

## ВІЗУАЛІЗАЦІЯ СТАНУ РАДІОЛОГІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ХАРЧОВОЇ ПРОДУКЦІЇ

Квасніков В. П., Матвієнко Д. Г.

### 1. Вступ

Візуалізація даних – це спосіб подання багатомірною розподілу даних, при якому якісно відбиті основні закономірності, властивому вихідному розподілу: кластерна структура, топологічні особливості, внутрішньо системні зв'язки, відстані у вихідному просторі ознак і т. д. Традиційні інструменти в цій області – графіки та діаграми – погано справляються із завданням візуалізації, коли виникає необхідність зобразити більше трьох взаємозалежних величин.

З іншого боку, існує наймогутніший інструмент зображення інформації, прив'язаної до географічної сітки координат [1].

З радіологічним і харчовим моніторингами тісно пов'язані радіологічне картографування та прогнозування. При цьому картографування (картографування радіологічних показників) варто розглядати як основу моніторингу, а прогнозування – як найважливіший його наслідок. З ряду причин ці роботи в Україні проводилися явно в обмежених обсягах і з недостатньою повнотою. Основний їхній недолік полягав у тому, що до останнього часу радіологічне картографування та прогнозування здійснювалося, по суті, як радіаційне, спектрометричне або радіогеохімічне вимірювання [2].

Для значної частини України в змісті комплексної оцінки радіологічної ситуації зроблено значно менше, ніж для 30-кілометрової зони. При цьому є значні обсяги аналітичних даних, головним чином, по щільності забруднення  $^{137}\text{Cs}$ , що становлять багато сотень тисяч визначень. За умови концентрації всієї накопиченої інформації в електронних базах даних проблема комплексного радіологічного картографування території України могла б вирішуватися досить успішно та у прийнятний термін [3].

Тому актуальним є дослідження комплексної оцінки впливу радіонуклідів на навколишнє середовище і населення, що напряму впливають на якість життя населення, які відбивають сучасний стан навколишнього середовища й здоров'я населення регіону.

### 2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є вимірювання, оцінювання, візуалізація і контроль впливу радіаційного опромінення на життя, здоров'я громадян, охорони довкілля та безпеки народногосподарських об'єктів з урахуванням ризику виникнення техногенних катастроф.

Проблеми дослідження міграції радіонуклідів у харчових ланцюгах вимагають застосування інформаційних технологій у процесі досліджень і реалізації математичних моделей у прикладних програмних пакетах [4, 5].

Аж до теперішнього часу радіологічне картографування представлено в основному у вигляді радіаційних або радіогеохімічних мап. Головна увага фахівців, як і раніше, приділяється щільності забруднення місцевості основними техногенними радіонуклідами, а широкий спектр показників, пов'язаних із впливом катастрофи на біосферу та населення прилягаючих територій, так і не одержав адекватного картографічного подання.

Однією з найбільших проблем є потреба в розробці наукових методів дослідження комплексних оцінок впливу техногенних навантажень на навколишнє середовище та людину. А також у створенні спеціалізованих систем, призначених для збору, зберігання, обробки та візуалізації інформації з використанням сучасних ГІС (геоінформаційних систем) технологій. Це дозволяє аналізувати багатомірні дані за допомогою їх відображення із збереженням структурних особливостей інформації.

### **3. Мета та задачі дослідження**

*Мета дослідження* – створення спеціалізованої системи для збирання, аналізу і візуальної інтерпретації даних харчового моніторингу, що включала б базу даних, засоби графічного представлення інформації, програмне забезпечення задач охорони довкілля і картографічного моделювання техногенних забруднень.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Розробити підходи, методики і програмний засіб, які істотним чином спростять аналіз різнорідних даних.
2. Провести районування території Черкаської області (Україна) за радіологічними показниками вмісту  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  та виявити і візуалізувати залежності між рівнями техногенного забруднення і захворюваністю населення.

### **4. Дослідження існуючих рішень проблеми**

Проводячи аналіз програмних продуктів, які застосовувалися для радіологічних досліджень було виявлено, що на сьогоднішній день в дослідженнях задіяні програмні продукти, основною метою яких є візуалізація процесу або явища, що вивчається.

Існує досить широкий спектр математичних моделей у радіології й програмних засобах, у яких вони реалізовані. Серед них:

*USLE*. Модель, розроблена в -80-ті роки минулого століття не задовольняє ні сучасному рівню науки, ні запитам практики. Ця модель потребує вдосконалення, яке повинно відбуватися за кількома напрямками, в тому числі: актуалізації інформаційної бази, подальших досліджень закономірностей просторової диференціації факторів процесу ерозії і розробки методів їх геоінформаційного моделювання [6].

*Food Web*. Аналіз математичної моделі дозволяє відповісти на важливі змістовні питання про особливості динаміки взаємодіючих популяцій і спрогнозувати їхню поведінку в майбутньому. Такий перехід супроводжується втратою стійкості простого атрактора – рівноваги і народженням нового, більш складного атрактора граничного циклу. Відбувається обов'язкове об'єднання

всіх харчових ланцюжків, і тільки невелика частина цієї складної системи ілюструє реальну екосистему [7].

*ECORAD.* Основна перевага цього методу полягає в математичному розв'язанні проблеми нестачі параметрів, а успіх виконання залежить від правильності постановки завдання, розмірності системи, кількості невідомих параметрів та точності представлених експериментальних даних. Чисельних способів їх розв'язування на сьогодні існує доволі багато. Основним недоліком цих моделей є значна кількість невідомих параметрів, які характеризують швидкість процесів, що відбуваються в компартментах [8].

*Stella.* До переваг можна віднести хорошу систему побудови графіків, яка дозволяє змінювати масштаб графіка, розміщувати кілька графіків на одній сторінці. Недолік цього підходу – великий обсяг попередніх перетворень, крім того структура моделі не нагадує реальну систему, або взагалі може не мати схеми заміщення і являти собою набір рівнянь [9].

*POSEIDON.* Дає змогу описувати міграцію різних радіонуклідів – від опису джерела забруднення до оцінювання доз внутрішнього опромінення людини в результаті споживання морепродуктів. Модель «POSEIDON» була використана при вивченні наслідків аварії на японській АЕС «Фукусіма-1» (березень 2011 року). Недоліком є те, що вона описує лише морське середовище, що включають товщу води, донні відкладення і морські організми та не описує харчові ланцюги суходолу [10].

*THREETOX.* Забезпечує можливість прогнозування короткострокового переносу радіонуклідів в різних водоймах: річках, озерах, водосховищах, лиманах і прибережних зонах морів. Серед недоліків можна виділити складність чисельного розв'язку рівнянь та потребу в потужних обчислювальних ресурсах [11].

Дані моделі, які показують застосування математичного моделювання в радіології й одночасно служать свого роду довідником для науковців, що працюють у сфері дослідження радіологічних процесів. Наведені приклади моделей були реалізовані в некомерційних спеціалізованих програмних пакетах. У рамках узагальнення аналізу математичних моделей можна зробити висновок, що в компартментних моделях, що становлять екосистем описуються кінетикою процесів, що мають подібну природу. Моделі поведінки радіонуклідів у середовищі (повітря, вода, ґрунтовий розчин) описуються переважно рівняннями дифузно-конвективного переносу (часто використовуються спрощені модифікації), оскільки міграції радіонуклідів сприяють такі процеси, як дифузія, конвекція й адвекція.

Моделі зазначених літературних джерел стосовно лісових екосистем переважно описані системами звичайних диференціальних рівнянь. Хоча кількість моделей досить значна, лише деякі з розроблених в останні роки математичних моделей знайшли свою реалізацію в прикладних програмних системах.

Але недоліками даних оглядів є відсутність систематизації завдань загальної екології та радіоекології. Крім того, зазначені огляди лише показують застосування системного аналізу в певній вузькій області наук про навколишнє середовище. Ці огляди з погляду систематизації завдань наук про навколишнє

середовище незадовільно характеризують сучасний стан справ у даній предметній області.

Існує також і ряд опублікованих оглядів застосування методів математичного моделювання в радіології й радіобіології [12]. Не можна думати, що будь-які взаємозв'язки можна описати моделлю у вигляді системи диференціальних рівнянь, яка піддавалася б дослідженню в класичному сенсі, тобто інтегруванню в формульному вигляді або хоча б якісному дослідженню. Екосистеми потрібно вивчати в цілому, не обмежуючись лише тими видами, які для людини представляють економічний інтерес. Математичне моделювання будь-якої екологічної системи являє собою великий, тривалий і дорогий експеримент, який має дуже мало шансів на успіх.

Так, у дослідженнях [13] приводяться залежності нагромадження радіонуклідів у компартментах рослин, грибів і т. п. Однак, у цій роботі не до кінця представлена подальша міграція радіонуклідів по трофічним ланцюгам до людини.

Так, у роботі [14] реалізована математична модель, що враховує фізичні особливості поширення радіонукліда  $^{90}\text{Sr}$  по профілю ґрунту, з огляду на ґрунтообмінні процеси. Але залишається питання подальшого нагромадження радіонукліду у різних видах рослинної продукції. Головна перевага моделі в тому, що вона базується на простих алгоритмах. Однак, вони не інформативні і не розглядається графічна візуалізація та керівництво процесом моделювання.

У роботах [15, 16] крім викладу методології системного аналізу змін навколишнього середовища із приведенням формалізованих описів етапів побудови математичні моделі запропоновані математичні моделі екосистем, зокрема аналіз міграції радіонуклідів по трофічному ланцюгу: «надземна фітомаса – людина». Проте є невирішеними питання захворюваності на тлі радіологічного забруднення.

Показано, що прагнення до більш точного опису складного системного об'єкту призводить до збільшення кількості врахованих факторів та процесів, що ускладнює використання математичних моделей. Аналіз та прогноз за такими моделями виконується з помилкою, яка обумовлена похибкою методів, неточністю вихідних даних. Ці помилки призводять до катастрофічних неточностей у модельних прогнозах. Необхідне глибоке вивчення взаємозв'язків природних та антропогенних систем, сучасних методів оцінки та прогнозу таких відносин, скорочення кількості врахованих факторів.

У роботі [3] уперше продемонстровані можливості розширення звичайного картографування радіаційної обстановки до радіологічного рівня картографування. Підготовлено комплект карт для північних територій України. Вони включають карти стану природного середовища, зведену карту щільності поверхневого забруднення  $^{137}\text{Cs}$ , карту біогенної міграції радіонуклідів, карти захворюваності дитячого населення, а також результуючу карту ступеня радіологічної небезпеки проживання на території Українського Полісся. У цій роботі виконувалася лише оцінка щільності забруднення місцевості основними техногенними радіонуклідами. Однак, широкий комплекс показників, що відбивають вплив Чорнобильської катастрофи на

біосферу, особливо таких, як захворюваність, працездатність населення, народжуваність, смертність, тривалість життя й т. п., на мапі не відбивався.

Отже, з проведеного аналізу відомих програмно-математичних методів видно, що недоліками даних оглядів є відсутність систематизації завдань загальної радіології. Спостереження за станом радіологічного забруднення вимагає фільтрації навантажень (факторів) для отримання інформативної складової про стан забруднення та швидкість міграції радіонуклідів по трофічним ланцюгам.

## 5. Методи досліджень

Побудова радіологічних карт, які включають багато різних показників, вимагає інтенсивних теоретико-методичних досліджень. Спочатку необхідно зробити комплексний аналіз різнорідних вимірювань постраждалої екосистеми, а потім здійснити перехід від простої оцінки радіаційної обстановки до інтегральних оцінок радіологічних наслідків забруднення для регіону, окремих його територій та основних категорій населення.

Математична статистика тут виступає насамперед як спосіб для узагальнення інформації про безліч об'єктів, що дозволяє синтезувати дані про частини (елементи статистичної сукупності) в інформацію про ціле (про всю статистичну сукупність). Методи багатомірного статистичного аналізу виявилися найбільш адекватним засобом для переходу від набору розрізнених показників забруднення до узагальнених радіологічних індексів та їхньому картографічному поданню [17, 18].

З проведеного порівняльного аналізу можна зробити висновок, що карти являють собою надійний засіб для візуалізації та як керівництво процесом моделювання, для його контролю та коригування, а також для оцінки переваг конкретних математичних моделей.

Багатовимірний статистичний аналіз і методи візуальної інтерпретації багатовимірних даних (а саме методи факторного, кластерного) використовуватимуться як апарат дослідження і прогнозування складних медико-радіологічних ситуацій. Вони тісно пов'язані з атмосферним забрудненням великих промислових міст України на тлі їх радіаційного забруднення тощо [19, 20].

Основна модель факторного аналізу описується за формулою:

$$F_k = \sum_i a_{ki} X_i, \quad (1)$$

де  $X_i$  – початковий масив даних;  $i$  – кількість стовпчиків початкової матриці;  $k$  – кількість виділених факторів;  $F_k$  – загальні фактори;  $a_{ik}$  – специфічні фактори.

Фактори  $F_m$  побудовані так, щоб найкращим способом (з мінімальною похибкою) представити  $X_n$ . У цій моделі «сховані» змінні  $F_k$  називаються загальними факторами, а змінні  $U_i$  специфічними факторами. «Специфічний» – це лише один з перекладів застосовуваного в англійській літературі слова Unique, в

українській літературі як визначення  $U_i$  зустрічаються також слова «характерний», «унікальний». Значення  $a_{ik}$  називаються факторними навантаженнями [21].

Метод деревоподібної кластеризації використовується при формуванні кластерів відмінності або відстані між об'єктами. Ці відстані можуть визначатися в одновірному або багатовірному просторі. Найбільш прямий шлях обчислення відстаней між об'єктами в багатовірному просторі полягає в обчисленні евклідових відстаней (2).

Евклідова відстань є геометричною відстанню в багатовірному просторі і є відстанню між точками  $x$  та  $y$  у  $n$ -вірному просторі й обчислюється в такий спосіб:

$$d(x, y) = \left\{ \sum_i (x_i - y_i)^2 \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

де  $x$  та  $y$  точки у  $n$ -вірному просторі.

## 6. Результати дослідження

Вихідними даними для проведення кластерного аналізу приймаємо факторні значення районів Черкаської області, які були отримані на базі ДП «Черкаський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації» (Україна), табл. 1. Застосування кластерного аналізу дасть можливість районувати територію Черкаського регіону по деяких ознаках, що може бути використане при прийнятті однакових рішень в області контролю даних харчового моніторингу, візуалізації даних або здоров'я населення [17].

**Таблиця 1**

Факторні значення районів Черкаської області (Україна), які були отримані на попередній стадії досліджень

Район	Позначення району	Фактор 1	Фактор 2
Городищенський	1	0,870556	-2,64258
Жашківський	2	-0,14365	0,035108
Звенигородський	3	-0,08104	-0,71978
Канівський	4	-1,39225	-0,05446
Катериніпольський	5	-0,98527	0,197562
Корсунь-Шевченківський	6	-1,22781	0,446697
Лисянський	7	0,507724	0,306024
Тальнівський	8	0,688488	0,653968
Уманський	9	0,313546	1,325073
Шполянський	10	0,435119	-0,27887
Черкаський	11	-0,95288	-0,19726

Для визначення відстаней між об'єктами дослідження будемо використовувати евклідову відстань. Це пов'язане з тим, що розглянуті райони перебувають у двовірному просторі (табл. 2).

Таблиця 2

Матриця евклідових відстаней між районами Черкаської області (Україна)

Позначення номера району Черкаської області	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	2,863	2,1454	3,438	3,393	3,735	2,971	3,3	4,007	2,4035	3,05
2	2,8633	0	0,7575	1,252	0,1067	1,16	0,705	1,04	1,369	0,6584	0,842
3	2,1454	0,757	0	1,47	1,288	1,636	1,183	1,57	2,083	0,6788	1,016
4	3,4378	1,252	1,4703	0	0,479	0,527	1,934	2,2	2,194	1,8411	0,462
5	3,3927	0,857	1,2881	0,479	0	0,348	1,497	1,73	1,72	1,4982	0,396
6	3,7345	1,16	1,6358	0,527	0,348	0	1,741	1,93	1,774	1,8143	0,7
7	2,9708	0,705	1,1828	1,934	1,497	1,741	0	0,39	1,037	0,5894	1,545
8	3,3016	1,037	1,5746	2,198	1,735	1,927	0,392	0	0,769	0,9666	1,849
9	4,0066	1,369	2,0826	2,194	1,72	1,774	1,037	0,77	0	1,6085	1,98
10	2,4035	0,658	0,6788	1,841	1,498	1,814	0,589	0,97	1,609	0	1,39
11	3,0503	0,842	1,0164	0,462	0,396	0,7	1,545	1,85	1,98	1,3904	0

У результаті аналізу методом деревоподібної кластеризації була отримана наступна деревоподібна діаграма (рис. 1).

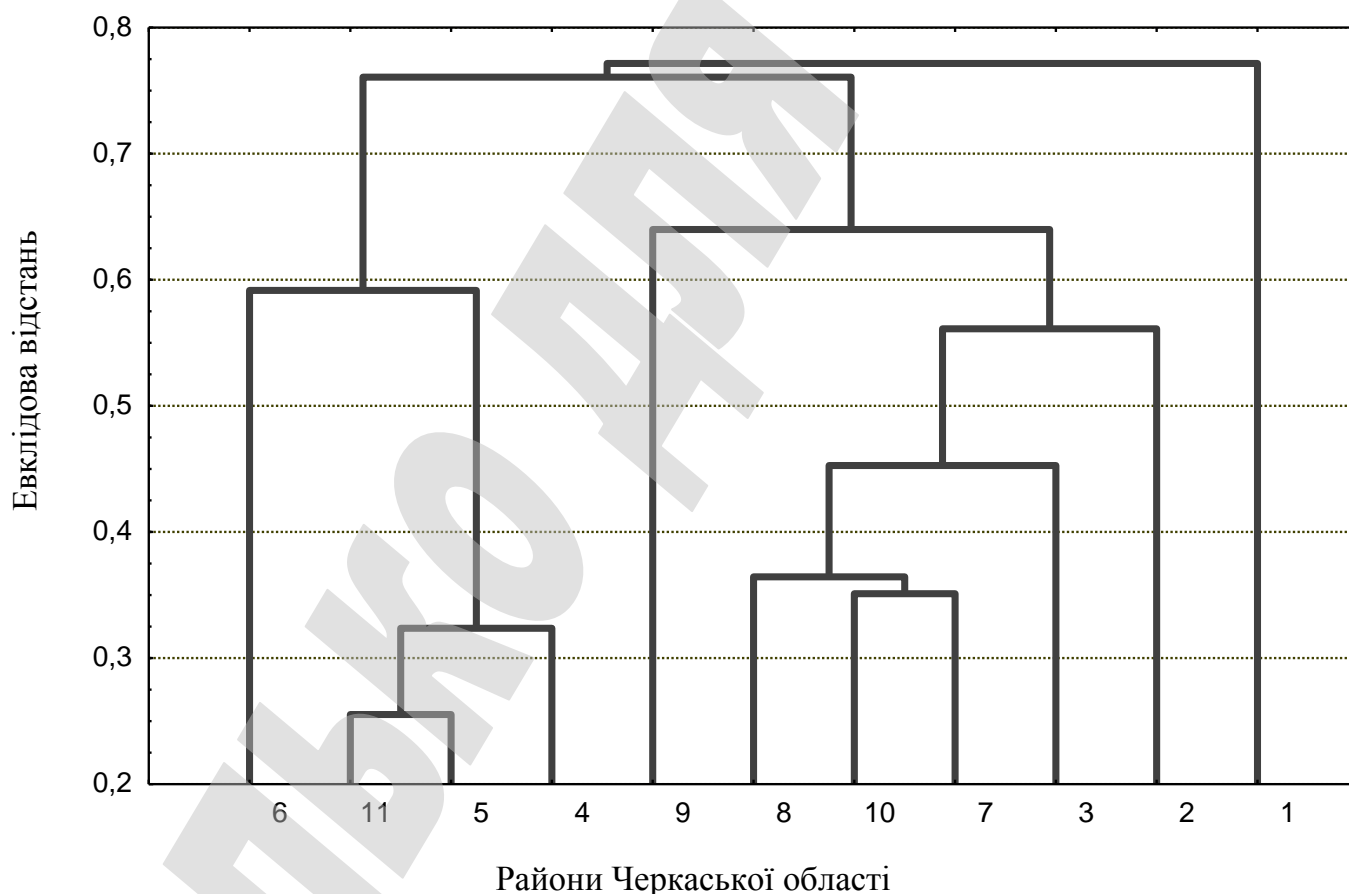


Рис. 1. Діаграма кластеризації районів Черкаської області (Україна)

З рис. 1 видно, що райони чітко розбиваються на 3 групи (табл. 3).

Таблиця 3

## Розбиття районів Черкаської області (Україна) на кластери

Номер району	Назва району	Кластер
11	Черкаський	1
6	Корсунь-Шевченківський	1
5	Катеринопільський	1
4	Канівський	1
9	Уманський	2
3	Звенигородський	2
10	Шполянський	2
8	Тальнівський	2
7	Лисянський	2
2	Жашківський	2
1	Городищенський	3

З використанням ПС представлена в наочному вигляді наступна інформація. Для відображення результатів кластерного аналізу використовувався ПС MapInfo Professional 6. Отримані результати дозволяють побудувати карти динаміки зміни групування районів Черкаської області по кластерах за 2013–2016 рр. І відповідно, наглядно оцінити зміну забруднення радіонуклідами харчових продукції у різних районах області за окремі проміжки часу (рис. 2).

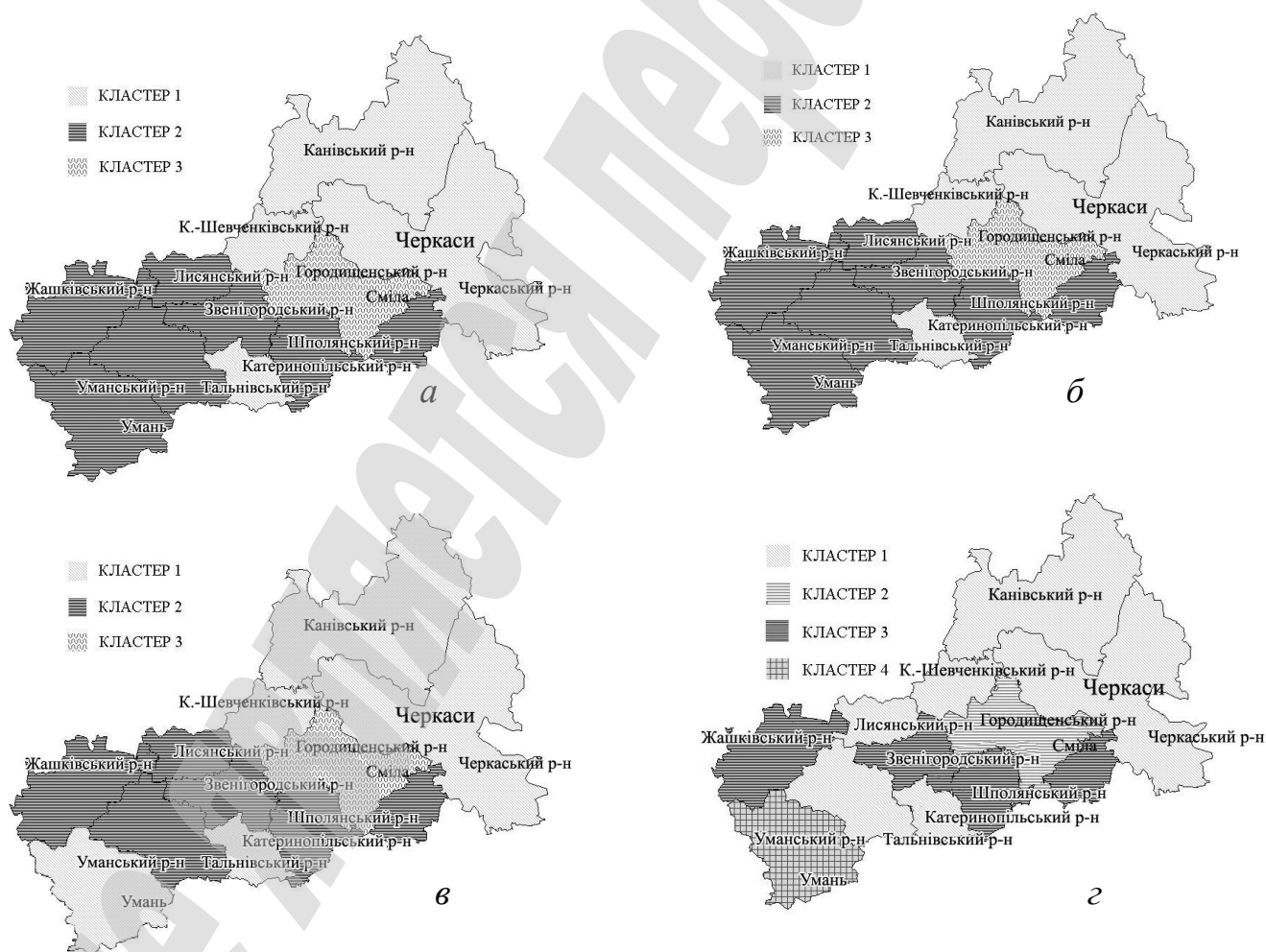


Рис. 2. Відображення динаміки кластеризації районів на картах за:  
 а – 2013 р.; б – 2014 р.; в – 2015 р.; з – 2016 р.



Розроблений програмний комплекс, з урахуванням такої бази даних представлений на рис. 3.

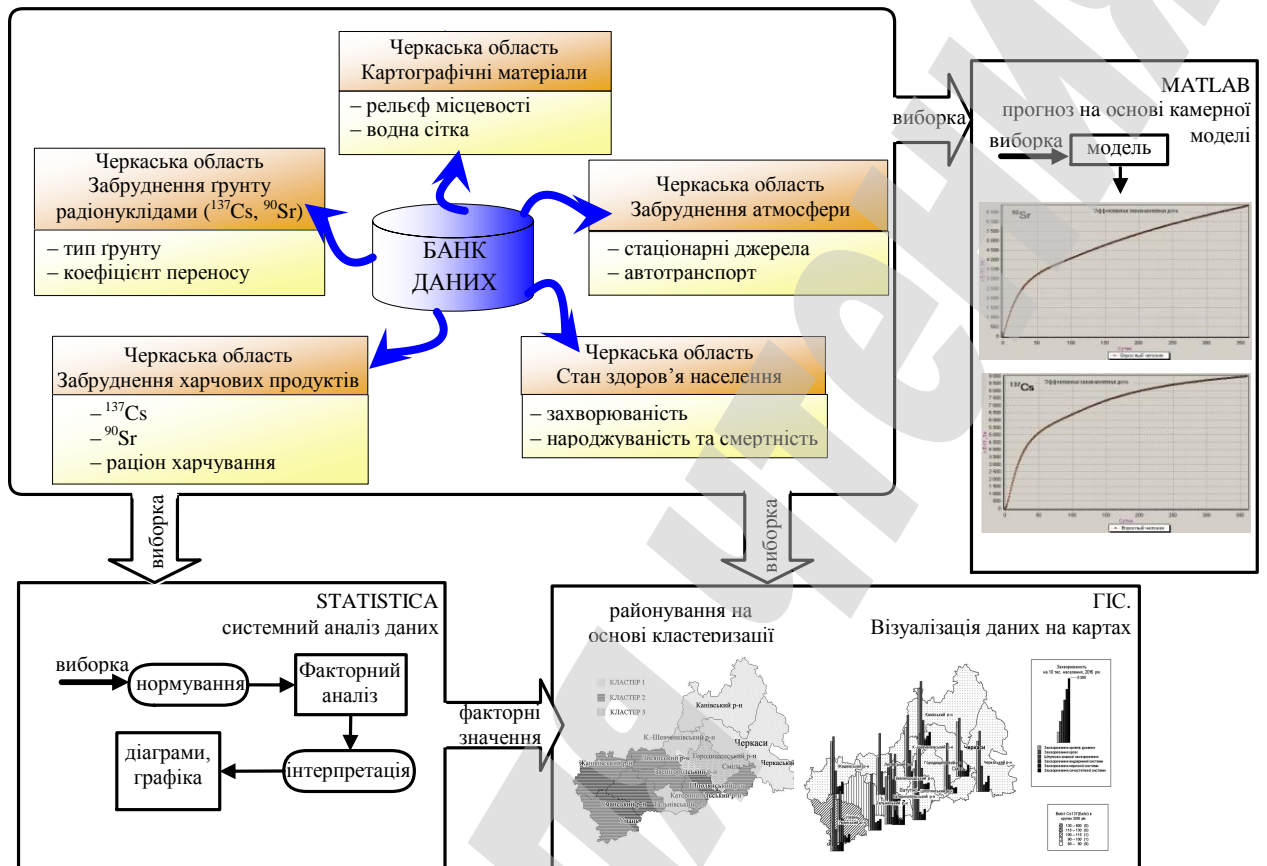
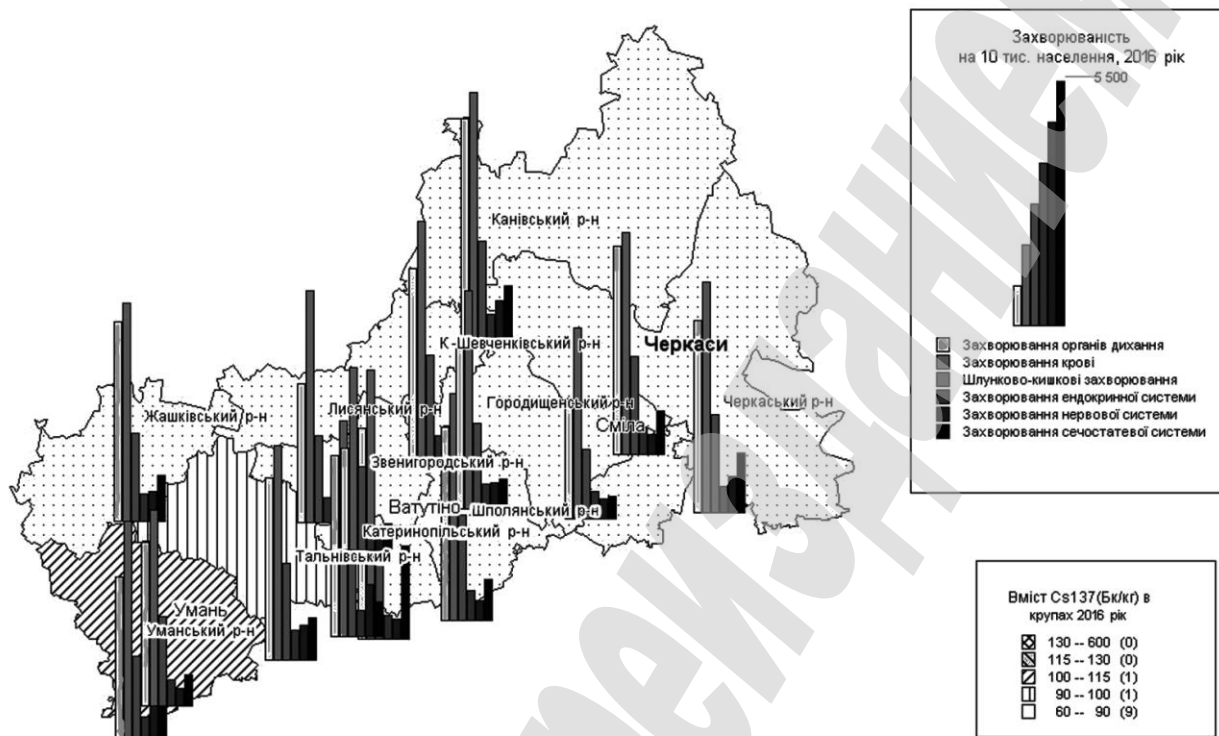


Рис. 3. Структура розробленого програмного комплексу

Наступним кроком є створення тематичних карт. Показано, що найкращим способом інтерпретації забруднення та захворювання є візуалізація даних. Це дозволяє не лише аналізувати отримані дані у зручному вигляді, а й прогнозувати забруднення на окремій території. Зафарбовуються регіони області за забрудненням основних продуктів харчування згідно введеним градаціям. По кожному району будуються стовпчикові діаграми захворюваності на 10 тис. населення – органів дихання, крові; шлунково-кишкової, ендокринної, нервової, сечостатевої систем. Як приклад, на рис. 4 зображений результат такої візуалізації.

Високий рівень забруднення об'єктів довкілля в Україні призводить до деградації екосистем, підвищення рівня захворюваності населення та погіршення демографічних показників. Ці проблеми особливо важливі для техногенно-навантажених регіонів України, у тому числі Черкаської області, яка є індустріально-розвиненою, з високим рівнем урбанізації. На території області створена потужна енергетична база, яка стала основою розвитку хімічної промисловості.



**Рис. 4.** Візуалізація даних захворюваності на фоні вмісту  $^{137}\text{Cs}$

Тому намітилася цілком обґрунтована тенденція необхідності оцінки стану забруднення довкілля не тільки традиційними фізико-хімічними методами, що встановлюють фактичні значення концентрацій різноманітних забруднювачів, але й шляхом використання методів біоіндикації. Останні, як відомо, дають відповіді на питання про загальну токсичність і мутагенність забруднених об'єктів довкілля та ступінь їх небезпеки для біоти та людини. Тобто сприяють розв'язанню низки важливих радіологічних проблем у системі сталого розвитку хімічного регіону і держави в цілому.

## 7. SWOT-аналіз результатів досліджень

*Strengths.* Розроблено спеціалізовану систему для збирання, аналізу і візуальної інтерпретації даних моніторингу контролю даних за дотриманням вимог стандартів при виробництві харчових продуктів. Ця система включає базу даних, засоби графічного представлення інформації, картографічного моделювання техногенних забруднень та забезпечує обробку даних в реальному часі.

*Weaknesses.* Існує необхідність створення окремої для кожного регіону спеціалізованої системи, що пов'язано зі специфікою харчування населення регіону та відмінними від інших регіонів, характером радіологічного забруднення.

*Opportunities.* Показано, що найкращим способом інтерпретації забруднення та захворювання є візуалізація даних. Це дозволяє не лише аналізувати отримані дані у зручному вигляді, а й більш швидко та продуктивно реагувати на зростання активності радіонуклідів  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  на будь-якому етапі від виробництва до споживання.

Ця інформація буде дуже корисною для виробників сільськогосподарської продукції, які зацікавлені не лише у збереженні значних фінансових коштів, а й у виробництві чистої сировини.

*Threats.* Від підприємства, фермерського господарства чи контролюючого органу будуть потрібні додаткові витрати для розробки бази даних радіологічного моніторингу, а також лабораторних вимірювань харчових продуктів.

## 8. Висновки

1. В результаті проведеної роботи сформовано спеціалізовану систему аналізу даних, отриманих при вимірюванні зразків харчової продукції, на відповідність вимогам стандартів на ту чи іншу продукцію. В основі даної системи знаходиться розробка бази даних харчового моніторингу Черкаської області (Україна), структура якої включає центральний банк і 5 спеціалізованих блоків. Наводяться приклади розрахунку порівняльних оцінок стану районів області, включаючи радіаційну складову. З урахуванням такої бази даних розроблений програмний комплекс, який дозволяє не лише аналізувати отримані дані у зручному вигляді, а й прогнозувати забруднення на окремій території.

2. Проведено комплексний аналіз даних моніторингу по районах Черкаської області за допомогою розроблених алгоритмічних і програмних засобів, проведено районування забруднених територій за радіологічними показниками. Досліджено кореляційні залежності між рівнями забруднення продуктів харчування  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  і захворюваністю в окремих районах для захисту інтересів споживачів, забезпечення якості експорту продукції регіону, захисту життя населення, здоров'я людини, охорони довкілля. Результати аналізу представлено у вигляді тематичних карт.

## Література

1. Konovalova N. V., Kapralov E. G. Vvedenie v GIS: textbook. Moscow, 1997. 160 p.
2. Katorgin I. Yu., Naydenko V. N., Petin O. V. Geoinformatsionnaya sistema MapInfo: textbook. Stavropol: Izd-vo SGU, 2002. 54 p.
3. Sobotovich E. V., Shestopalov V. M., Pushkarev A. V.. Printsipy landshaftno-geokhimicheskogo i radioekologicheskogo kartirovaniya territorii, zagryaznennoy tekhnogennymi radionuklidami. Dokl. AN Ukrainy. 1993. Issue 1. P. 177–181.
4. Chernobyl Digest 95–98 // Interdisciplinary Bulletin of the Chernobyl Problem Information. Issue 5. Minsk, 1999. 257 p.
5. Serdyutskaya L. F. Tekhnogennaya ekologiya. Matematiko-kartograficheskoe modelirovani. Moscow: Knizhnyy dom «LIBROKOM», 2009. 232 p.
6. Mitas L., Mitasova H. Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention // Water Resources Research. 1998. Vol. 34, Issue 3. P. 505–516. doi: <http://doi.org/10.1029/97wr03347>
7. Krivan V. Competition in di- and tri-trophic food web modules // Journal of Theoretical Biology. 2014. Vol. 343. P. 127–137. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jtbi.2013.11.020>

8. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. Technical reports series No. 472. Vienna: IAEA, 2010. 194 p.
9. Kozak I. I. Ekolohichne modeliuvannia iz zastosuvanniam prohramy STELLA. Ivano-Frankivsk: Plai, 2009. 189 p.
10. Lepicard S., Heling R., Maderich V. POSEIDON/RODOS models for radiological assessment of marine environment after accidental releases: application to coastal areas of the Baltic, Black and North Seas // Journal of Environmental Radioactivity. 2004. Vol. 72, Issue 1-2. P. 153–161. doi: [http://doi.org/10.1016/s0265-931x\(03\)00197-8](http://doi.org/10.1016/s0265-931x(03)00197-8)
11. Margvelashvily N., Maderich V., Zheleznyak M. THREETOX – A Computer Code to Simulate Three-Dimensional Dispersion of Radionuclides in Stratified Water Bodies // Radiation Protection Dosimetry. 1997. Vol. 73, Issue 1. P. 177–180. doi: <http://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a032128>
12. Metody ta zasoby matematychnoho modeliuvannia mihratsii radionuklidiv u pryrodnykh ekosystemakh: Vol. 1. Vid analizu do matematychnoi modeli / Yanchuk V. M. et. al. Zhytomyr: ZhITI, 2002. 142 p.
13. Mamikhin S. V., Merkulova L. N. Komp'yuterizatsiya issledovaniy dinamiki radionuklidov v lesnykh ekosystemakh, zagryaznennykh v rezul'tate Chernobyl'skoy avarii (1986–1995 gg.) // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. 1996. Vol. 36, Issue 4. P. 516–523.
14. Otsenka stepeni zagryazneniya pochv  $^{137}\text{Cs}$ , dopuskayushhey poluchenie normativno chistoy sel'skokhozyaystvennoy produktsii, na osnove matematicheskikh modeley perekhoda radionuklida v rasteniya / Spiridonov S. I. et. al. // Sel'skokhozyaystvennaya biologiya. 2008. Issue 5. P. 53–57.
15. Serdyutskaya L. F., Kamemeneva I. P. Sistemnyy analiz i matematicheskoe modelirovanie mediko-ekologicheskikh posldstviy avarii na CHAES i drugikh tekhnogennikh vozdeystviy. Kyiv: «Medekol» MNITS BIO-EKOS MCHS i NAN Ukrainy, 2000. P. 173.
16. Serdyutskaya L. F., Kameneva I. P. Tekhnogennaya ekologiya. Matematiko-kartograficheskoe modelirovanii. Moscow: Knizhnyy dom «LIBROKOM», 2009. 232 p.
17. Dubrov A. M., Mkhitaryan V. S., Troshin L. I. Mnogomernye statisticheskie metody. Moscow: Finansy i statistika, 1998. 232 p.
18. Khalafyan A. STATISTICA 6. Statisticheskyy analiz dannykh. Binom, 2010. 512 p.
19. Ivchenko B. P., Martyshhenko L. A. «Informatsionnaya ekologiya». Chast' 1. Otsenka riska tekhnogennykh avariyy i katastrof. Statisticheskaya interpretatsiya ekologicheskogo monitoringa. Modelirovanie i prognozirovanie ekologicheskikh situatsiy. Saint Petersburg: Normed-Izdat, 1998. 208 p.
20. Kim O. Dzh., M'yuller Ch. U., Klekka U. R. Faktornyy, diskriminantnyy i klasternyy analiz. Moscow: Nauka, 1989. 215 p.
21. Trukhacheva N. V. Matematicheskaya statistika v mediko-biologicheskikh issledovaniyakh s primeneniem paketa Statistica. Moscow: GEOTAR-Media, 2012. 384 p.