

УДК 551.52:502:519.6

## РАЦІОНАЛЬНІ МАРШРУТИ ВИЯВЛЕННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ РАДІАЦІЙНОЇ ОБСТАНОВКИ

О.Л. Вишневецький, доц., к.ф.-м.н.,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

*Анотація.* Вивчаються маршрути виявлення й оцінювання радіаційної обстановки району прямокутної форми, проходження яких вимагає найменшого часу. Розглянуто два етапи: попередній – для знаходження областей з екстремальним значенням радіації й етап докладного оцінювання району.

*Ключові слова:* радіаційне оцінювання, раціональний маршрут.

## РАЦИОНАЛЬНЫЕ МАРШРУТЫ ВЫЯВЛЕНИЯ И ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ

А.Л. Вишневецкий доц., к.ф.-м.н.,  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

*Аннотация.* Изучаются маршруты выявления и оценки радиационной обстановки района прямоугольной формы, прохождения которых требует наименьшего времени. Рассмотрены два этапа: предварительный – для нахождения областей с экстремальным значением радиации и этап подробной оценки района.

*Ключевые слова:* радиационная оценка, рациональный маршрут.

## RATIONAL ROUTES TO IDENTIFY AND ASSESS THE RADIATION SITUATION

O. Vyshnevetskyi, Assoc. Prof., Ph. D. (Phys.-Math.),  
Kharkiv National Automobile and Highway University

*Abstract.* The routes to identify and evaluate the radiation situation of rectangular areas, the passage of which requires the least time, are studied. There were regarded two stages: preliminary – for detecting areas with extreme radiation and the stage of detailed area assessment.

*Key words:* radiation survey, rational route.

### Вступ

Одним з головних завдань цивільного захисту є виявлення й оцінювання радіаційної обстановки. На момент початку виконання цього завдання радіаційна ситуація у досліджуваному районі характеризується великою невизначеністю. Тому докладне вивчення цієї ситуації вимагає великої кількості вимірів потужності еквівалентної дози (ПЕД), а значить, і великого часу. Однак як для раціонального проведення самого оцінювання радіаційної обстановки, так і для проведення

інших невідкладних дій бажано мати хоча б попередні результати цього оцінювання якомога скоріше.

Тому доцільно розбити проведення вказаного оцінювання на два етапи. На першому етапі важливо швидко (тобто використовуючи порівняно невелике число вимірів ПЕД і переміщень на місцевості) хоча б приблизно знайти найбільш безпечні (чи, навпаки, найбільш небезпечні) в радіаційному відношенні ділянки місцевості. На другому – більш докладно дослідити обрані райони.

### Аналіз публікацій

Питання про раціональний маршрут оцінювання радіаційної обстановки досліджувався в [1] та [2]. У [1] вивчалось проходження від однієї точки до іншої, з використанням складного математичного апарату (динамічне програмування), яке вимагає складних комп'ютерних розрахунків та наявності докладних відомостей попередньої радіаційної розвідки. У [2] розглянуто побудову маршруту всередині радіаційно небезпечного об'єкта (наприклад, АЕС). У цих роботах запропоновані не самі маршрути, а спосіб їх підбору.

### Мета і постановка завдання

Метою роботи є розробка конкретних маршрутів оцінювання радіаційної обстановки для відносно великого району місцевості, які не вимагають ані наявності значного обсягу попередніх даних, ані використання комп'ютерних розрахунків. Це дозволяє дуже швидко підготуватися до їх використання, що важливо у випадку несподіваної радіаційної небезпеки, особливо на початковому етапі дослідження. Відомі радіаційні аварії (Чорнобиль, Фукусіма) виникали несподівано.

### Перший етап – попереднє оцінювання

Ми не розглядаємо випадок гірської або забудованої високими будинками місцевості, коли потрібно робити декілька вимірів у точках, координати яких відрізняються лише висотою, тому вважатимемо, що вимірювання виконуються на площині.

Завдання цього етапу мовою математики полягає у знаходженні областей найменших і найбільших значень функції (рівня ПЕД), визначеної на площині, за допомогою порівняно невеликого числа вимірів значень цієї функції. Знаходження таких областей дозволить зменшити дози опромінення людей, що беруть участь у проведенні невідкладних робіт у зараженому районі (евакуація людей, проведення інших аварійно-рятувальних заходів і точнішої оцінки радіаційної обстановки тощо).

Для визначеності розглянемо завдання про знаходження областей найменших значень функції. Випадок найбільших значень розглядається аналогічно. Пропонований метод пошуку мінімуму є відомим методом

«кантування симплексу» [3–5]; у даному випадку (на площині) симплексом є правильний трикутник.

### Опис методу попереднього оцінювання

Нехай  $O$  – епіцентр зараження. Ми не вважаємо, що координати точки  $O$  відомі, проте якщо вони відомі хоча б приблизно, то процес можна прискорити. У районі, що вивчається, обираємо три точки на рівній відстані одна від одної, в яких можна виміряти функцію (рівень ПЕД). Ці три точки утворюють рівносторонній трикутник  $T1$ . Трикутник  $T1$  не повинен лежати близько до точки  $O$ . Цю вимогу легко виконати: під час руху в досліджуваній район за ходом руху вимірюється значення функції, й одну з вершин трикутника  $T1$  розташовуємо в першій точці маршруту, в якій це значення істотно (у 5–10 разів) перевищує фоновий рівень. Якщо напрямок на епіцентр  $O$  відомий (хоч би приблизно), то трикутник  $T1$  бажано «орієнтувати» в цьому напрямку. Це означає, що напрямком на точку  $O$  повинен співпадати з напрямком однієї з висот (медіан) трикутника. Довжину сторони трикутника (тобто відстань між точками) можна обирати від 10 до 200 м.

Значення функції вимірюють у вершинах 1, 2, 3 трикутника  $T1$  (рис. 1).

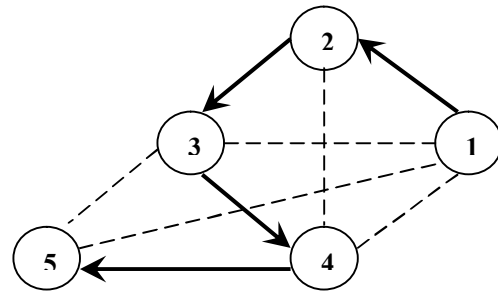


Рис. 1. Графічна схема методу пошуку мінімуму ПЕД

Нехай 2 – та з вершин, в якій отримано найбільше значення (у тому маловірогідному випадку, коли в усіх вершинах значення є однаковим, довжину сторони трикутника треба збільшити в 2–3 рази). Потім вимірюють функцію в точці 4, симетричній точці 2 відносно сторони 1–3. Якщо значення в точці 4 менше значення в точці 2, то рухаються за променем, проведеним у напрямку від точки 2 до точки 4, роблячи виміри через відстань, що дорівнює відстані від точки 2 до точки 4. Напрямок цього руху називають

напрямок градієнта функції. Цей рух триває доти, доки значення вимірів спадають. Досягши точки, в якій значення функції стане більше її значення в попередній точці, будуюмо новий трикутник T2, однією з вершин якого служить ця точка, вимірюємо функцію в його вершинах і знову рухаємося у напрямку градієнта для цього трикутника, і так далі.

Ознакою досягнення області локального мінімуму значень функції є «обертання» трикутника, що повторюються, так що рух в напрямку градієнта не починається.

Перевагою вказаного методу пошуку мінімуму є порівняно невелике число вимірів значень ПЕД і мала відстань переміщень при його реалізації, а недоліком – те, що він не гарантує знаходження найменшого у всій даній області значення ПЕД (тобто метод дозволяє знайти локальні мінімуми). Втім, його можна застосувати декілька разів у різних частинах області. Крім того, метод не працює поблизу точок мінімуму, тому дозволяє знайти не саму точку мінімуму, а трикутник, що її містить.

### Другий етап – докладне оцінювання

Розглянемо наступний етап оцінювання радіаційної обстановки, коли треба більш точно визначити рівень ПЕД у заданому районі. Це, звичайно, вимагає проведення більшої кількості вимірювань. Мета розділу – вказати їх раціональний маршрут. А саме, для заданого району оцінювання зменшити:

- 1) в першу чергу – час пересування всередині нього;
- 2) шлях пересування до цього району і від нього;
- 3) число поворотів на маршруті всередині району.

Як завжди, заданий район оцінювання розбивається на невеличкі частини («комірки»), в кожній з яких проводяться виміри ПЕД. Ми розглянемо найпростіший випадок, коли комірки є квадратами. Їх розміри, тобто довжина  $a$  сторони квадрата, визначається виходячи з того, що чим менше число  $a$ , тим точніше визначається рівень ПЕД у квадраті, але тим більша кількість вимірів потрібна. Таким чином, як  $a$  треба брати найменше число, для якого можна провести відповідну кількість вимірів ПЕД. У будь-якому разі вважаємо число  $a$  набагато меншим, ніж розміри району оцінювання.

Вимірювання ПЕД проводяться в усіх вершинах усіх квадратів; за рівень ПЕД у квадраті, як правило, беруть середнє арифметичне рівня у його вершинах. Виключенням є випадок, коли рівень ПЕД у вершинах квадрата суттєво різний. Тоді для більш точного визначення рівня ПЕД у квадраті потрібно або провести додаткові вимірювання, або за рівень ПЕД у кожній точці  $X$  квадрата взяти середнє зважене

$$\frac{y_1 k_1 + y_2 k_2 + y_3 k_3 + y_4 k_4}{k_1 + k_2 + k_3 + k_4},$$

де  $k_i = \frac{1}{d_i}$ ,  $d_i$  – відстань від точки  $X$  до  $i$ -ї вершини квадрата;  $y_i$  – рівень ПЕД у цій вершині ( $i = 1, \dots, 4$ ).

Нехай район оцінювання є прямокутником  $D$  розмірами  $b \times c$ ; нехай  $b$  – його більша сторона, тобто  $b \geq c$ . Оскільки число  $a$  вважаємо малим, порівняно з  $b$  та  $c$ , то можна вважати, що прямокутник  $D$  цілком розбитий на квадрати зі стороною  $a$ .

Позначимо через  $O$  початкову точку шляху до району розвідки,  $A$  – точку входу в район розвідки,  $B$  – точку виходу з нього. Дуже часто точка  $O$  є також кінцевою (маршрут є замкненим). Оскільки шлях  $OA+BO$  повинен займати найменшу кількість часу (наприклад тому, що він може проходити у радіаційно забрудненій місцевості), то бажано, щоб кожен зі шляхів  $OA$  та  $OB$  був найкоротшим. З цього, як правило, випливає, що точки  $A$  та  $B$  повинні співпадати. Тому важливим є випадок, коли маршрут всередині району оцінювання є замкненим.

Надалі точку  $O$  та розміри  $b \times c$  району  $D$  вважаємо фіксованими. Будемо обирати маршрут всередині району  $D$  так, щоб мінімізувати перелічені вище параметри 1–3.

Спочатку розглянемо більш простий випадок, коли маршрут всередині району оцінювання не повинен бути замкненим і точкою  $A$  входу є вершина прямокутника  $D$ . Тоді є принаймні два найкоротших маршрути проходження через вершини усіх квадратів-комірок в  $D$ : лінійний і меандровий. Вони зображені на рисунках 2 та 3; точка  $A$  є нижньою лівою вершиною прямокутника  $D$ , стрілки показують порядок проходження. На рисунках горизон-

тально розташована більша сторона  $b$  прямокутника  $D$ .

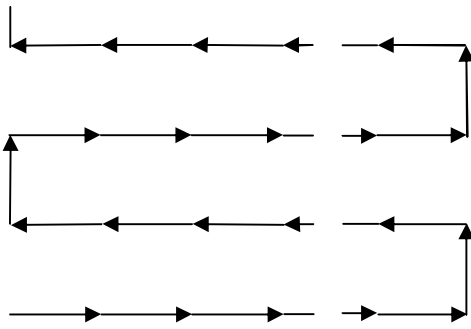


Рис. 2. Лінійний маршрут (перші 4 ряди)

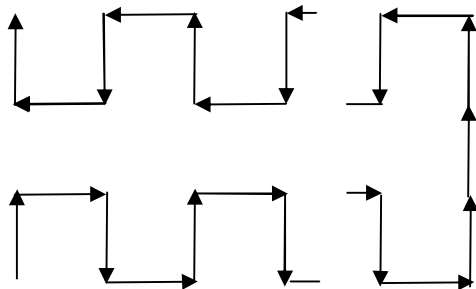


Рис. 3. Меандровий маршрут (перші 4 ряди)

Довжина кожного маршруту всередині прямокутника  $D$  дорівнює  $\frac{b \cdot c}{a}$ . Кількість точок вимірювань ПЕД (тобто вершин квадратів) дорівнює  $\frac{b \cdot c}{a^2}$ . На рисунках показано проходження маршруту по перших чотирьох горизонтальних рядах точок – вершин квадратів. Наступні ряди проходяться так само, а напрямок проходження 1–2 останніх рядів залежить від числа  $n = \frac{b}{a}$ . А саме, для лінійного маршруту напрямок проходження останнього ряду співпадає з напрямком проходження першого ряду, якщо число  $n$  є парним, і є протилежним, якщо  $n$  є непарним. Для меандрового маршруту напрямок проходження двох останніх рядів співпадає з напрямком проходження перших двох, якщо число  $n/2$  є парним, і є протилежним, якщо  $n/2$  є непарним. Таким чином, для використання тільки меандрового маршруту число  $n$  повинно бути парним. Щоб використати меандровий маршрут у випадку непарного числа  $n$ , треба останній ряд проходити лінійним способом (тобто по прямій). З викладеного вище також випливає, що комбінування лінійного та меандрового маршрутів дозволяє

завершити маршрут у будь-якій з двох верхніх (згідно рис. 2 та 3) вершин прямокутника  $D$ , без повторного проходження частини маршруту.

Порівняємо властивості лінійного та меандрового маршрутів проходження одного прямокутника  $D$ . Обидва маршрути мають однакову довжину  $nc$ . Вона є найменшою можливою, тому що не можна з'єднати між собою шляхом меншої довжини  $\frac{nc}{a}$  точок, найменша відстань між якими дорівнює  $a$ .

Лінійний маршрут містить менше поворотів. Однак меандровий маршрут дозволяє виміряти значення ПЕД у всіх вершинах кожного квадрата підряд: після чотирьох вимірювань підряд у вершинах квадрата можна зразу знайти рівень ПЕД у цьому квадраті. При лінійному ж маршруті з цих чотирьох вимірювань два виконуються при проходженні одного горизонтального ряду, а інші два – при проходженні наступного ряду. Неважко підрахувати, що майже увесь час вимірювань треба буде зберігати в пам'яті значення  $n = \frac{b}{a}$  вимірювань.

Іншу перевагу меандровий маршрут має у випадку, коли місцевість уздовж більшої сторони прямокутника  $D$  має нахили та (або) підйоми більші, ніж уздовж меншої сторони прямокутника. Це має місце, наприклад, якщо  $D$  розташований на схилі так, що рух у напрямку, паралельному стороні довжиною  $b$ , проходить на спуску чи на підйомі. Справа в тім, що майже увесь рух лінійного маршруту проходить у вказаному напрямку, і хоча спуски та підйоми будуть чергуватися, але добре відомо (і неважко перевірити), що час проходження відрізка довжини  $\ell$  зі швидкістю  $v + \Delta v$  (спуск) плюс час проходження такого ж відрізка зі швидкістю  $v - \Delta v$  (підйом) більше часу проходження відрізка довжини  $2\ell$  зі швидкістю  $v$ . Таким чином, у випадку такого розташування прямокутника  $D$  час проходження меандрового маршруту менше. Крім того, у розглянутому випадку половина сторін квадратів проходить поперек схилу, що зменшує ймовірність того, що великий нахил сторони квадрата перевищує можливості транспортного засобу, який використовується при вимірюваннях, долати спуски та підйоми. Це стосу-

ється і повітряного оцінювання обстановки у випадку сильного вітру (замість спусків буде рух за вітром, замість підйомів – рух проти вітру).

Тепер розглянемо випадок, коли маршрут повинен бути замкненим. Тоді з вершини А (з якої починається маршрут) проходимо до найближчої справа вершини С квадрата-комірки, потім так, як вказано вище, проходимо прямокутник CDEF, закінчуючи проходження у вершині F і, нарешті, проходимо відрізки FG та GA. Цей маршрут проходить через усі вершини квадратів-комірок (точок виміру ПЕД) і є найкоротшим, бо він проходить через кожен сторону комірок тільки один раз.

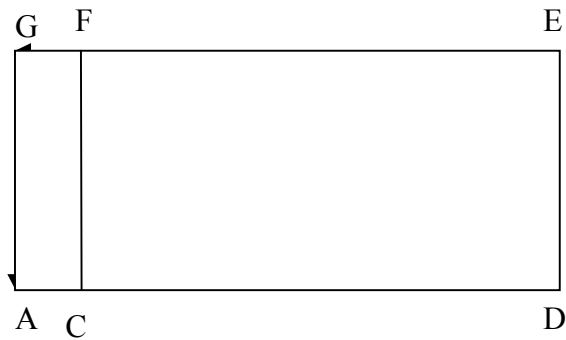


Рис. 4. Замкнений маршрут

Досі ми вважали, що точка А входу у прямокутник Д є вершиною цього прямокутника (на рис. 2 та 3 – лівою нижньою). Але через дорожні умови може статись так, що найбільш зручний (наприклад, найбільш швидкий) шлях до прямокутника Д закінчується не в його вершині, а на його стороні, тобто точка А буде на одній зі сторін Д; будемо зображати на рисунку цю сторону нижньою (швидкість досягнення області Д важлива тому, що шлях до неї може проходити у радіаційно забрудненій місцевості). Нехай відрізок АС є перпендикуляром до цієї сторони.

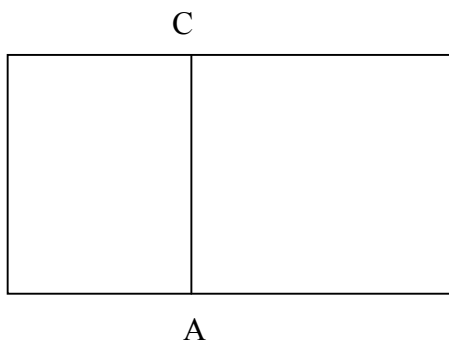


Рис. 5. Прямокутник Д

Тоді, починаючи з точки А, проходимо спочатку один із двох прямокутників, на які відрізок АС розбиває Д. Маршрут обираємо так, щоб він закінчився в точці С (як сказано вище, це завжди можна зробити шляхом комбінування лінійного та меандрового способів). Потім, починаючи з С, проходимо другий прямокутник, причому за допомогою згаданого комбінування маршрут можна завершити як у точці А, так і в С. Таким чином, оптимальний маршрут, як правило, є комбінацією лінійного та меандрового способів.

## Висновки

На першому (попередньому) етапі оцінювання радіаційної обстановки доцільно використати градієнтний метод пошуку областей з екстремальним рівнем ПЕД. На другому (докладному) етапі оцінювання – комбінування лінійного та меандрового маршрутів. Вказані маршрути мають найменший можливий шлях та практично не вимагають попередньої підготовки.

## Література

1. Виндилович В.В. Оптимизация навигационно-транспортных задач в зоне экстремального радиологического мониторинга методами динамического программирования / В.В. Виндилович // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – Вып. 4/2 (16). – С. 128–133.
2. Ташлыков О.Л. Маршрутная оптимизация радиационно опасных работ / О.Л. Ташлыков, С.Е. Щеклеин, А.Н. Сесекин // Праці Одеського політехнічного університету. – 2012. – Вип. 1(38). – С. 11–124.
3. Горский В.Г. Симплексный метод планирования экстремальных экспериментов / В.Г. Горский, В.З. Бродский // Заводская лаборатория. – 1965 – №7. – С. 831–836.
4. Семенов С.А. Планирование эксперимента в химии и химической технологии / С.А. Семенов. – М.: ИПЦ МИТХТ, 2001. – 92 с.
5. Саутин С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии / С.Н. Саутин. – Л.: Химия, 1975. – 48 с.

Рецензент: П.Ф. Горбачов, професор, д.т.н., ХНАДУ.