

УДК 622.83

DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.6-1/26>

Чумаченко С.М.

Національний університет харчових технологій

Яковлев Є.О.

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору

Національної академії наук України

Морш Є.В.

Департамент запобігання надзвичайним ситуаціям

Державної служби України з надзвичайних ситуацій

Парталян А.С.

Управління екологічної безпеки та протимінної діяльності Міністерства оборони України

Гуйда О.Г.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ ТА РЕАЛІЗАЦІЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕКОНОМІЧНОЇ ШКОДИ ВІД НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТЕХНОГЕННОГО ПОХОДЖЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І МЕТОДУ СИСТЕМНОЇ ДИНАМІКИ

Актуальність задач, пов'язаних із ідентифікацією та оцінкою природно-техногенних загроз і ризиків, визначенням і прогнозуванням економічної шкоди та соціо-еколого-економічних збитків від надзвичайних ситуацій, зумовлює необхідність розробки підходів до імітаційного моделювання цієї сфери. Особливо це стало актуальним у наш час, коли на Донбасі ведеться неоголошена гібридна війна. Значна частина капітальних фондів хімічно небезпечних виробництв зношена, а це своєю чергою підвищує ризики виникнення на них надзвичайних ситуацій техногенного та військового походження внаслідок ураження їх артилерійськими боєприпасами. Для прогнозування можливих наслідків таких надзвичайних ситуацій використовуються аналітичні підходи й експертні підходи та математичне й імітаційне моделювання небезпечних природно-техногенних процесів. У роботі на основі застосування системного підходу та макроекономічних моделей, що побудовані на основі системи національних рахунків, наведено приклад сумісного застосування геоінформаційних технологій і методу системної динаміки для створення комп'ютерної моделі для оцінки економічної шкоди від надзвичайних ситуацій техногенного походження. Вхідними даними для розрахунку зазначених величин є просторові координати джерела викиду отруйної речовини (СДОР), вид СДОР, обсяг викиду СДОР (тонн), метеоумови на час викиду, топографічні особливості зони забруднення, геометричні характеристики, кількість населення в міських і сільських поселеннях. Загалом вихідна макроекономічна модель складається з агрегованої пропозиції, що включає 3 регресійних рівняння і 2 тотожності, блоку агрегованого попиту – 4 регресійних рівняння і 11 тотожностей, блоку зовнішньої торгівлі – відповідно 4 і 8 рівнянь та блоку дезагрегації змінних – 24 регресійні рівняння і 32 тотожності. В подальшому з цієї моделі, використовуючи метод системної динаміки, в середовищі симуляції Vensim PLE розроблюється комп'ютерна модель, що дозволяє провести імітаційне моделювання можливої економічної шкоди та соціо-еколого-економічного збитку у разі виникнення надзвичайних ситуацій регіонального масштабу.

Ключові слова: надзвичайна ситуація, економічна шкода, імітаційна модель, соціо-еколого-економічні збитки, геоінформаційні технології, метод системної динаміки.

Постановка проблеми. За оцінками експертів провідних аналітичних центрів (World Economic Forum) [1], країни світу входять у довготривалу

стадію посилення нестабільності розвитку у глобальному масштабі. Посилення нестабільності зумовлене не лише соціально-економічними при-

чинами та пандемією коронавірусної хвороби COVID-19, але й наближенням фазового перехідного періоду формування нового технологічного укладу та зміни техніко-економічної парадигми розвитку (від інформаційно-комунікаційних до «нано-, біо- і когно» технологій) [2]. Воно також зумовлене наростанням глобальних кліматичних змін, що призводить до зростання частоти природних катастроф, та загостренням екологічних проблем у зв'язку із перевищенням асиміляційної здатності біосфери до самовідновлення (світове населення перевищило поріг демографічної ємності у 6 млрд осіб). Ці обставини зумовили негативний прогноз значного зниження рівня природно-техногенної безпеки у середньо- і довгостроковій перспективі, що значною мірою пов'язано із зростанням загрози техногенних аварій і катастроф на підприємствах підвищеної хімічної та вибухо-пожежної небезпеки (ХВПН), особливо хімічних потенційно-небезпечних об'єктах (ХПНО), які належать до об'єктів критичної інфраструктури. Більшість таких об'єктів розташована у промислово-міських агломераціях (ПМА) із високою щільністю населення та гірничо-видобувних районах (ГВР) Донбасу.

Вчасне попередження ймовірних техногенних аварій ускладнюється через критичну зношеність обладнання, недосконалість технологій, слабкість національної економіки та соціальних інститутів. Крім того, усі ПХНО у процесі взаємодії з природними життєзабезпечуючими ресурсами (атмосферою, гідросферою, біосферою, ґрунтами) формують складну природно-техногенну геосистему (ПТГС), яка відрізняється значною мінливістю параметрів функціонування. Все це збільшує актуальність задач, пов'язаних із ідентифікацією та оцінкою природно-техногенних загроз і ризиків, визначенням ймовірних сценаріїв розгортання надзвичайних ситуацій (НС) воєнно-техногенного характеру на ПХНО, моделювання економічної шкоди та соціо-еколого-економічних збитків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки до розв'язання цих задач залучаються методи ризик орієнтованого підходу до забезпечення безпеки [3], імовірнісного аналізу ризиків [4], аналізу та моделювання еколого-економічних збитків [4; 5; 6], моделювання функцій безпеки і систем [7] тощо. Водночас ці підходи і здійснені на їх основі дослідження відзначаються фрагментарністю, оскільки в них не розглядається весь комплекс чинників, що спричиняють аварії; не враховуються довготривалі тенденції розвитку цих чинників та негативних наслідків аварій; не

розробляються відповідні прогнози на регіональному (національному) та об'єктовому рівнях; різні наслідки аварій розглядаються відокремлено.

На початку 2000-х рр. колишнє МНС України замовило і почало фінансувати створення Урядової інформаційно-аналітичної системи з надзвичайних ситуацій (УІАС НС). Технічний проєкт створення цієї системи розробив Інститут проблем реєстрації інформації НАН України, а головним конструктором призначено доктора технічних наук, професора О.Г. Додонова. У складі системи для реалізації групи функцій «Аналіз і прогнозування» було розроблено програмно-моделюючий комплекс надзвичайних ситуацій (ПМК НС).

Згідно з технічним проєктом ПМК НС (2001 р.) у його складі в першу чергу передбачалося розробити функціональні комплекси задач: «Прогнозування та оцінка наслідків повеней» (ПМК «Паводок»); «Прогнозування і оцінка наслідків викиду в атмосферу небезпечних хімічних речовин» (ПМК «Хімія»); «Прогнозування та оцінка наслідків селів» (ПМК «Селі»); «Прогнозування та оцінка наслідків карстових явищ» (ПМК «Карст»). До 2004 р. ці програмні комплекси, розроблені ТОВ РІАЦ-ІНТЕК-Україна з участю УкрНДГМІ та УкрДГРІ, вже перебували в досвідній експлуатації і забезпечували просторовий аналіз зазначених типів НС у середовищі ГІС ArcGIS 8.2 (із додатками SpatialAnalyst 2.0, 3D Analyst, Network Analyst).

Причому тоді ж виявилася необхідність розширити предмет прогнозування за рахунок врахування: по-перше, НС на підприємствах ядерної промисловості та внаслідок виливу просторово-часового розповсюдження нафтопродуктів (із розробкою відповідних ПМК); по-друге – впливу небезпечних природних явищ і процесів на імовірність виникнення НС техногенного походження; оцінки імовірних негативних наслідків техногенних НС тощо.

Тому в 2004 р. у Інституті проблем національної безпеки при РНБО України було створено дослідний зразок інформаційно-аналітичної підсистеми оцінки та прогнозування ризиків життєдіяльності і господарювання на територіях підвищеної природно-антропогенної безпеки (ІАПОР) у складі ПМК НС. Серед її розробників були М.М. Биченок, М.Б. Кодацький, О.Г. Рогожин, С.П. Іванюта, Є.О. Яковлев. ІАПОР була реалізована як додаток до ПМК «Хімія» (визначав можливу зону хімічного забруднення) і остаточно передана в експлуатацію у департамент прогнозування надзвичайних ситуацій МНС в 2006 р. У складі ІАПОР функціонувало два програмні блоки: «ризики життєдіяльності» та «ризики господарювання». Перший

з них забезпечував прогнозування і аналіз ризиків загибелі чи втрати здоров'я людей від природно-техногенних небезпек, а другий – прогнозування і аналіз ризиків матеріально-фінансових втрат для господарських комплексів на територіях підвищеної природно-техногенної небезпеки.

Тим більше, що в Україні відсутня система моніторингу соціально-економічних наслідків масштабних техногенних аварій із відповідною базою даних та ГІС, не розроблені техніко-економічне обґрунтування такого моніторингу та теоретичне і методичне забезпечення процедур аналізу, прогнозування і моделювання у його складі.

Через усе це виникла потреба здійснення комплексного дослідження для системного поєднання всіх аспектів проблеми, спрямованого на розробку інформаційного інструментарію для імітаційного моделювання економічної шкоди від НС на об'єктах критичної інфраструктури, що сприятиме збільшенню рівня безпеки життєдіяльності (БЖД) населення в зоні проведення ООС.

Постановка завдання. В роботі має бути створена науково-методична основа для системного вирішення проблеми оцінки та прогнозування економічних наслідків масштабних техногенних аварій і катастроф на об'єктах критичної інфраструктури підвищеної ХВПН.

Виклад основного матеріалу дослідження. Як зазначається у класичній роботі В. Маршалла [8, с. 358–359], до початку 1980-х років токсичні викиди під час аварій на ПНО не розглядалася як основна загроза для персоналу і населення. Згідно із тодішньою статистикою втрат абсолютно переважали ураження, спричинені пожежами і вибухами (особливо від об'ємних вибухів: пилових хмар; повітряно-газових хмар газоподібних вуглеводнів – метану та подібних; парових хмар летючих вуглеводнів – циклогексану та подібних). Частка втрат, пов'язаних із токсичними викидами, серед усіх промислових і транспортних аварій становила: 8% смертельних і 32% не смертельних уражень. Хоч саме аварії з викидом токсичних речовин викликали найбільший суспільний резонанс. Однак ситуація змінилася після хімічної аварії в м. Бхопал (Індія) у 1984 р.

Прискорений розвиток хімічної індустрії, що триває в азійських країнах, які модернізуються (особливо масштабний в Китаї), призвів до збільшення частоти аварій із викидом токсичних речовин та втрат від них – на фоні запровадження ефективних систем безпеки, зменшення чисельності і щільності персоналу або закриття аналогічних небезпечних підприємств у «постіндустріальних»

розвинених країнах. Це не могло не збільшити «внесок» аварій із викидом токсичних речовин у структурі світових людських втрат від промислових і транспортних аварій. На жаль, його важко оцінити кількісно через закритість китайської статистики втрат від техногенних аварій.

У зв'язку з ліквідацією МНС України, після 2011 р. департамент прогнозування НС було розформовано, а програмне забезпечення УІАС НС – втрачене. Тому, для виконання розрахунку еколого-економічних збитків від імовірних НС із викидом токсичних речовин в атмосферу, довелося в першу чергу відновити функції просторового прогнозування за методикою МНС зон можливого хімічного забруднення та прогнозованого хімічного забруднення (які у складі УІАС НС забезпечував ПМК «Хімія»).

Згідно з методикою МНС [8], визначаються (вихідний результат):

- геометричні характеристики зони можливого хімічного забруднення (утвореної за перші 4 години з часу аварії):

- глибина розповсюдження хмари забруднення (Γ , км),

- кут сектора зони можливого хімічного забруднення (град);

- площа зони можливого хімічного забруднення ($S_{\text{зхзз}}$, км²);

- геометричні характеристики прогнозованої зони хімічного забруднення (контур еліпса та його осі – глибина і ширина прогнозованої зони забруднення);

- площа прогнозованої зони хімічного забруднення ($S_{\text{пхзз}}$, км²);

- площа забруднених територій у цій зоні за типами: міст, сіл, лісів (км²);

- чисельність населення у зоні можливого хімічного забруднення: всього, міського, сільського (осіб).

Вхідними даними для розрахунку зазначених величин є:

- просторові координати джерела викиду отруйної речовини (СДОР);

- вид СДОР (в нашому випадку хлор або аміак);

- обсяг викиду СДОР (тонн);

- характер викиду (вільно, у піддон)

- метеоумови на час викиду:

- сезон, час, хмарність, стан атмосфери (ізотермія, інверсія, конвекція),

- температура повітря (Т°С),

- напрямок вітру (із точністю до румба 45°),

- швидкість вітру (м/сек);

- топографічні особливості зони забруднення, геометричні характеристики:
- населених пунктів, окремо міських та сільських,
- лісових масивів у напрямі поширення фронту забруднення;
- кількість населення в міських і сільських поселеннях (за переписом 2001 р.).

Результати розрахунків виводяться на екран (геометричні та числові), приклад наведено на рис. 1.

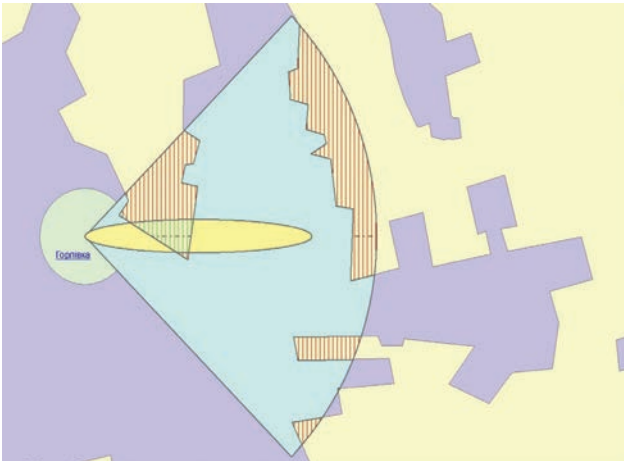


Рис. 1. Результати ГІС-прогнозування зон можливого і прогнозованого хімічного забруднення: локальний рівень (Донецька область, Горлівка)

Числові дані також зберігаються у вигляді Excel-таблиці. Даними для передачі у блок ГІС-оцінки еколого-економічних збитків є:

- площа прогнозованої зони хімічного забруднення за категоріями земель (всього, території міст, сіл, лісові угіддя);
- кількість населення у прогнозованій зоні хімічного забруднення (всього, міське, сільське);
- обсяг викиду СДОР певного виду.

Оскільки в розробленій програмі для прогнозування зони забруднення без змін реалізована методика МНС [8-12], вона може бути використана для виконання штатних задач довгострокового (оперативного) і аварійного прогнозування при аваріях на ХПНО, в тому числі у зоні збройного конфлікту на Донбасі, де просторова щільність ПНО є максимальною у державі. Тобто для розрахунку сил і засобів, які залучатимуться для ліквідації наслідків аварій різного масштабу, складення планів роботи та інших матеріалів, визначення можливих наслідків аварії і порядку дій в зоні можливого забруднення.

Функцією зазначеного програмного блоку є безпосередня оцінка засобами ГІС еколого-економічних збитків, які виникають внаслідок реаліза-

ції НС з викидом токсичних речовин в атмосферу на ХПНО. Як тих НС, що реально відбулися, так і за їх гіпотетичними сценаріями.

Для визначення збитків від наслідків реальних НС в Україні практикують так званий «експертний» підхід, коли відповідні фахівці на свій розсуд (тобто значною мірою суб'єктивно) оцінюють їх для основних реципієнтів негативного впливу (суб'єктів господарювання, персоналу і населення, об'єктів навколишнього середовища), фактично не використовуючи призначену для цього офіційну методик, розроблену колишнім МНС України [8–12], мотивуючи свою відмову тим, що в багатьох випадках її необхідно додатково адаптувати до конкретних ситуацій.

Однак наведений аргумент не є переконливим з огляду на очевидну перевагу застосування єдиної методики для об'єктивізації оцінки. Очевидною є й технологічна перевага застосування методики МНС, оскільки згідно з нею немає відмінності у техніці розрахунків для реальних і гіпотетичних аварій. Особливо у складі програмного комплексу, де на основі ГІС-аналізу автоматично визначаються геометричні параметри зони забруднення (на картографічній основі із різними категоріями житлової забудови, лісових, водних та земельних угідь), кількість ураженого персоналу та населення тощо.

Для визначення економічної шкоди в зоні проведення ООС, що обумовлені негативними наслідками від НС воєнно-техногенного характеру було розроблено комплексну комп'ютерну імітаційну модель. Вхідними даними для цієї моделі є результати ГІС – аналізу, отримані за методикою МНС.

Розвиток статистики національних рахунків, статистики платіжного балансу та банківської статистики в Україні дають змогу сьогодні, використовуючи економетричні методи моделювання, розробити макроекономічну модель для використання її в економічному аналізі і прогнозуванні [70].

В якості теоретичної макроекономічної моделі в статті було обрано макроекономічну секторну модель розвитку економіки, розроблену в Інституті економічного прогнозування НАН України. Вона пройшла апробацію в рамках міжнародного проекту Project LINK-ООН (Система національних макроекономічних моделей прогнозування світової економіки та міжнародної торгівлі) як базова модель для прогнозування розвитку економічного стану в державі.

Модель розроблено на основі існуючих у світовій практиці підходів відповідно до методології побудови економетричних моделей з метою отримання середньострокових оцінок розвитку національної

економіки і пошуку можливостей регулювання її розвитку за допомогою набору управляючих змінних в умовах економічної рівноваги. При побудові макроекономічної моделі, структура якої наведена в [13] (див. рис. 2), пропонується підхід до моделювання, що ґрунтується на взаємопов'язаних статтях національних рахунків у цінах поточного періоду при збереженні необхідного балансу між основними секторами економіки.

Змінними економічної політики визначаються: реальне та державне споживання, валові інвестиції, ставки окремих податків, експорт, імпорт, а також процентні ставки, валютний курс та індекс інфляції.

Реально взаємодія блоків моделі виявляється у побудові та узгодженні основних показників платіжного та монетарного балансів, Системи національних рахунків (СНР) та балансу державного бюджету. До того ж виробництво, дохід і витрати (або заощадження) пов'язуються трьома основними взаємозалежностями:

- виробництво – дохід;
- дохід – витрати;
- заощадження – придбання активів.

Поточні і капітальні взаємозв'язки СНР між державним, приватним, зовнішнім секторами та монетарною системою як посередницьким

сектором і три вищенаведені базові взаємозалежності складають тотожності національного доходу. Вони відображають обмеження бюджетного, зовнішнього і грошово-кредитного секторів і використовуються для розробки системи секторальних моделей оцінки і прогнозування економіки України.

Структурно загальна макромодель економіки України складається з системи відповідних макромоделей: реального сектора, споживання та доходів населення, зовнішньоекономічного, фіскального та грошово-кредитного секторів. Виділяються також сектори бюджетного та платіжного балансів.

У роботі під час вирішення задачі оптимального управління в якості критерію був обраний один з найважливіших застосовуваних в практиці макроекономічних показників – валовий внутрішній продукт. Формування його здійснюється в реальному секторі, тому більш детально розглядається саме ця модель.

Наведена модель реального сектора разом з іншими може використовуватися як для середньо-, так і довгострокового прогнозування розвитку економіки в цілому та її агрегованих галузей. У моделях закладені можливості імітаційного прогнозування економіки за формалізованим

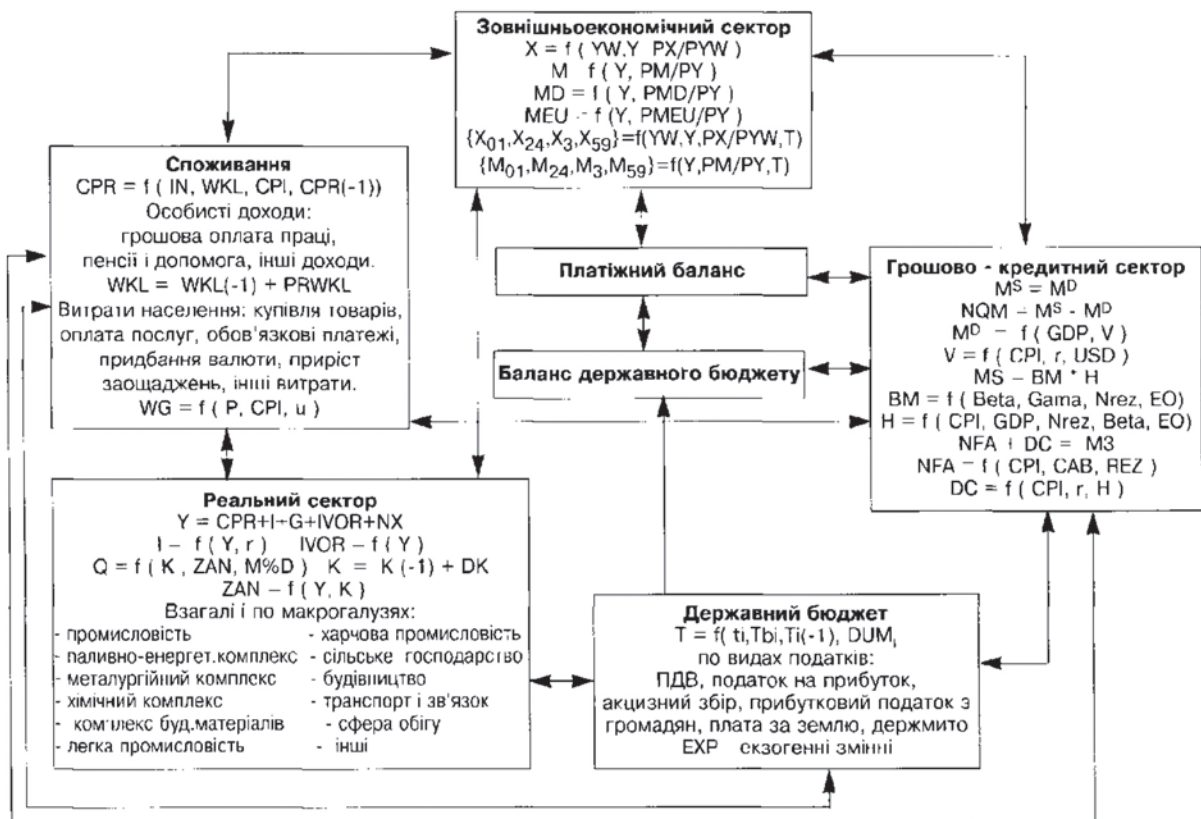


Рис. 2. Секторальні макромоделі для економічного прогнозування

описом моделі, а також альтернативними сценаріями розвитку макроекономічної ситуації, кожен з яких характеризується відповідним набором екзогенних та ендогенних змінних.

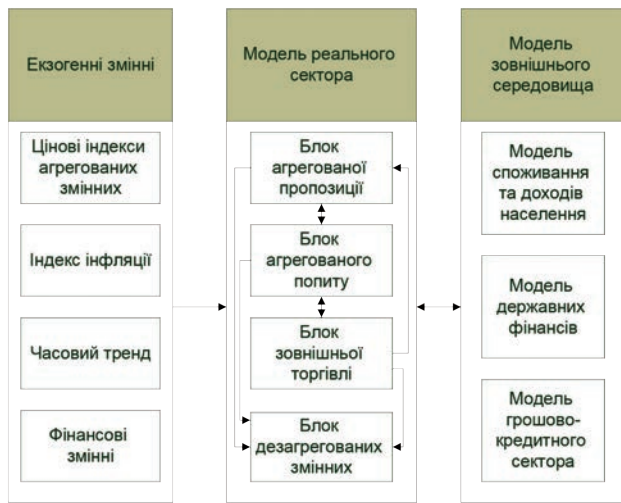


Рис. 3. Структура моделі прогнозування реального сектора

Високий ступінь агрегації моделі обумовлений відсутністю необхідних статистичних даних або неможливістю показати їх у співставних цінах. Брак необхідної статистичної інформації пов'язаний також з офіційним відходом від статистики балансу народного господарства й переходом на статистику національних розрахунків, що змінює методологію розрахунків і впливає на точність оцінки часових рядів ретроспективного періоду як в постійних цінах, так і в цінах поточного періоду.

Модель економіки України складається із регресійних рівнянь і тотожностей та належить, згідно з критеріями класифікації економіко-математичних моделей, до нелінійної, агрегованої, змішаної (що містить одночасові блоки), імітаційно-стохастичної, прикладної, в реальних і номінальних величинах та приростах змінних моделі (табл. 1).

Серед чотирьох блоків моделі реального сектора ступінь взаємозалежності регресійних рівнянь неоднакова. Блок агрегованої пропозиції складає 3 регресійних рівняння і 2 тотожності, блок агрегованого попиту розраховує 4 регресійних рівняння і 11 тотожностей, блок зовнішньої торгівлі — відповідно 4 і 8, а блок дезагрегації змінних — 24 регресійні рівняння і 32 тотожності.

Реалізація моделі забезпечує єдину технологію розв'язування системи моделей, яка складається з формування інформаційної бази, структурного аналізу взаємозв'язків вхідних змінних і розв'язку моделі, а також виводу результатів її розв'язку за вихідними змінними.

Для аналізу ретроспективного періоду і виявлення основних тенденцій його розвитку, а також взаємозв'язку показників, що характеризують ці тенденції, необхідним етапом дослідження є розробка інформаційного забезпечення моделі. Робота з підготовки інформаційного забезпечення передбачає збір, обробку і систематизацію статистичних показників з формуванням реляційної бази даних, яка використовується на різних етапах роботи з моделлю: генерація рівнянь, розв'язання моделі, аналіз отриманих результатів.

На інформаційному етапі розробки моделі відбувається аналіз та упорядкування часових рядів за період 2010—2018 рр., за допомогою яких моделі наповнюються вхідними даними, здійснюється корекція та обробка нормативних і динамічних показників інформаційної бази, а також формування архіву моделі (архівна інформаційна база даних). Підготовча робота з наповнення інформаційної бази даних моделі необхідними даними виконувалась відповідно до методології СНР України.

Модель реального сектора містить базові макроекономічні тотожності, на основі яких формуються складові ВВП за різними методами обрахування. Виробнича функція (сума валового внутрішнього продукту та імпорту) у блоці пропозиції залежить

Таблиця 1

Загальна характеристика моделі прогнозування економічної шкоди від надзвичайних ситуацій техногенного характеру для реального сектора економіки України

Блок	Кількість рівнянь			Кількість змінних		
	Всього	У тому числі		Всього	У тому числі	
		регресійних стохастичних	тотожностей		ендогенних	екзогенних
1	2	3	4	5	6	7
агрегованої пропозиції	5	2	3	8	4	4
агрегованого попиту	15	4	11	18	12	6
зовнішньої торгівлі	12	4	8	17	11	6
дезагрегованих змінних	56	24	32	65	51	14

від основних фондів, зайнятості та імпорту товарів, послуг і лагових змінних. У блоці також наводяться функції зайнятості та основних фондів.

Валовий внутрішній продукт у блоці агрегованого попиту визначається за методом кінцевого використання і відповідно формуються обсяги кінцевих споживчих витрат домашніх господарств, сектора загального державного управління, валового нагромадження основного капіталу, зміни запасів матеріальних оборотних коштів та чистого експорту товарів і послуг. Обидва виділені у моделі блоки тісно пов'язані зі змінними грошово-кредитного, зовнішньоекономічного секторів, фінансів і споживання.

Для встановлення коефіцієнтів в рівняннях макроекономічної моделі використовувались методи багатфакторного регресійного аналізу, виходячи з припущення, що компенсаційні витрати внаслідок техногенних аварій і катастроф та витрати на проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт зменшують об'єм інвестицій, а отже – рівень накопичування основного капіталу, ідентифікація проводилася тільки для макромоделі реального сектору, який формує виробничу функцію і визначає обсяги виробництва валового внутрішнього продукту.

При виконанні досліджень процес ідентифікації макроекономічної моделі здійснювався з використанням програмних засобів пакету для статистичної обробки інформації EViews 4.

Для проведення експериментальних досліджень конструювання імітаційної макроекономічної моделі здійснювалось на ПЕОМ в спеціалізованому середовищі імітаційного моделювання Vensim PLE. Дане середовище ґрунтується на широко відомій системно-динамічній парадигмі, розробленій ще наприкінці 50-х років ХХ століття професором Масачусетського інституту технологій Дж. Форестером. Пакет Vensim є як аналітичним, так й експериментальним управлінським інструментом, що дозволяє об'єднати всі змінні, складові системи, і вивчати їхню взаємодію в динаміці. Слід зазначити наступні переваги пакету імітаційного моделювання Vensim:

1. Простота в роботі. Робота з пакетом Vensim не вимагає спеціальних навичок і знання мови програмування. Модель розробляється шляхом розміщення на робочому аркуші вбудованих будівельних блоків, з'єднаних стрілками. Стрілки вказують напрямки фінансових і матеріальних потоків, а також відображають структурні взаємозв'язки моделі.
2. Унікальний ефект візуалізації. Автор моделі постійно бачить всю систему цілком, як показано на рис. 4. При будь-якій зміні схеми моделі автоматично змінюються алгоритм і програмний код, що генерується автоматично.
3. Відсутність «жорсткої прив'язки» до якогось певного кола завдань.
4. Розвинені засоби аналізу чутливості, що забезпечують автоматичне багаторазове виконання моделі з різними вхідними даними.

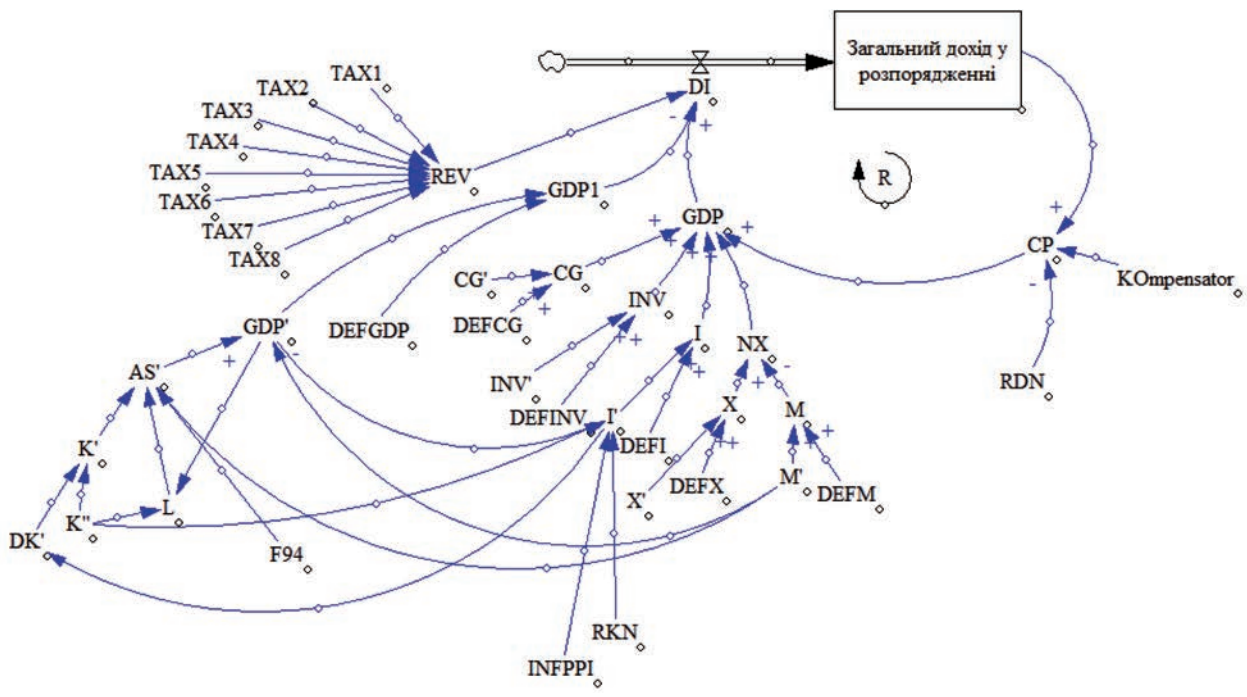


Рис. 4. Імітаційна модель прогнозування в середовищі Vensim PLE

5. Підтримка безлічі форматів вхідних даних.

Моделювання здійснювалося в двох режимах: в режимі нормального функціонування економіки і в режимі надзвичайної ситуації воєнно-техногенного характеру. Для цього структура макроекономічної моделі була модифікована – в рівняння, що задає загальну пропозицію були введені змінні, які визначають вплив зовнішніх чинників від дії надзвичайних ситуацій – ΔP та ΔI . Різниця одержаних в результаті моделювання оцінок валового внутрішнього продукту в обох режимах складає економічну шкоду внаслідок надзвичайних ситуацій і використовується для розрахунку критерію ефективності в задачах оптимального управління під час здійснення аварійно-рятувальних робіт. Загальна схема імітаційної моделі представлена на рис. 4.

Таким чином, розроблений в статті науково-методичний апарат дозволяє отримувати всі необхідні вихідні дані для вирішення задач ресурсної оптимізації при запобіганні і ліквідації наслідків НС на об'єктах критичної інфраструктури.

Висновки. Здійснено обґрунтування і вибору методів для прогнозування макроекономічних наслідків надзвичайних ситуацій воєнно-техногенного походження на об'єктах критичної інфраструктури. Розроблений підхід дозволяє оцінювати наслідки НС воєнно-техногенного походження для складних ПТГС «ХПНО-навколишнє середовище», зони екологічного впливу яких охоплюють підконтрольні і непідконтрольні території, враховуючи обмеженість і недосконалість системного моніторингу останньої. За основу були взяті методи, що використовуються при аналізі техногенного ризику, але доповнені методами, що використовуються при макроекономічному аналізі:

1. Уточнені поняття економічної шкоди на регіональному рівні від наслідків аварій (руйнувань) на об'єктах критичної інфраструктури і механізм її формування на основі натуральних втрат. Економічна шкода на рівні регіону Донбасу визначається як сума втрат валового внутрішнього про-

дукту через пряму дію наслідків аварії на об'єктах критичної інфраструктури та через дію інвестиційного механізму.

2. Модифіковано структуру математичної моделі макроекономіки України і на цій основі розроблено комп'ютерну імітаційну модель для оцінки економічної шкоди від виникнення надзвичайних ситуацій на території України з використанням підходів ГІС-аналізу та системної динаміки. Нова структура макроекономічної моделі дозволяє досліджувати вплив на економіку країни не тільки традиційних регулюючих чинників, але й таких, що мають характер зовнішніх збурень. До таких чинників і відносяться, зокрема еколого-економічні збитки та втрати від аварій і катастроф (руйнувань) на ХПНО. Ідентифікація параметрів моделі була виконана з використанням методу найменших квадратів. Адекватність і точність розробленої моделі підтверджується її статистичними характеристиками.

3. Отриманий основний науковий результат, що має прикладне значення – методика оптимізації за макрорівневим критерієм управління ресурсами, призначеними для запобіганні і ліквідації наслідків аварій (руйнувань) на об'єктах критичної інфраструктури. Окреме прикладне значення мають складові цієї методики: методика прогнозування макроекономічних наслідків аварій (руйнувань) на об'єктах критичної інфраструктури та алгоритми вирішення задач оптимального управління ресурсами при запобіганні і ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій воєнно-техногенного походження. Сутність розробленої методики полягає:

- в оцінці техногенного ризику у випадках руйнувань (аварій) хімічних потенційно небезпечних об'єктів, вираженого в прогнозованому зниженні валового внутрішнього продукту регіону;
- розрахунку оптимального розподілу ресурсів по об'єктах на основі цієї оцінки і нормативних витрат ресурсів;
- розробці оптимальної програми (сценарію) застосування ресурсів.

Список літератури:

1. Юрчишин В. Глобальні тенденції і перспективи: світова економіка та Україна. / Наук. ред. Київ : Заповіт, 2018. 202 с.
2. Roco M. C., Bainbridge W. S., Tonn B., Whitesides G. Convergence of Knowledge, Technology and Society: Beyond Convergence of Nano-Bio-Info-Cognitive Technologies [Electronic resource]. Accessed mode: <http://www.wtec.org/NBIC2/Docs/FinalReport/Pdf-secured/NBIC2-FinalReport-WEB.pdf>
3. Гречанінов В.Ф., Бегун В.В. Функції управління і нагляду в ризик-орієнтованому підході до управління безпекою. Математичні машини і системи. 2014. № 1. С. 159–170.
4. Лисиченко Г.В., Забулонов Ю.Л., Хміль Г.А. Природний, техногенний та екологічний ризику: аналіз, оцінка, управління. Київ : Наукова думка, 2008. 543 с.

5. Бريدун Є.В. Моделювання системи компенсації еколого-економічних збитків. Інститут економічного прогнозування НАН України, Київ, 2002. forINSURER.com.
6. Лисенко О.І., Чумаченко С.М., Бодрик Ю.Г. Комплексний підхід до аналізу і прогнозування розвитку еколого-економічних систем в надзвичайних ситуаціях. *Журнал Арсенал-2000*. 2000. № 2. С. 59–61.
7. Risk Excellence Notes U.S. Department of Energy. Argonne, 2010. 127 с.
8. Методика оцінки збитків від надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру (Затверджена Постановами Кабінету Міністрів України № 175 від 15.02.2002 р. та № 862 від 04.06.2003 р.).
9. Методика визначення розмірів шкоди, зумовленої забрудненням і засміченням земельних ресурсів через порушення природоохоронного законодавства. Затверджено наказом Міністерства охорони навколишнього середовища та ядерної безпеки України від 27 жовтня 1997 р. № 171. *Офіційний вісник України*. Київ : ЛОГОС, 1998. № 18. с. 664.
10. Методика розрахунку розмірів відшкодування збитків, завданих державі внаслідок порушення законодавства про охорону та раціональне використання водних ресурсів (Затверджена наказом Мінекобезпеки України від 18.05.1995 р. № 37).
11. Методика розрахунку збитків, завданих рибному господарству внаслідок порушення законодавства про охорону навколишнього природного середовища (Затверджена наказом Мінекобезпеки України від 18.05.1995 р. № 36).
12. Волошин С.М., Жарова Л.В., Хлобистов Є.В., Чебанов О.А. Соціально-економічний аналіз надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру / За наук. ред. д.е.н., проф. Хлобистова Є.В. / РВПС України НАН України, НДІ СРП – Сімферополь, СОНАТ, 2010. 258 с.
13. Геєць В., Скрипниченко М., Соколик М., Шумська С. Секторальні макромоделі прогнозування економіки України. *Економіст*. 1998. № 5. С. 58-67.

Chumachenko S.M., Yakovliev Ye.O., Morshch Ye.V., Partalian A.S., Huida O.H. SPECIFICS DEVELOPMENT AND REALIZATION OF COMPUTER MODELS FOR ASSESSMENT OF ECONOMIC DAMAGE FROM THE EMERGENCY SITUATIONS OF TECHNOGENIC ORIGIN WITH THE USE OF GIS TECHNOLOGY AND METHODS OF SYSTEM DYNAMICS

The relevance of tasks related to the identification and assessment of natural and man-made threats and risks, identification and forecasting of economic damage, socio-environmental and economic losses from emergencies the development of approaches to modeling in this area. This has become relevant in our time, when the Donbass is waging an undeclared hybrid war, especially.

A significant part of the capital funds of chemically hazardous industries is worn out, which in turn increases the risks of emergencies of man-made and military origin due to their destruction by artillery ammunition. Analytical and expert approaches and mathematical and simulation modeling of dangerous natural and man-made processes are used to predict the possible consequences of such emergencies. This work based on the application of a systems approach and macroeconomic models built on a system of national accounts. An example of the combined use of geographic information technology and the method of system dynamics to create a computer model to assess the economic damage from emergencies of man-made origin is given. The input data for the calculation of these values are the spatial coordinates of the source of toxic substance (SDOR), the type of SDOR, the volume of SDOR emissions (tons), meteorological conditions at the release time, topographic features of the pollution zone, geometric characteristics, population in urban and rural settlements. In general, the original macroeconomic model consists of an aggregate supply that includes 3 regression equations and 2 identities, a block of aggregate demand – 4 regression equations and 11 identities, a block of foreign trade – 4 and 8 equations, and a block of disaggregation of variables – 24 regression equations and 32 identities.

A computer model is developed from this model using the system dynamics method in the Vensim PLE simulation environment, which allows simulating possible economic damage and socio-ecological-economic damage in the event of regional emergencies, in the future.

Key words: emergency situation, economic damage, simulation model, socio-ecological-economic losses, geoinformation technologies, method of system dynamics.