (2016). Razrobotka algoritma postroeniya polya radiacionnogo fona.[Development the algorithm for construction the field of radiation background] .*Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University Series «Ecology».* 14. 41 – 45. [In Russian].

Надійшла до редколегії 15.08.2017