

Сліпченко В.Г., Полягушко Л.Г., Трофимчук А.А.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА МОДЕЛІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РАДІАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ

Анотація: Проведено дослідження зарубіжних та вітчизняних існуючих програмних комплексів і систем в області радіаційного моніторингу довкілля та дослідження впливу радіації на здоров'я людини. Розглянуто математичні моделі для моделювання процесів під час забруднення радіонуклідами різних компонентів довкілля (атмосфери, водних та земних ресурсів) та дослідження їх впливу на стан здоров'я населення, а саме моделі атмосферної дисперсії (ATSTEP, RIMPUFF, DIPCOT, LASAT, MATCH), модель прогнозу погоди WRF-Україна, Гаусова модель, Лагранжево-Ейлерова модель атмосферного переносу радіонуклідів LEDI, модель поширення радіонуклідів в атмосфері внаслідок їх підймання з поверхні землі, модель підймання та поширення радіонуклідів в атмосфері внаслідок пожеж, тривимірний модель ТРИТОКС (водойми) тощо. Визначено шляхи потрапляння радіонуклідів в організм людини, а саме: потрапляння радіонуклідів з водою, ґрунтом, зараженими продуктами харчування, зовнішнє опромінення від ґрунту та інгаляція радіонуклідів з повітря. Проведено систематизацію програмного забезпечення за цим параметром. З'ясовано, що більшість існуючих систем не забезпечують комплексного підходу для визначення радіаційного ризику для об'єктів довкілля та стану здоров'я населення. Розглянуті системи не забезпечують оперативного надходження інформації для швидкого реагування фахівців на нештатні ситуації, оскільки вони спроектовані для роботи як локальні системи і прив'язані до робочого місця спеціалістів. Враховуючи вище зазначені недоліки актуальним є розробка системи, що буде проводити комплексну оцінку та прогнозування впливу радіоактивних речовин на здоров'я населення та надавати рекомендації для мінімізації негативного впливу.

Ключові слова: радіаційний моніторинг; радіонукліди; здоров'я населення; математичні моделі процесів забруднення довкілля; комплексний еко-енерго-економічний моніторинг.

Slipchenko V.H., Poliahushko L.H., Trofymchuk A.A.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv

SOFTWARE AND MODELS FOR RADIATION MONITORING

Abstract: The study of foreign and domestic existing software complexes and systems in the field of radiation monitoring of the environment and research on the impact of radiation on human health is conducted. Replacing mathematical models for modelling processes during the pollution by radionuclides of various components of the environment (atmosphere, water, and soil resources) and research on their impact on the state of health of the population. For example, atmospheric dispersion models (ATSTEP, RIMPUFF, DIPCOT, LASAT, MATCH), WRF-Ukraine weather forecast model, Gaussian model, Lagrange-Eulerova model of atmospheric transmission radionuclides LEDI, model of distribution of radionuclides in the atmosphere due to their lifting from the surface of the Earth, model lifting and distributing radionuclides in the atmosphere because of fires, three-dimensional model of TREETOKS (reservoirs) etc. The ways of entering radionuclides in the human body are determined, namely: to enter radionuclides with water, soil, infected food products, external irradiation from the soil, as well as inhalation of radionuclides from the air. The systematization of software under this parameter has been carried out. It has been found that most existing systems do not provide a comprehensive approach to determine the radiation risk for environmental objects and the health status of the population. Considered systems are not based on operational information receipt for rapid response to specialists in non-resistant situations, since they are designed to work as local systems and are tied to the workplace of specialists. Considering the above-mentioned disadvantages, the development of a system that will provide a comprehensive assessment and forecasting of the impact of radioactive

substances on the health of the population and to provide recommendations to minimize negative impacts.

Keywords: radiation monitoring, radionuclides, public health, mathematical models of environmental pollution processes; complex eco-energy-economic monitoring.

1. Вступ

Для прийняття ефективних управлінських рішень на рівнях державної, регіональної та місцевої влади створено систему комплексного еко-енерго-економічного моніторингу (КЕЕЕМ) [1], що розроблено на виконання Указу Президента України від 17 січня 1995 року №53/95 «Про систему прогнозування генетичного ризику впровадження нових технологій та забруднення навколишнього середовища». Система КЕЕЕМ забезпечує проведення всебічного моніторингу території експертами різних галузей, а саме: екологом, лікарем, енергетиком, економістом, юристом та аналітиком. Робочі місця експертів забезпечують здійснення спостереження за станом довкілля, досліджують антропогенний вплив та надають рекомендації щодо мінімізації ризику для здоров'я населення. Взаємодія експертів показана на рисунку 1 [2].

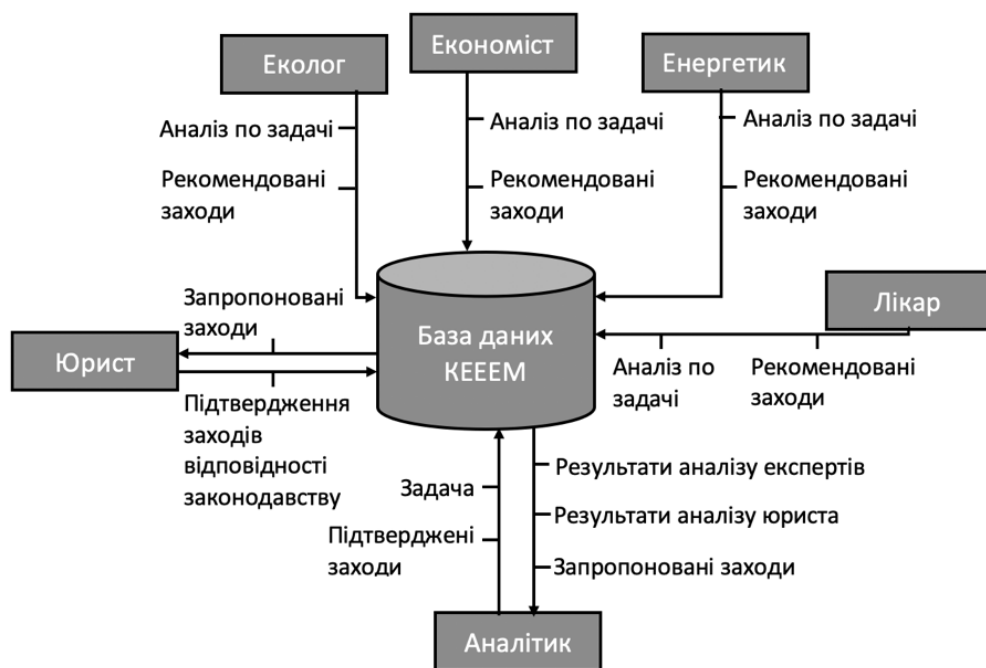


Рис. 1. Схема взаємодії експертів системи КЕЕЕМ.

Для проведення комплексної оцінки та стійкого розвитку з'явилась потреба в розробці блоку для визначення радіаційної ситуації, що забезпечує проведення комплексної оцінки радіаційного ризику для здоров'я населення. Система КЕЕЕМ розроблена по модульному принципу, тому в неї можна легко додати блок, що відповідає за радіаційний моніторинг (рисунок 2) [2].

При розробці блоку радіаційного моніторингу особлива увага приділялась радіоактивній безпеці. Беручи до уваги наслідки від катастроф на Чорнобильській АЕС, АЕС Фукусіма-1, ядерний вибух на Хіросімі й Нагасакі, можна однозначно сказати про шкоду, яку вони наносять, оскільки викиди радіоактивних речовин, які поширюються і осідають є у разі небезпечнішими за сам вибух [3]. Радіонукліди, що поширюються шарами атмосфери, осідають у ґрунті чи воді й безпосередньо впливають на екологічний стан. Особливо небезпечним є вплив радіації для організмів, оскільки її дія призводить до променевої хвороби, що часто призводить до смерті [4]. Причому важливо зазначити, що дуже небезпечною є хронічна дія радіації, яка може вражати очі, шкіру й приводити до змін організму (мутацій). Різні організми мають відмінну стійкість до радіоактивної дії, отже радіація може по різному

впливати на них. Оскільки із зростанням кількості населення й значним збільшенням попиту на електроенергію, будуються нові електростанції, у тому числі й атомні. Тривале проживання на таких територіях може серйозно вплинути на людину та її здоров'я [5]. Тому сьогодні актуальним є розробка та використання програмного забезпечення, що дозволяє стежити за радіаційним станом та його зміною, аналізувати поточний стан й моделювати можливі ситуації, щоб підготуватись і приймати правильні рішення.

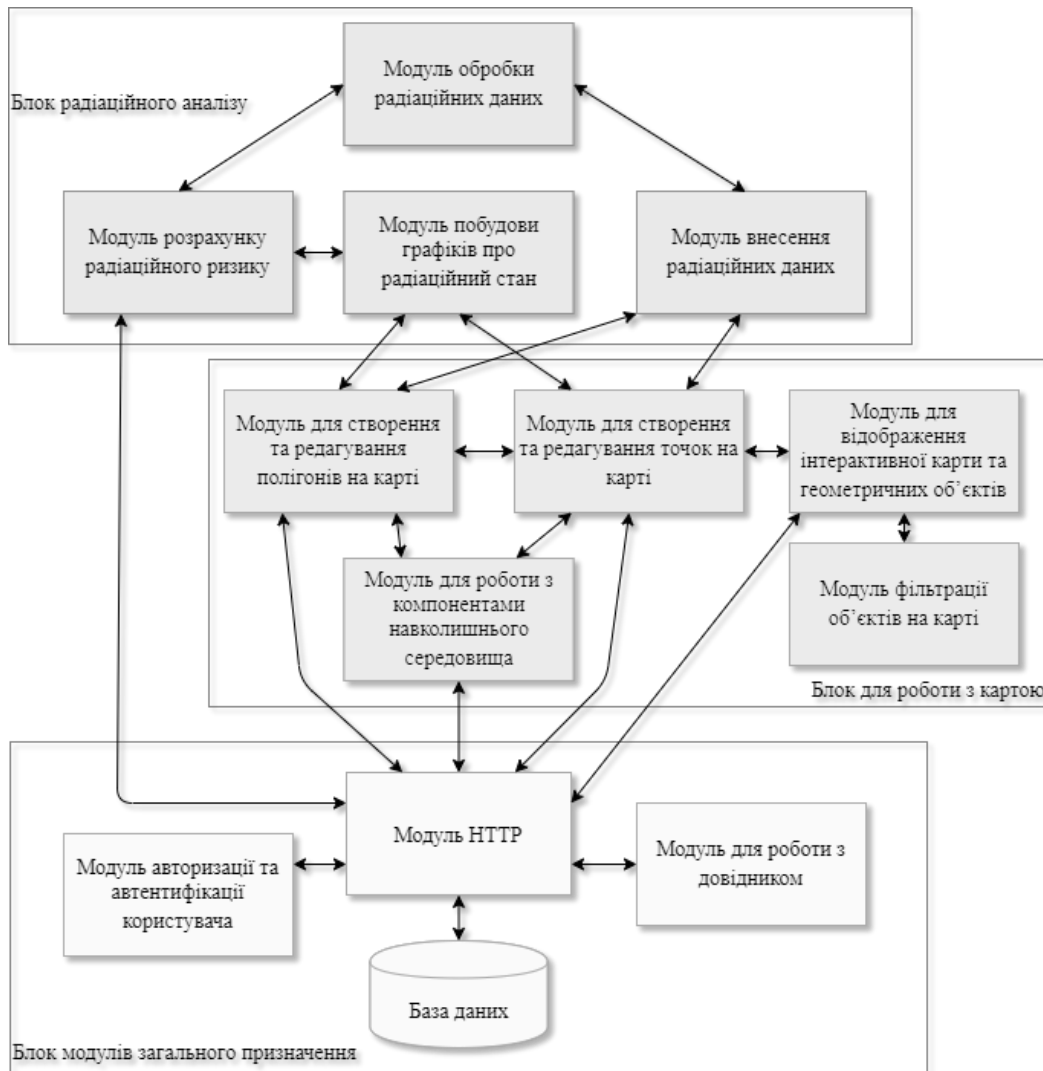


Рис. 2. Модулі КЕЕЕМ, що взаємодіють з блоком радіаційного моніторингу.

2. Аналіз досліджень і публікацій.

Радіаційний моніторинг проводиться з використанням сучасних інформаційних технологій і найбільш популярними є наступні програмні системи та комплекси: програмне забезпечення (ПЗ) «NOSTRADAMUS», ПЗ «RECASS NT», програмний комплекс «КАССАНДРА», ПЗ «ДОЗА», комплекс «SULTAN», Програмний комплекс для оцінювання та прогнозування радіаційної ситуації в Чорнобильській зоні відчуження (ЧЗВ) та система RODOS.

Програмне забезпечення «NOSTRADAMUS» [6] призначене для автономного й оперативного прогнозування радіаційного стану в умовах викиду радіоактивних речовин при аваріях на атомних електростанціях й інших ядерних об'єктах. Особливістю цієї системи є можливість введення джерел довільної форми (точкові, плоскі, об'ємні) й конфігурації, зі змінними у часі параметрами, та обчислення розповсюдження радіонуклідів на відстані у

десятки або сотні кілометрів. При розрахунках враховуються такі фактори, як рельєф місцевості, неоднорідність і тимчасові зміни вітрового поля, опади в зоні поширення радіоактивного сліду. «NOSTRADAMUS» був успішно використаний при оцінці та прогнозуванні радіаційного стану після аварії на японській АЕС «Фукусіма Даїчі» у березні 2011 року. Було показано, що атмосферні викиди радіонуклідів з аварійних блоків АЕС не несуть небезпеки для населення. Ця інформація дозволила оптимізувати проведення захисних дій представниками міністерства надзвичайних ситуацій країни.

ПЗ «RECASS NT» створена для допомоги при прийнятті рішень у ситуаціях виникнення радіаційних аварій. Характеризується обновлюваним банком прогнозованих та актуальних метеорологічних даних по всій земній поверхні, що дозволяє оперативно підготовлювати прогнози у випадку аварій на будь-якому об'єкті, а також можливістю підключення приборів для зняття даних на місці. Ця база даних постійно оновлює інформацію щодо даних постів метеорологічних спостережень та систем моніторингу. Робота із системою передбачає заповнення певного сценарію, що обробляється і результат повертається користувачу. «RECASS NT» є програмно-технічним комплексом, що дає можливість інтегрувати обладнання й пристрої із програмним забезпеченням [6, 7].

Програмний комплекс «КАССАНДРА» [6] спроектований для прогнозування радіонуклідного забруднення водою. Його особливістю є можливість виявлення незаконно діючих джерел випромінювання, які використовують складні алгоритми передачі інформації. Для точної локалізації джерела випромінювання, у комплект комплексу входить ортогональний індикатор ближнього поля, що не реагує на сильні віддалені поля й відбиті сигнали. Використання спеціальних алгоритмів зменшують ймовірність фальшивої тривоги. Комплекс має блочну структуру, що дозволяє включати додаткові моделі річок та водоймищ. Він інтегрований на базі ГІС-технологій з моделями атмосферного переносу радіонуклідів, отримуючи від нього вхідні дані про випадання радіоактивних речовин у водні об'єкти й може виконувати розрахунки з різними рівнями деталізації вхідних даних з забезпеченням можливості оперативної оцінки наслідків радіоактивного забруднення водних об'єктів при наявності обмеженої інформації про водойму. Також масогабаритні характеристики комплексу дозволяють використовувати його як у стаціонарному, так і у мобільному варіантах.

ПЗ «ДОЗА» [6] застосовується для розрахунку доз опромінення при аваріях на атомних станціях і вирізняється великим каталогом пристроїв, що покращують якість моніторингу. Дане програмне забезпечення дозволяє розрахувати дози зовнішнього опромінення від радіонуклідів, що знаходяться у радіоактивній хмарі та на поверхні землі і внутрішнього опромінення від радіонуклідів, що потрапляють у організм людини з повітрям чи під час вживання продуктів харчування. Комплекс дає можливість інтеграції з великим спектром пристроїв для покращеного радіоактивного моніторингу.

ПЗ «SULTAN» [6] створено для оперативного прогнозування радіаційного стану у випадку аварії на АЕС з метою підтримки рішень щодо впровадження захисних дій. Дозволяє розраховувати дозу зовнішнього опромінення від радіоактивної хмари та від радіоактивних викидів на місцевості, а також очікувану отриману дозу на щитовидну залозу для персоналу в різних вікових групах населення за рахунок вдихання радіоізотопів йоду. Характеризується тим що, розрахунок аварійної дози опромінення населення може виконуватись за допомогою спеціальних функцій, що пов'язують дозу від усіх радіонуклідів з дозою тільки від І (йод).

Вітчизняною розробкою для проведення радіаційного моніторингу є Програмний комплекс для оцінювання та прогнозування радіаційної ситуації в Чорнобильській зоні відчуження (ЧЗВ) [8], що виконано в Інституті проблем безпеки АЕС НАН України в рамках співпраці з корпорацією «Укратомприбор» на замовлення Державного спеціалізованого науково-промислового підприємства «Екоцентр». Комплекс призначений для визначення об'ємної та поверхневої концентрації радіонуклідів в зоні ЧЗВ, доз зовнішнього та внутрішнього (за рахунок інгаляційних надходжень) опромінення персоналу ЧЗВ і населення поряд з її границями. Комплекс може використовуватися при нормальних умовах та при

аварійних ситуаціях на радіаційно небезпечних об'єктах і екстремальних погодних умовах.

Система RODOS [9] є розробкою Європейського Союзу, що використовується у 20 європейських країнах. З 2011 року система впроваджується в Україні за підтримки ЄС і вже встановлена на всіх АЕС, в тому числі Чорнобильську АЕС та ЧЗВ. Система використовується для моделювання і прогнозування потенційних наслідків надзвичайних ситуацій, а також планування ефективного реагування на них. В Україні систему адаптовано для оцінки радіологічних ризиків, пов'язаних з пожежами в радіоактивно забруднених лісах, проходження смерчів через зону відчуження і повеней на річці Прип'ять в районі водойми-охолоджувача ЧАЕС. Також «RODOS» дозволяє провести детальний розрахунок прогнозу напрямку руху потенційно забруднених хмар вздовж північних кордонів України. Нова версія системи написана на основі мови Java та отримала назву JRODOS [10].

3. Мета дослідження. Метою роботи є аналіз та представлення комплексного огляду моделей радіаційного моніторингу і шляхів потрапляння радіонуклідів в організм.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати існуюче програмне забезпечення для моніторингу забруднення радіонуклідами довкілля
- дослідити моделі, що використовуються в системах та комплексах для моніторингу забруднення радіонуклідами довкілля;
- систематизувати програмне забезпечення по шляхам потрапляння радіонуклідів в організм людини.

4. Результати дослідження.

Хоч ці системи і спроектовані для спостереження за радіаційним станом довкілля, вони у значній мірі відрізняються моделями, що використовуються при радіаційному моніторингу довкілля [11]. У таблиці 1 наведені моделі і методи, що використовуються кожною із систем.

Таблиця 1.

Моделі розрахунків

Назва системи	Модель
«NOSTRADAMUS»	Лагранжево-стохастична
«RECASS NT»	Модель атмосферної дисперсії: RIMPUFF.
«КАССАНДРА»	Двокамерна модель міграції
«ДОЗА»	Моделі, що базуються на Гаусовій моделі розсіювання
«SULTAN»	Гаусова модель розсіювання; камерна модель розрахунку доз опромінення
Програмний комплекс для оцінювання та прогнозування радіаційної ситуації в Чорнобильській зоні відчуження	Лагранжево-ейлерова модель атмосферного переносу радіонуклідів LEDI; модель поширення радіонуклідів в атмосфері внаслідок їх підймання з поверхні землі; модель підймання та поширення радіонуклідів в атмосфері внаслідок пожеж
«RODOS»	Моделі атмосферної дисперсії: ATSTEP, RIMPUFF, DIPLOT, LASAT, MATCH; тримірна модель ТРИТОКС (водойми); модель прогнозу погоди WRF-Україна (поля вітер)

«NOSTRADAMUS» використовує Лагранжево-стохастичну модель розповсюдження радіонуклідів у атмосфері. Ця модель потребує значно більше обчислювальних потужностей і часу для розрахунків, ніж Гаусова модель [12].

«RECASS NT» [13] базується на мезомасштабній моделі атмосферної дифузії RIMPUFF [14], що призначена для прогнозування розповсюдження забрудненої речовини при викидах від одного чи декількох джерел змінної потужності. Моделі атмосферного переносу

дозволяють моделювати забруднення атмосфери і поверхонь аварійними викидами та включають моделювання параметрів приземного і граничного шарів атмосфери та моделювання процесу переносу і розсіювання домішок у атмосфері. На основі розрахунку доз на карті місцевості відображаються території з різними рівнями впливу радіоактивних чи небезпечних хімічних речовин на населення, а також зони, у яких рекомендується застосувати захисні заходи з урахуванням оптимальних термінів їх виконання для конкретних населених пунктів.

У програмному комплексі «КАССАНДРА» використовуються двокамерні (водна маса / шар донних відкладів) моделі міграції радіонуклідів у водних об'єктах. У першій камері розглядаються розчинені у воді і сорбовані на суспензії радіонукліди, у другій – радіонукліди, сорбовані безпосередньо у донних відкладеннях. Модель водойми враховує надходження радіоактивних речовин у водний об'єкт за рахунок разових чи постійних викидів, основні процеси міграції радіонуклідів, пов'язаних з сорбцією чи десорбцією, осіданням забрудненої суспензії, а також проточність і втрати води у водоймі, пов'язані з випаровуванням й фільтрацією. Модель річки додатково враховує адвективне перенесення і турбулентну дисперсію.

ПЗ «ДОЗА» використовує для своїх розрахунків моделі, що базуються на Гаусовій моделі розсіювання, що дають достатню точність на відстані десятки кілометрів. Метод чисельного інтегрування, застосований у «ДОЗА» забезпечує похибку не більше 0,1%. Ця методика дозволяє проводити розрахунки розповсюдження радіонуклідів в оточуючому середовищі, розрахунок дози зовнішнього опромінення від хмари ти поверхні землі й дози внутрішнього опромінення при інгаляції і вживанні продуктів харчування, базуючись на використанні коефіцієнтів переходу по харчовим ланцюгам та бази даних по дозових коефіцієнтах [15, 16].

Аналогічно програмне забезпечення «SULTAN» використовує Гаусову модель розсіювання, а також камерну модель розрахунку доз опромінення. Використані алгоритми розрахунку поля приземної об'ємної активності радіонуклідів базуються на двох нормативних Гаусових методиках для моделювання розповсюдження речовини у атмосфері. Перша методика використовується для поперечної і вертикальної дисперсії та використовує формули Сміта-Хоскера, а друга – з використанням формул Сміта-Хоскера і Брігса. У результаті розрахунку визначається перелік населених пунктів, у яких необхідно проведення невідкладних мір захисту [16, 17].

У програмному комплексі для оцінювання та прогнозування радіаційної ситуації в ЧЗВ реалізовано три моделі, кожна з яких призначена для розрахунку викидів в атмосферу від різних джерел. Для розрахунків поширення радіонуклідів в атмосфері від висотних точкових або об'ємних джерел (вентиляційні труби чи будівлі) використовується Лагранжево-Ейлерова модель атмосферного переносу радіонуклідів LEDI [18]. Ця модель використовує поєднання Лагранжевого і Ейлерового методу опису розповсюдження частинок, що дозволяє мінімізувати затрати часу на розрахунки. На основі Лагранжевого методу розраховується горизонтальна траєкторія розповсюдження домішок. Розрахунок вертикального профілю концентрації реалізовано за допомогою одномірного напівемпіричного рівняння турбулентної дифузії, що враховує вертикальну турбулентну дифузію, гравітаційне осідання домішок, сухе та вологе осідання домішок, вертикальний рух повітря синоптичного масштабу та зміну кількості домішок в атмосфері. При цьому вертикальний профіль коефіцієнта турбулентності параметризовано відповідно до теорії подібності Моніна-Обухова, а розрахунок розповсюдження концентрації домішок в поперечному напрямі параметризовано як сума вкладів горизонтальної турбулентної дифузії і розширення струменю домішок за рахунок взаємодії повороту повітря з турбулентністю в пограничному шарі атмосфери [9]. Модель поширення радіонуклідів в атмосфері внаслідок їх підймання з поверхні землі реалізована на основі Гаусової моделі струменя від точкового висотного джерела (модель МАГАТЕ) [19], що узагальнена для випадків розповсюдження тяжких домішок. Для моделювання атмосферного переносу радіонуклідів при лісових пожежах на території ЧЗВ використовується комплекс

моделей, що описують піднімання та розповсюдження аерозольних частинок для різних режимів формування полів повітряних потоків над територією пожежі – конвекційний (при швидкості вітру до 4 м/с) та неконвекційний (при швидкості вітру більше за 4 м/с) [9].

Математичні моделі JRODOS, розроблені більш ніж в 20 європейських інститутах, використовують інформацію систем станційного радіологічного моніторингу, оперативних метеорологічних прогнозів або сценаріїв розвитку гідрометеорологічної ситуації для прогнозування міграції радіонуклідів в повітряному середовищі, випадіння на водозбори, транспорту радіонуклідів водними потоками і їх міграції в сільськогосподарської продукції, в природних екосистемах для розрахунку доз внутрішнього і зовнішнього опромінення персоналу та населення в зоні аварії [20]. У системі використовуються наступні моделі атмосферної дисперсії: ATSTEP, RIMPUFF, DIPCOT, MATCH.

ATSTEP – це Гаусова модель для діагностики та прогнозування атмосферного розсіювання, осадження, гамма-випромінювання та доз викинутої радіоактивності у разі аварій на атомних електростанціях. Призначена для дистанцій до 50 км. Перевага велика швидкість проведення розрахунків [21].

RIMPUFF (RIsø Mesoscale PUFF model) – це мазомасштабна Лагранжова паф-модель. Призначена для розрахунку концентрації та доз, що виникають в результаті дисперсії повітряно-крапельних матеріалів та може до однорідної і до неоднорідної місцевості з помірним рельєфом у горизонтальному масштабі до 50 км, реагує на зміну (нестационарну) метеорологічних умов. Вона враховує початкові параметри дисперсії та відрізняється стабільною роботою [15].

LASAT (LAgrange Simulation of Aerosol Transport) – це комбінована Лагранжева паф-модель та модель блукаючих часток, використовує затверджену методику розрахунку доз опромінення [22].

DIPCOT (DIspersion over COmplex Terrain) – це комбінована Лагранжева паф-модель та модель блукаючих часток, що враховує нерівномірність рельєфу, але не враховує початкові параметри дисперсії [23].

MATCH (Masoscale Atmospheric Transport and CHemistry model) – це мезомасштабна Ейлерова модель далекого перенесення, використовується для задач глобального перенесення радіонуклідів у глобальному масштабі на відстані до десятків тисяч кілометрів, має обмежену кількість хронологічних інтервалів для опису джерела викиду [24]. Ця модель була адаптована до системи RODOS, що використовується в Україні.

Також наступні моделі були адаптовані та верифіковані в Україні:

Тримірна модель ТРИТОКС для опису міграції радіонуклідів в водоймах, складається з наступних підмоделей: гідродинаміки, перенесення зважених насосів і перенесення радіонуклідів. Гідротермодинаміка описується в рамках тривимірної нестационарної негідростатичної моделі. Її прогностичними змінними є три компоненти швидкості, температура, солоність і піднесення вільної поверхні. Перенесення наносів описується адвективно-дифузійним рівнянням з членом типу «джерело-стік», що описує каламучення і осадження суспензій. Зміна товщини верхнього шару донних відкладень описується рівнянням деформації дну. Рівняння переносу радіонуклідів моделюють поширення радіонуклідів в трьох фазах: у розчині, на зважених наносах і в донних відкладеннях. Обмін між цими фазами представлений в рівняннях членами, що описують процеси адсорбції-десорбції та каламучення-осадження. Рівняння моделі ТРИТОКС інтегруються чисельно за допомогою кінцево-різницевого методу [25, 26].

Мезомасштабна метеорологічна модель WRF (The Weather Research and Forecasting model) була адаптована для прогнозування полів вітру навколо РАЕС [27]. WRF - негідростатична метеорологічна модель, що описує найрізноманітніші фізичні процеси, такі як: адвективне перенесення метеорологічних полів вітром, внутрішні і звукові хвилі, турбулентне перемішування, мікрофізичні процеси в хмарах, процеси випромінювання і розсіювання інфрачервоного і ультрафіолетового випромінювання, процеси теплопереносу в верхньому шарі ґрунту [28].

Напрямки моніторингу цих систем наведено у таблиці 2.

Таблиця 2.

Напрямки моніторингу систем

	Земля	Вода	Атмосфера
«NOSTRADAMUS»	+		+
«RECASS NT»	+	+	+
«КАССАНДРА»		+	
«ДОЗА»	+		+
«SULTAN»	+		+
Програмний комплекс для оцінювання та прогнозування радіаційної ситуації в Чорнобильській зоні відчуження			+
«RODOS»	+	+	+

Як видно із таблиці, майже всі системи дозволяють проводити радіаційний моніторинг землі й атмосфери, а на водних ресурсах фокусується програмний комплекс «КАССАНДРА». Найбільший спектр покривають ПЗ «RECASS NT» та «RODOS», так як дозволяє спостерігати за радіаційним станом земних і водних ресурсів та атмосферою. Важливо зазначити, що це можливо завдяки можливості інтеграції системи з різним обладнанням і пристроями для спостереження, які надає компанія-виробник. Це дозволяє масштабувати весь комплекс і проводити більш детальний моніторинг. Такі можливості надаються і у системах «КАССАНДРА» та «ДОЗА».

Спільною ознакою цих систем є задача моніторингу радіаційного стану для аналізу, прогнозування можливих наслідків зараження та підтримка рішень у ситуаціях виникнення радіоактивних ситуацій. Також ці системи, крім «RODOS», в основному спроектовані для роботи з операційною системою Microsoft Windows, що робить неможливим їх кросплатформне використання. Загальна схема роботи цих систем зображена на рисунку 3. На основі вхідних даних, розраховуються показники і метрики, що дозволяють відобразити результати й створити рекомендації щодо захисних заходів для територій, що підлягають ризику радіаційного забруднення.

Для представлення результатів обчислень у системах використовуються таблиці, графіки, діаграми й візуальне зображення на карті результатів викидів (так звані «хмари»). Системи «NOSTRADAMUS», «RECASS NT», «КАССАНДРА», Програмний комплекс для оцінювання та прогнозування радіаційної ситуації в ЧЗЗ, «RODOS» дозволяють представляти результати розрахунків на карті, що значно спрощує аналіз ситуації та дозволяє приймати рішення щодо захисних дій базуючись на територіях, що підлягають ризику радіаційного зараження. По закінченню розрахунку можна переглянути графічні часові залежності обраних функцій у ряді точок чи їх залежності від відстані та кута. Також передбачені різні типи вихідних текстових файлів для самостійної обробки за допомогою інших стандартних програмних продуктів.

Оскільки ці системи створені для радіаційного моніторингу, вони надають можливість розрахунку доз внутрішнього і зовнішнього опромінення людини різними шляхами. Порівняльна таблиця 3 демонструє розрахунок доз опромінення залежно від шляху потрапляння радіонуклідів в організм людини.



Рис. 3. Схема роботи систем в області радіаційного моніторингу.

Таблиця 3.

Розрахунок доз залежно від способу потрапляння радіонуклідів

	Радіоактивна хмара	Забруднена територія	Інгаляція	Вода	Продукти
«NOSTRADAMUS»	+	+	+		
«RECASS NT»	+	+	+		
«КАССАНДРА»				+	
«ДОЗА»	+	+	+		+
«SULTAN»	+	+	+		
Програмний комплекс для оцінювання та прогнозування радіаційної ситуації в Чорнобильській зоні відчуження			+		
«RODOS»		+	+	+	+

«NOSTRADAMUS», «SULTAN» та «RECASS NT», Програмний комплекс для оцінювання та прогнозування радіаційної ситуації в ЧЗВ розраховують зовнішнє опромінення від радіоактивної хмари, забрудненої території та внутрішнє опромінення інгаляційним шляхом. «КАССАНДРА» дозволяє розраховувати дозу радіоактивного опромінення населення від користування водою. ПЗ «ДОЗА» у порівнянні з «NOSTRADAMUS» та

«RECASS NT» додатково ще дозволяє розраховувати дози опромінення від вживання продуктів харчування. У системі «RODOS» при моделюванні впливу на здоров'я населення враховуються такі шляхи потрапляння, як вдихання, потрапляння на шкіру, споживання забруднених продуктів харчування тощо [29].

5. Висновки

Проведено аналіз існуючих програмних комплексів та систем в області радіаційного моніторингу та впливу радіації на здоров'я людини.

Розглянуто математичні моделі для моделювання процесів під час забруднення радіонуклідами різні компоненти довкілля (атмосферу, водні та земельні ресурси) та дослідження їх впливу на стан довкілля та здоров'я населення.

Розглянуто шляхи потрапляння радіонуклідів в організм людини, а саме: потрапляння радіонуклідів з водою, ґрунтом, зараженими продуктами харчування, зовнішнє опромінення від ґрунту та інгаляція радіонуклідів з повітрям, а також систематизовано програмне забезпечення за цим параметром.

Визначено, що на сьогодні не існує системи, що комплексно враховувала би всі шляхи радіаційного впливу, тому є актуальним розробка системи, що буде проводити комплексну оцінку та прогнозування впливу здоров'я населення та надавати рекомендації для мінімізації цього впливу. Ця система інтегрована в якості блоку в систему КЕЕЕМ, що дозволило розширити можливості системи та забезпечило більш ефективне прийняття управлінських рішень.

Список використаної літератури:

1. Сліпченко В.Г., Полягушко Л.Г., Круш О.Є. Система комплексного еко-енерго-економічного моніторингу для оптимізації управлінських рішень (області, району та міста). *Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 4(268), 2021. С. 13-20. DOI: 10.33216/1998-7927-2021-268-4-13-20.
2. Сліпченко В.Г., Полягушко Л.Г., Трофимчук А.А. Веб-система для визначення радіаційної ситуації та її вплив на стан довкілля і здоров'я населення. *Conference Proceedings of the 1st International Conference on Controversial Issues in Science and Education*. London, UK, 16 April 2021. С. 14-21.
3. Eckerman K.F., Ryman J.C. Federal Guidance Report No. 12, External exposure to radionuclides in air, water, and soil. Washington : U.S. Environmental Protection Agency, DC, EPA-402-R-93-081. 1993. 237 p.
4. Safety classification of structures, systems and components in nuclear power plants. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2014. 44 p.
5. Hashemian H.M., Walz M.E., O'Hagan R.D., Pruitt M.S. Online Monitoring In Research Reactors-Safe and Effective. *American Nuclear Society 2013 Annual Meeting*, Atlanta, GA, June 16-20, 2013, pp. 176-180.
6. Попов О.О., Яцишин А.В. Інформаційні системи для вирішення задач комплексного радіоекологічного моніторингу АЕС. *Моделювання та інформаційні технології*. 2014. Вип. 72. С. 3-16.
7. Cooperation of the U.S. DOE and IBRAE RAN in Emergency Preparedness/Response Activities. М. 2012. 64 p. URL: http://en.ibrae.ac.ru/docs/publications/eng_web.pdf (дата звернення: 10.10.2023).
8. Талерко М.М., Гаргер Е.К., Кузьменко А.Г. Програмний комплекс для оцінки і прогнозування радіаційної ситуації в Чорнобильській зоні відчуження, *Ядерна та радіаційна безпека*. №3, 2010, С. 45-49.
9. Балашевська Ю.В., Демченко М.В., Кириленко Ю.О., Коцуба О.Л., Печериця О.В., Шевченко І.А. Спільне використання мобільної радіологічної лабораторії та системи підтримки прийняття рішень як ефективний підхід до аварійного моніторингу. *Ядерна та*

радіаційна безпека, 1(93), 2022. P. 16-26. DOI: 10.32918/nrs.2021.1(93).02

10. Ievdin I., Trybushny D., Zheleznyak M., Raskob W. RODOS re-engineering: aims and implementation details. *Radioprotection*, 5 (45), 2010. pp. S181-S189. DOI: 10.1051/radiopro/2010024

11. Барбашев С.В., Пристер Б.С. Автоматизовані системи контролю радіаційної обстановки. *Ядерна та радіаційна безпека*, 1(57), 2013, С. 41-47. DOI: 10.32918/nrs.2013.1(57).08

12. Rubinshtein K.G., Smirnova M.M., Ignatov R.Y. *et al.* Description of radiation conditions and evaluation of the date of ^{137}Cs release to the atmosphere using the radionuclide transfer model coupled with the forecasts by the mesoscale hydrodynamic model. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 41, 2016, P. 326–334. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068373916050034>

13. ПС «RECASS» НВО «Тайфун». URL: http://ni.biz.ua/6/6_12/6_12220_p-ps-RECASS-про-taufun.html (дата звернення: 15.10.2023)

14. Thykier-Nielsen S., Deme S., Mikkelsen T. Description of the Atmospheric Dispersion Module RIMPUFF. Risø National Laboratory RODOS(WG2)-TN(98)-02. 1999. 58 p.

15. ПС «ДОЗА» КІАЕ. URL: http://ni.biz.ua/6/6_12/6_12223_p-ps-doza-kiae.html (дата звернення: 15.10.2023)

16. Яцишин А.В., Артемчук В.О., Попов О.О. Класифікація моделей забруднення атмосферного повітря. *Моделювання та інформаційні технології*. 2012. Вип. 63. С. 49-58.

17. ПС «SULTAN». URL: http://ni.biz.ua/6/6_12/6_12221_p-ps-SULTAN-vniiaes.html (дата звернення: 15.10.2023)

18. Evaluation of Radioactive Air Contamination due to a Forest Fire within the Exclusion Zone on June 5–8, 2018 / Talerko M.M., Lev T.D., Kireev S.I. [et al.]. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2019. Вип. 2 (14). С. 47–57.

19. IAEA Safety Series. Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting. No. 50-SG-S3, IAEA, Vienna, 1980, 100 p.

20. Raskob W., Trybushnyi D., Ievdin I., Zheleznyak M. JRODOS: Platform for improved long term countermeasures modelling and management. *Radioprotection*. 6 (46). 2011. P. S731-S736. DOI: 10.1051/radiopro/20116865s

21. Päsler-Sauer J. Description of the Atmospheric Dispersion Model ATSTEP - Version RODOS PV 6.0 Patch07, Karlsruhe, Germany, 2007.

22. Janicke, L. The Embedding of the Lagrangian Dispersion Model LASAT into a Monitoring System for Nuclear Power Plants. *Air Pollution Modeling and Its Application X*: eds by Gryning SE., Millán M.M. Plenum Press, New York, 1994. pp. 405-411. DOI: 10.1007/978-1-4615-1817-4_44

23. Andronopoulos S., Davakis E., Bartzis J.G. RODOS-DIPCOT Model Description and Evaluation, Report RODOS(RA2)-TN(09)01. 2009.

24. Kovalets I., Robertson L., Persson Ch., Didkivska S., Ievdin I., Treebushny D. Calculation of the far range atmospheric transport of radionuclides after the Fukushima accident with the atmospheric dispersion model MATCH of the JRODOS system. *International Journal of Environment and Pollution*. 54, 2014. pp. 101-109. DOI: 10.1504/IJEP.2014.065110.

25. Margvelashvili N., Maderich V., Zheleznyak M. THREETOX - computer code to simulate threedimensional dispersion of radionuclides in homogeneous and stratified water bodies. *Radiation Protection Dosimetry*. Vol.73, 1997, pp. 177-180.

26. Ковалець І.В., Ющенко С.А., Железняк М.Й. Асиміляція даних в тривимірній моделі розповсюдження радіонуклідів у водоймищах ТРИТОКС системи РОДОС. *Математичні машини і системи*. №3, 2005. С. 147-154.

27. Халченков А.В., Ковалець І.В., А.Н. Романенко, Адаптація метеорологічної моделі WRF для прогнозування полів вітру навколо Рівненської АЕС. *Математичні машини і системи*. №1, 2015. С. 130-138.

28. Skamarock W.C. et al. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3. National Center for Atmospheric Research Boulder, Colorado, USA. 2021. 148 p. DOI: 10.5065/1dfh-6p97

29. Hasemann I. Model description of the health effects modelling, Karlsruhe, Germany, 2000.

References:

1. Slipchenko V.G., Polyagushko L.G., Krush O.E. System of complex eco-energy-economic monitoring for optimization of management decisions (region, district and city). Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl. 4(268), 2021. P. 13-20. DOI: 10.33216/1998-7927-2021-268-4-13-20.
2. Slipchenko V.G., Polyagushko L.G. Trofymchuk A.A. Web system for determining the radiation situation and its impact on the environment and public health. Conference Proceedings of the 1st International Conference on Controversial Issues in Science and Education. London, UK, 16 April 2021. P. 14-21.
3. Eckerman K.F., Ryman J.C. Federal Guidance Report No. 12, External exposure to radionuclides in air, water, and soil. Washington : U.S. Environmental Protection Agency, DC, EPA-402-R-93-081. 1993. 237 p.
4. Safety classification of structures, systems and components in nuclear power plants. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2014. 44 p.
5. Hashemian H.M., Walz M.E., O'Hagan R.D., Pruitt M.S. Online Monitoring In Research Reactors-Safe and Effective. American Nuclear Society 2013 Annual Meeting, Atlanta, GA, June 16-20, 2013, pp. 176-180.
6. Popov O.O., Yatsyshyn A.V. Information systems for solving problems of complex radio-ecological monitoring of nuclear power plants. Modeling and information technologies. 2014. Issue 72. P. 3-16.
7. Cooperation of the U.S. DOE and IBRAE RAN in Emergency Preparedness/Response Activities. M. 2012. 64 p. URL: http://en.ibrae.ac.ru/docs/publications/eng_web.pdf (access date: 10.10.2023).
8. Talerko M.M., Garger E.K., Kuzmenko A.G. Software complex for assessment and forecasting of the radiation situation in the Chernobyl exclusion zone, Nuclear and radiation safety. No. 3, 2010, pp. 45-49.
9. Balashevskaya Yu.V., Demchenko M.V., Kirylenko Yu.O., Kotsuba O.L., Pecheritsa O.V., Shevchenko I.A. Joint use of a mobile radiology laboratory and a decision support system as an effective approach to emergency monitoring. Nuclear and radiation safety, 1(93), 2022. P. 16-26. DOI: 10.32918/nrs.2021.1(93).02
10. Ievdin I., Trybushny D., Zheleznyak M., Raskob W. RODOS re-engineering: aims and implementation details. Radioprotection, 5 (45), 2010. pp. S181-S189. DOI: 10.1051/radiopro/2010024
11. Barbashev S.V., Pryster B.S. Automated radiation monitoring systems. Nuclear and radiation safety, 1(57), 2013, C. 41-47. DOI: 10.32918/nrs.2013.1(57).08
12. Rubinshtein K.G., Smirnova M.M., Ignatov R.Y. et al. Description of radiation conditions and evaluation of the date of ¹³⁷Cs release to the atmosphere using the radionuclide transfer model coupled with the forecasts by the mesoscale hydrodynamic model. Russ. Meteorol. Hydrol. 41, 2016, P. 326–334. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068373916050034>
13. PS "RECASS" NGO "Tyfun". URL: http://ni.biz.ua/6/6_12/6_12220_p-ps-RECASS-npo-tayfun.html (date of application: 15.10.2023)
14. Thykier-Nielsen S., Deme S., Mikkelsen T. Description of the Atmospheric Dispersion Module RIMPUFF. Risø National Laboratory RODOS(WG2)-TN(98)-02. 1999. 58 p.
15. PS "DOZA" KIAE. URL: http://ni.biz.ua/6/6_12/6_12223_p-ps-doza-kiae.html (date of application: 15.10.2023)
16. Yatsyshyn A.V., Artemchuk V.O., Popov O.O. Classification of atmospheric air pollution models. Modeling and information technologies. 2012. Issue 63. P. 49-58.
17. PS "SULTAN". URL: http://ni.biz.ua/6/6_12/6_12221_p-ps-SULTAN-vniiaes.html (date of application: 15.10.2023)

18. Evaluation of Radioactive Air Contamination due to a Forest Fire within the Exclusion Zone on June 5–8, 2018 / Talerko M.M., Lev T.D., Kireev S.I. [et al.]. Nuclear energy and the environment. 2019. Issue 2 (14). P. 47–57.
19. IAEA Safety Series. Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting. No. 50-SG-S3, IAEA, Vienna, 1980, 100 p.
20. Raskob W., Trybushnyi D., Ievdin I., Zheleznyak M. JRODOS: Platform for improved long-term countermeasures modeling and management. Radioprotection. 6 (46). 2011. P. S731-S736. DOI: 10.1051/radiopro/20116865s
21. Päsler-Sauer J. Description of the Atmospheric Dispersion Model ATSTEP - Version RODOS PV 6.0 Patch07, Karlsruhe, Germany, 2007.
22. Janicke, L. The Embedding of the Lagrangian Dispersion Model LASAT into a Monitoring System for Nuclear Power Plants. Air Pollution Modeling and Its Application X: eds by Gryning SE., Millán M.M. Plenum Press, New York, 1994. pp. 405-411. DOI: 10.1007/978-1-4615-1817-4_44
23. Andronopoulos S., Davakis E., Bartzis J.G. RODOS-DIPCOT Model Description and Evaluation, Report RODOS(RA2)-TN(09)01. 2009.
24. Kovalets I., Robertson L., Persson Ch., Didkivska S., Ievdin I., Treebushny D. Calculation of the far range atmospheric transport of radionuclides after the Fukushima accident with the atmospheric dispersion model MATCH of the JRODOS system. International Journal of Environment and Pollution. 54, 2014. pp. 101-109. DOI: 10.1504/IJEP.2014.065110.
25. Margvelashvili N., Maderich V., Zheleznyak M. THREETOX - computer code to simulate three-dimensional dispersion of radionuclides in homogeneous and stratified water bodies. Radiation Protection Dosimetry. Vol. 73, 1997, pp. 177-180.
26. Kovalets I.V., Yushchenko S.A., Zheleznyak M.Y. Data assimilation in the three-dimensional model of distribution of radionuclides in TRITOKS reservoirs of the RHODES system. Mathematical machines and systems. No. 3, 2005. P. 147-154.
27. Khalchenkov A.V., Kovalets I.V., A.N. Romanenko, Adaptation of the WRF meteorological model for forecasting wind fields around the Rivne NPP. Mathematical machines and systems. No. 1, 2015. P. 130-138.
28. Skamarock W.C. et al. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3. National Center for Atmospheric Research Boulder, Colorado, USA. 2021. 148 p. DOI: 10.5065/1dfh-6p97
29. Hasemann I. Model description of the health effects modeling, Karlsruhe, Germany, 2000.