

**Бондаренко М.Г.**

*Інститут геохімії навколишнього середовища*

## **ВИБІР МЕТОДУ ТА ЗАСОБУ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТУ АТМОСФЕРНИМИ ВИКИДАМИ ТЕПЛОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ**

*Наведено критичний огляд існуючих методів моделювання розсіювання забруднень у атмосферному повітрі та програмних засобів, що реалізують ці методи, з точки зору можливості їх застосування для вирішення задачі оцінки накопичення забруднень у ґрунті внаслідок осадження з атмосфери*

### **Вступ**

Теплова енергетика вносить значний вклад у загальне виробництво електроенергії в Україні, близько 40% електроенергії в країні виробляється тепловими електростанціями, і у найближчі роки планується нарощувати ці потужності [13]. Вплив теплових електростанцій на навколишнє природне середовище проявляється через теплове забруднення, забруднення атмосфери внаслідок викидів димових газів; значну територію займають шлако- та золовідвали, здійснення пилу з останніх також забруднює повітря у локальних масштабах.

За оцінками, внесок теплових електростанцій (ТЕС) у забруднення атмосферного повітря в межах території України складає близько 30% [16]. Значно менш досліджені питання забруднення ґрунтів внаслідок осадження аерозольних викидів енергетичних установок. Найбільша загроза виникає при спалюванні кам'яного вугілля, викидаються значні обсяги оксидів сірки та азоту, які при взаємодії з атмосферними опадами призводять до кислотних дощів; частки золи містять важкі метали та природні радіонукліди, які можуть накопичуватись у ґрунті.

Відмітимо також, що на забруднення атмосферного повітря впливають не тільки ТЕС, ай металургійні та хімічні підприємства. У свою чергу це призводить до забруднення ґрунтів в зонах впливу цих об'єктів.

Оскільки накопичення забруднюючих речовин ґрунтом є відносно тривалим процесом, необхідно визначити, яка кількість забруднюючих речовин осіде на досліджуваній території за час роботи підприємства, і який розподіл на площі буде мати це забруднення. Тобто задача полягає в тому, щоб оцінити обсяги накопичення забруднюючих речовин у ґрунті внаслідок осадження їх з атмосферного повітря, з урахуванням гідрометеорологічних чинників впливу (роза вітрів, формування поверхневого стоку внаслідок опадів, тощо).

Один із шляхів вирішення цієї задачі — моделювання розповсюдження забруднювача у атмосфері, з врахуванням у моделі складових процесу осадження. Маючи оцінку того, яка частина забруднюючих речовин, що їх викидає підприємство, осідає на досліджуваній території, ми можемо розрахувати обсяги забруднення ґрунту за час роботи підприємства.

У даній статті наводиться аналітичний огляд існуючих методів моделювання процесів осадження атмосферних викидів на ґрунт, та програмних засобів, що найбільш коректно застосовуються для вирішення даної задачі, що здійснюється з метою обґрунтування найбільш ефективних методів прогнозного оцінювання стану забруднення ґрунтів в зонах впливу енергетичних об'єктів.

### **Вимоги до системи моделювання**

1. Масштаб, у якому модель повинна давати коректні результати, — локальний, оскільки, як відмічається, найбільш помітне забруднення ґрунту атмосферними викидами

відбувається на невеликих відстанях, близько 10 км [1, 2]. Достатньо, щоб модель працювала коректно у радіусі 20–30 км.

2. Присутність у системі моделювання можливості оцінки осадження. Далеко не кожна система моделювання має такі можливості.

3. Доступність програмного продукту для потенційних користувачів в Україні.

4. Доступність вхідних даних для моделювання.

### **Огляд існуючих підходів до моделювання та програмних продуктів на їх базі**

Задачі моделювання розповсюдження забруднюючих речовин у атмосферному повітрі розрізняють за просторовим масштабом; за часовими рамками, у яких відбувається викид і у яких проводиться моделювання; за типом джерела, та за іншими параметрами.

Масштаб, у якому необхідно розв'язати задачу оцінки розсіювання забруднюючої речовини, класифікують наступним чином:

- локальний (до 20 км);
- мезомасштаб (від 20 до 200 км);
- регіональний масштаб (від 200 до 2000 км);
- транскордонний масштаб (2000 км та більше).

За часовими рамками розрізняють

- постійний викид (нормальна робота підприємства). При цьому, обсяг викиду (г/с) може бути змінним або незмінним у часі.
- короткотерміновий, або залповий, викид.
- аварійний викид. Для оцінки наслідків аварійних викидів існують окремі методики.

Джерела забруднення прийнято класифікувати на точкові, лінійні, площинні та об'ємні:

- Точкове джерело — окреме, упізнаване джерело викиду забруднення у повітря (наприклад, викид з труби котельні). Точкове джерело має також таку характеристику, як висота над рівнем земної поверхні. Геометричних розмірів точкове джерело не має.
- Лінійне джерело — одновимірне джерело викиду забруднення у повітря (наприклад, викиди від автомобільної дороги).
- Площинне джерело — двовимірне джерело викиду; наприклад, викиди від лісової пожежі, забруднення від сміттєзвалища, або випари з великої площі пролитої рідини.
- Об'ємне джерело — площинне джерело з третьою координатою, висотою. Наприклад, викид вуглеводнів від різного обладнання на нафтохімічному заводі.

Для моделювання розповсюдження забруднень у атмосфері в теперішній час використовують такі основні підходи:

- Моделі Гаусівського факелу.
- Моделі Лагранжевої хмари.
- Моделі розсіювання, що базуються на інтегральних законах збереження у хмарі в цілому (залповий викид) або у поперечному перерізі хмари (довготривалий викид). Інша назва — моделі з зосередженими параметрами. Найбільша група — моделі важкого газу.
- Модель дифузії часток Лагранжа.
- Моделі, що базуються на чисельному розв'язанні рівнянь адвекції-дифузії.

### **Модель Гаусівського факелу**

Модель Гаусівського факелу — найдавніша (з 1947 року) з підходів до оцінки розсіювання речовини у атмосфері. У цій моделі припускається, що забруднення розповсюджується за напрямком вітру у вигляді струменя, а в поперечному розрізі струменя концентрація забруднювача має Гаусівський (нормальний) розподіл (рис. 1).

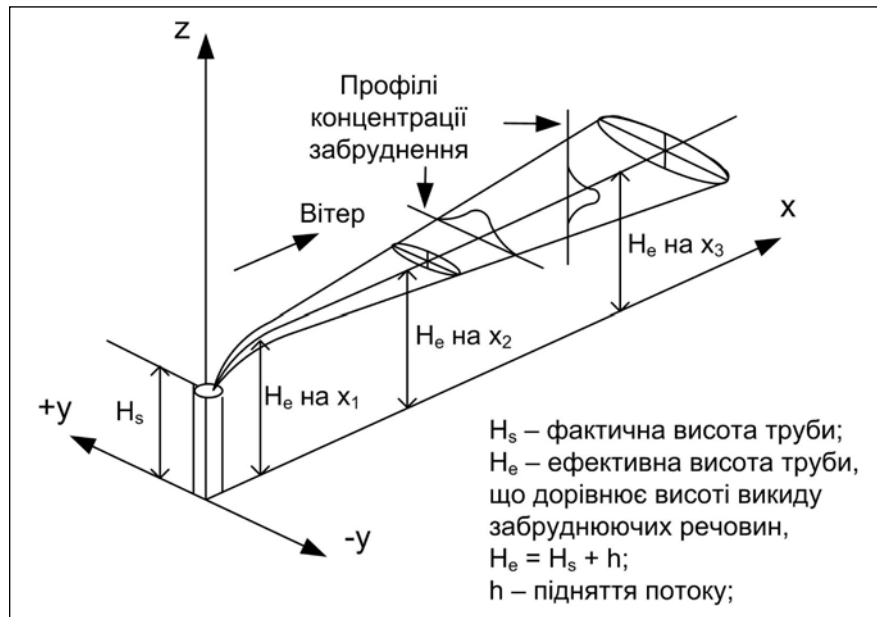


Рис. 1. Модель Гаусівського факелу

Рівняння для Гаусівської моделі дисперсії має такий вигляд:

$$C = \frac{Q}{u} \cdot \frac{f}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \cdot \frac{g_1 + g_2 + g_3}{\sigma_z \sqrt{2\pi}}, \quad (1)$$

де  $f = \exp\left[\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right]$  — параметр дисперсії у напрямку, перпендикулярному напрямку вітру;

$g$  — параметр вертикальної дисперсії,  $g = g_1 + g_2 + g_3$ :

$g_1 = \exp\left[\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right]$  — вертикальна дисперсія без відбиття;

$g_2 = \exp\left[\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right]$  — вертикальна дисперсія для відбиття від земної поверхні;

$g_3$  — вертикальна дисперсія для відбиття внаслідок інверсії у верхніх шарах атмосфери:

$$g_3 = \sum_{m=1}^{\infty} \exp\left[-(z-H-2mL)^2 / (2\sigma_z^2)\right] + \exp\left[-(z+H+2mL)^2 / (2\sigma_z^2)\right] + \exp\left[-(z+H-2mL)^2 / (2\sigma_z^2)\right] + \exp\left[-(z-H+2mL)^2 / (2\sigma_z^2)\right]$$

$C$  — концентрація забруднювача у будь-якій точці, що розташована:

$x$  метрів за напрямком вітру від джерела викиду

$y$  метрів перпендикулярно від центральної осі потоку, у горизонтальній площині

$z$  метрів від земної поверхні

$Q$  — швидкість викиду від джерела, г/с

$u$  — горизонтальна швидкість вітру вздовж центральної осі потоку, м/с

$H$  — висота центральної осі потоку забруднення відносно поверхні землі, м

$\sigma_z$  — вертикальне стандартне відхилення розподілу забруднення, м

$\sigma_y$  — горизонтальне стандартне відхилення розподілу забруднення, м

$L$  — висота від рівня земної поверхні до верхньої межі шару змішування, м

Модель Гаусівського факелу працює в стаціонарному режимі, метеорологічні параметри незмінні в часі і просторі.

Ця модель найчастіше застосовується для прогнозування розповсюдження довготривалого забруднення атмосфери від джерел, що розташовані на рівні земної поверхні або на деякій висоті. Застосування моделі обмежене локальним масштабом.

Модель Гаусівського факелу реалізована у багатьох програмних продуктах, фактично, це найбільш розповсюджена на даний час методика моделювання забруднення атмосфери.

Деякі з найбільш відомих систем моделювання, що використовують цю методику:

ОНД-86 [9] — методика розрахунку концентрацій у атмосферному повітрі шкідливих речовин, що містяться у викидах підприємств. ОНД-86 в Україні має статус затвердженої законом методики для розрахунку впливу атмосферних викидів підприємств на атмосферу, і на її базі створено кілька програмних продуктів — ЕОЛ+, АРМ ЕКО. У цій методиці модель факелу Гаусса модифікована шляхом вводу емпіричних коефіцієнтів, які враховують можливе підвищення концентрації у застійних зонах поблизу будівель та споруд. ОНД-86 не є динамічною моделлю, тобто вона дає лише річний максимум, а не динаміку концентрацій у часі. Крім того, застосування моделі обмежене локальним масштабом (до 20 км), що обумовлене самою математичною основою моделі. Розрахунок осадження у методиці і у програмних продуктах, що її реалізують, не передбачений. Згадані програмні продукти (ЕОЛ+, АРМ ЕКО) є комерційними, програмної реалізації ОНД-86, яка була б у відкритому доступі, наскільки відомо авторіві, не існує.

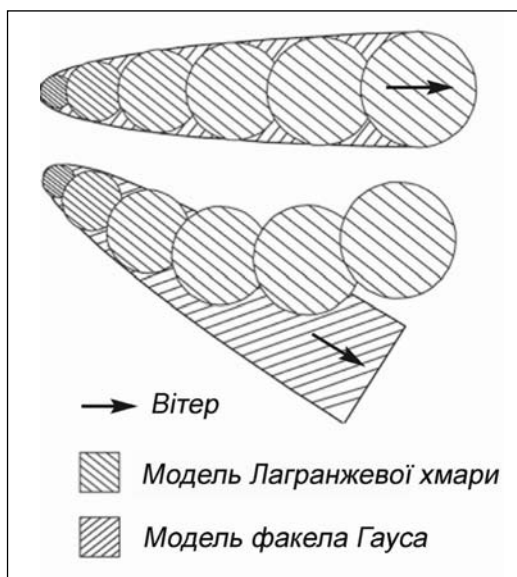
AERMOD [13,14] — система моделювання, яка розроблялась і модифікувалась з 1991 року, а з 2005 року є рекомендованою ЕРА (Агенція з захисту навколишнього середовища США, Environmental Protection Agency) методикою для оцінки впливу стаціонарних джерел забруднення на стан атмосферного повітря. Система моделювання спадкує обмеження моделі Гаусівського факелу і працює у стаціонарних умовах, дає задовільні результати у локальному масштабі. Але розробники реалізували вплив рельєфу місцевості, і нещодавно з'явилась можливість розрахунку осадження, щоправда, за документами ЕРА, ця функція моделі ще недостатньо верифікована. Система моделювання AERMOD є безкоштовною і знаходиться у відкритому доступі на сайті ЕРА за адресою [15].

### **Модель Лагранжевої хмари**

За цією методикою викид забруднюючої речовини представляється у вигляді послідовності хмар, всередині кожної з яких речовина має деякий розподіл. Такий підхід є гнучкішим, ніж принцип Гаусівського факелу, оскільки він точніше наближається до фізичної суті розсіювання речовини у атмосфері. Модель Лагранжевої хмари дозволяє моделювати процес нестаціонарний у часі та просторі, досить коректно враховувати зміну напрямку вітру, складний рельєф місцевості, хімічні трансформації речовини. Ця методика дає коректні результати при моделюванні як миттєвого або короткотермінового викиду, так і довготермінового викиду, наприклад, для сезонного чи річного циклу [11]. Застосування моделі Лагранжевої хмари найбільш виправдане, коли важливо врахувати часові та просторові зміни у метеорологічних умовах (рис. 2). Також, модель дозволяє значно краще оцінювати розповсюдження забруднювача в штільову погоду.

Системи моделювання, що базуються на принципі Лагранжевої хмари, використовують у якості вхідних даних тривимірні поля вітру та температури.

Цей клас моделей є відносно молодим порівняно з моделлю Гаусівського факелу, але вже доступні кілька програмних продуктів, що реалізують цей підхід. Дин з прикладів реалізації моделі Лагранжевої хмари — CALPUFF [10], модель створена компанією Sigma Research Corporation, яка на даний час є частиною Earth Tech Inc. і є рекомендованою ЕРА системою для оцінки впливу викидів підприємств на якість повітря [15].



**Рис. 2.** Принципова різниця в роботі наведених моделей при зміні напрямку вітру.

Система моделювання містить модулі оцінки хімічних трансформацій оксидів азоту та сірки, вплив складного рельєфу місцевості, виконує оцінку сухого та мокрого осадження. CALPUFF спочатку створювалася для моделювання у мезомасштабі — від 50 км до кілька сот кілометрів, але, як виявилось, добре підходить і для задач локального масштабу [12].

#### **Модель дифузії часток Лагранжа.**

Модель дифузії часток Лагранжа математично відслідковує частки забруднення, їх рух у атмосфері, рух часток моделюється як стохастичний процес. Для того, щоб отримати дані про концентрацію забруднювача, система моделювання підраховує статистику траєкторій великої кількості часток. Модель Лагранжа використовує рухому систему координат, разом з рухом часток від початкової точки. Образно кажучи, спостерігач у Лагранжевій моделі слідує за переміщенням забруднюючої речовини.

Головною перевагою моделі руху часток Лагранжа є те, що вона точніше за вищерозглянуті моделі імітує фізичні процеси, які задіяні у реалізації процесів розповсюдження речовини у атмосфері [3].

Внаслідок цього, такий спосіб моделювання може давати добрі результати у великому діапазоні масштабів, від локального до регіонального. Також, такі моделі добре працюють при прогнозуванні розповсюдження речовини над територією зі складним рельєфом.

Серед недоліків таких моделюючих систем слід відмітити:

- складність у користуванні. Для запуску циклу моделювання необхідно зібрати дуже велику кількість інформації. Архів метеорологічної інформації, в тому числі тривимірні поля вітру для досліджуваної території, кількість та інтенсивність опадів. Карта рельєфу місцевості, карта рослинності. Хоча деякі системи моделювання дають можливість вводу метеорологічної інформації у спрощеному вигляді, зводячи перелік вхідних даних фактично до потреб гаусівської моделі, для отримання всіх переваг моделі дифузії Лагранжа необхідно вводити максимум вхідних даних.
- великі потреби у обчислювальних ресурсах, найбільші серед розглянутих типів моделей.

Приклад програмного продукту, що реалізує даний підхід — AUSTAL 2000 [5] — є реалізацією затвердженої у ФРН методики контролю якості повітря. Модель має великі можливості, включаючи оцінку хімічних трансформацій оксидів азоту, оцінку осадження. Програмний продукт знаходиться у відкритому доступі на інтернет-ресурсі [www.austal2000.de](http://www.austal2000.de).

## Висновки

Для вирішення нашої задачі — прогнозування і діагностики накопичення у ґрунті забруднень внаслідок їх осадження з атмосфери — можна застосувати такі підходи, як модель факелу Гауса, або більш сучасну модель хмар Лагранжа чи модель дисперсії часток Лагранжа, які значно точніше відображають фізичну сутність процесу розсіювання забруднюючої речовини у атмосфері. Для будь-якого з підходів існує як мінімум один варіант програмної реалізації, що знаходиться у відкритому доступі і може бути завантажений з інтернет-ресурсів. Подальший вибір засобу моделювання може базуватись на таких параметрах, як:

- зручність інтерфейсу користувача;
- трудомісткість підготовки вхідних даних і обробки результатів;
- відповідність результатів моделювання результатам експериментальних вимірів, якщо, звісно, її вдасться оцінити.

На даний момент, ґрунтуючись на даних проведеного аналізу, для оцінки впливу викидів Бурштинської ТЕС на ґрунт прилеглих територій була обрана система моделювання CALPUFF. Зазначена програма має досить зручний інтерфейс користувача і інструменти для візуалізації отриманих результатів, а також зберігає результати моделювання у простому та зручному для подальшої обробки форматі. При використанні стаціонарних у просторі метеорологічних даних, цикл моделювання одного року роботи електростанції займає близько 10 хвилин роботи програми, значно більше часу займає підготовка даних для моделювання.

1. Карачка В. В. Вплив викидів хімічного заводу на забруднення ґрунту важкими металами // Вісник аграрної науки. — 2005. — № 6. — С. 81–83.
2. Особливості розповсюдження і поведінки важких металів у ґрунтах природних і урболандшафтів (на прикладі викидів Зміївської ТЕС) / Т.В. Козуля, А.Б. Бланк, Л.В. Глушкова // Экологические и ресурсосбережение. — 2005. — N 2. — С. 51–55.
3. Arno Graff, Federal Environmental Agency, Germany. The new German regulatory model — a Lagrangian particle dispersion model. 8th Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. pp 153–158. [http://harmo.org/Conferences/Proceedings/\\_Sofia/publishedSections/Pages153 to 158.pdf](http://harmo.org/Conferences/Proceedings/_Sofia/publishedSections/Pages153%20to%20158.pdf)
4. Методика расчета распространения аварийных выбросов, основанная на модели рассеяния тяжелого газа. А.А. Шаталов, М.В. Лисанов, А.С. Печеркин, А.В. Пчельников, С.И. Сумской. <http://safety.moy.su/load/0-0-0-39-20>
5. AUSTAL2000. Program Documentation of Version 2.4. 2009-02-03. Janicke Consulting, Dunum (Germany), Federal Environmental Agency (UBA), Berlin, Landesanstalt für Umweltschutz, Karlsruhe Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Hildesheim Landesumweltamt NRW, Essen. [http://www.weblakes.com/products/austal/resources/docs/austal2000\\_en.pdf](http://www.weblakes.com/products/austal/resources/docs/austal2000_en.pdf)
6. Статті з Wikipedia®, Air pollution dispersion terminology, Atmospheric dispersion modeling — Wikipedia, the free encyclopedia. [http://en.wikipedia.org/wiki/Air\\_pollution\\_dispersion\\_terminology](http://en.wikipedia.org/wiki/Air_pollution_dispersion_terminology)
7. Алоян А.Е. Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере / Курс лекций. — М.: ИВМ РАН, 2002. . 201 с. . ISBN 5-901854-05-5 <http://www.inm.ras.ru/library/direct2/Aloyan.pdf>
8. Modeling atmospheric deposition using a stochastic transport model. R. L. Buckley, WSRC-TR-99-O0409 <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/750120-1wuOJX/webviewable/750120.pdf>
9. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий ОНД-86. ГОСКОМГИДРОМЕТ. [http://myipeef.ru/arhive/index.php?action=downloadfile&filename=OND\\_86.doc.rar&directory=\\_literatura&PHPSESSID=pm567vo276lbul8vkjknpgm7o3](http://myipeef.ru/arhive/index.php?action=downloadfile&filename=OND_86.doc.rar&directory=_literatura&PHPSESSID=pm567vo276lbul8vkjknpgm7o3)
10. Joseph S. Scire, David G. Strimaitis, Robert J. Yamarnito. A User's guide for the CALPUFF dispersion model (version 5). Earth Tech Inc. 196 Baker Avenue, Concord, MA 01742. January 2000. [http://www.src.com/calpuff/download/CALPUFF\\_UsersGuide.pdf](http://www.src.com/calpuff/download/CALPUFF_UsersGuide.pdf)
11. Chang, J.C., M.E. Fernau, J.S. Scire, and D.G. Strimaitis. 1998. A critical review of four types of air quality models pertinent to MMS regulatory and environmental assessment missions. OCS Study MMS 98-0050. U.S. Dept. of the Interior, Minerals Management Service, Gulf of Mexico OCS Region, New Orleans, LA. 180 pp. <http://www.gomr.mms.gov/PI/PDFImages/ESPIS/3/3269.pdf>
12. Енергетична стратегія України на період до 2030 року. К.; Мінпаливенерго, 2006. — 78с.
13. AERMOD: description of model formulation. EPA-454/R-03-004. September 2004. [http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod\\_mfd.pdf](http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod_mfd.pdf)
14. AERMOD implementation guide. [http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod\\_implmnt\\_guide\\_19March2009.pdf](http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod_implmnt_guide_19March2009.pdf)
15. U.S. Environmental protection agency. Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling [http://www.epa.gov/scram001/dispersion\\_prefrec.htm](http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm)

16. В.А.Маляренко, Г.Б.Варламов, Г.М.Любчик, Ф.В.Стойберг, С.В.Широков, Л.М.Шутенко. Энергетичні установки і навколишнє середовище. За ред. проф. Маляренка В.А. Навчальний посібник. — Харків: ХДАМГ, 2002. — 398с. — Рос. мовою.

**Бондаренко М.Г. ВЫБОР МЕТОДА И СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ АТМОСФЕРНЫМИ ВЫБРОСАМИ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

*Приведен критический обзор существующих методов моделирования рассеивания загрязнений в атмосферном воздухе и программных средств, реализующих эти методы, с точки зрения возможности их применения для решения задачи оценки накопления загрязнений в почве в результате осадения из атмосферы.*

**Bondarenko M.G. CHOICE OF SIMULATION METHOD AND A TOOL FOR EVALUATION OF ATMOSPHERIC POLLUTION OF SOIL THERMAL POWER PLANT EMISSIONS**

*Critical review of the existing simulation techniques for dispersion of pollutants in the air and the software tools that implement these methods is presented in terms of their applicability to the task of assessing the accumulation of contaminants in the soil due to deposition from the atmosphere .*