

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА КЕРУВАННЯ

УДК 519.226

І.О. Загірська, П.І. Бідюк

СЦЕНАРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ТИХООКЕАНСЬКОЇ ПЛЯМИ СМІТТЯ

The study performed aimed at constructing and comparing scenarios of the solid waste treatment policy in different countries and their influence on variations of environmental dynamics changes in the area of ecological catastrophe – Pacific trash vortex. As input data for the scenario constructing and performing corresponding analysis the statistics for the solid waste processing in the USA, European Union and Singapore was used. The models were constructed for forecasting of the waste accumulated and the percentage of their processing. It was established that the process of the waste accumulation is described best with autoregressive model and structural model with trend. The basic trends for further development of the process under study have been discovered. Over the next ten years the implementation of various solid waste treatment scenarios in the world can cause a variety of implications for the Pacific trash vortex and ecological situation in general, as discussed in the article. A comparative analysis of the policy scenarios for the solid waste treatment was carried out. Using as an example this environmental problem a general methodology of scenario building is described. The indicators to define the robustness of these scenarios and the best one of them were found using actual data. The following tools were used for the purpose: scenario modeling, decision tree constructing for probabilistic modeling, autoregression models and models with description of trend.

Вступ

Засмічення довкілля на сьогодні є однією із ключових екологічних проблем в Україні та світі. Мова йде про перетворення значних територій на місця масового скупчення сміття, а також про локальне засмічення природних об'єктів і зон проживання людини.

Загострення цієї проблеми визначається багатьма факторами – це чинники економічні, політичні й соціальні, ті, що стосуються людської поведінки та свідомості. Пляма сміття, що дрейфує в Тихому океані, періодично затоплює новими порціями відходів узбережжя незалежно від ступеня економічного розвитку країни. В Україні ж, попри відсутність видимого безпосереднього зв'язку з Тихим океаном, невідповідність кількості неорганічних відходів розмірам їх переробки створює своєю чергою схожу загрозу – загрозу “затоплення” території країни сміттям із відповідними наслідками для живої природи та життя людини. Дослідження процесів, що відбуваються у скупченні сміття в Тихому океані, почали займатися нещодавно. Найпомітнішими є дослідження Ч. Мура, який регулярно організовує експедиції в зону стихійного лиха, Г. Латтіна, К. Боєргера, А. Зеллерса та ін. [1–3]. Природу розпаду пластику в умовах океану та вплив цього процесу на живі організми наразі активно вивчають Ж. Франкер, П. Райян, С. Свон, Р. Томпсон та ін. [4, 5].

Політика щодо поводження із твердими побутовими відходами кардинально різниться від країни до країни та з року в рік, а тому задача прогнозу динаміки росту засмічення вод

світового океану та можливих наслідків стає дедалі більш актуальною.

Постановка задачі

Метою дослідження є: порівняння сценаріїв розвитку політики поводження із твердими побутовими відходами у країнах світу, зокрема прилеглих до узбережжя Тихого океану; визначення впливу можливих реалізацій цих сценаріїв на динаміку змін тихоокеанської плями сміття; побудова моделей для прогнозування маси відходів і рівня їх переробки на основі наявних даних.

Передісторія проблеми і географія поширення плями

Бурхливий розвиток промисловості в післявоєнні роки у США, що вже реабілітувалися після Великої депресії, був спрямований на розвиток товарів широкого вжитку. Відтоді проблема сміття постає як одна з ключових у спектрі екологічних негараздів планети.

У 1997 р. Ч. Мур у так званому “Північно-Тихоокеанському коловороті” виявив найбільше сміттєзвалище на планеті [6]. Оцінки його розмірів варіюються від подвоєної площі штату Техас до подвоєної площі США. Точно оцінити площу плями неможливо, адже основну її частину становить пластик, що залягає безпосередньо під поверхнею води, і з супутника “суп” не видно. Його можна побачити тільки з носа корабля.

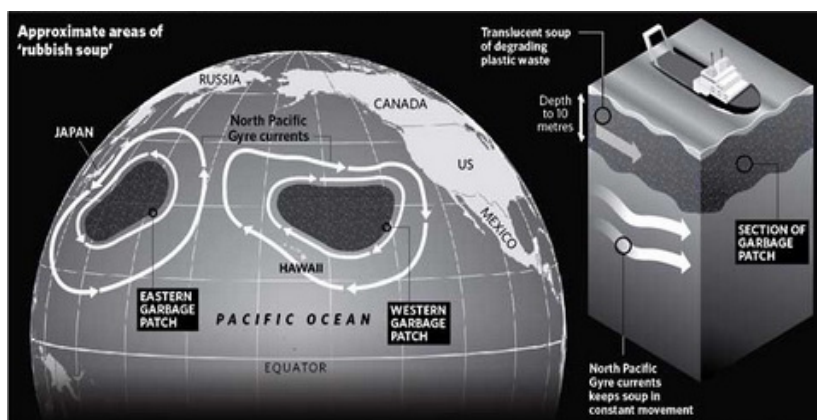


Рис. 1. Наближена географія поширення плями “пластикового супу” [8]

80 % сміття потрапляє у воду з суші [7]. Пластик, що потрапив у воду біля берегів Японії, з течією Куросіво за рік опиняється в самому центрі Тихого океану. Американське сміття, змивте з узбережжя поблизу Сан-Франциско та підхоплене Каліфорнійською течією, спершу пливе на південь до широти мексиканського міста Кабо Сан-Лукас, де потрапляє у Північно-екваторіальну течію та відноситься в район Гавайських островів. Протягом десяти років японське сміття потрапляє до так званої “східної плями сміття”, а американське забруднює узбережжя Філіппін. Протягом двадцяти років вся область Тихого океану, охоплена Північно-Тихоокеанською коловою течією, перетворюється на зону акумуляції сміття. Процес триває протягом останніх 60 років, починаючи з Другої світової війни, коли розпочалося масове виробництво пластику.

Смуга “супу” розпочинається від точки приблизно в 500 морських милях від узбережжя Каліфорнії та через північну частину Тихого океану повз Гаваї тягнеться до Японії. Найпоширеніша оцінка площі – 10 млн квадратних миль [8].

Вміст скупчення сміття і наслідки для живої природи

У 2004 р., за офіційними даними [7, 8], “острів” важив близько 3 млн т. За останні роки він помітно набув ваги. Вважається, що в коловороті сміття нині перебуває близько 100 млн т плавучого мотлоху.

Деякі знайдені зразки пластику були віком більше 50 років. Проте недавнє дослідження доктора Кацухіко Сайдо з Університету Ніхон (Чіба, Японія) показало, що в умовах океану

пластик розкладається на дрібні частинки доволі швидко. Таким чином, утворюється значне джерело глобального зараження [9].

М. Еріксен свого часу вивчав співвідношення пластикових відходів у океані з виробництвом пластику промисловими підприємствами [6, 9, 10]. Так, у 1999 р. у тихоокеанському коловороті сміття містилося близько 0,002 г пластику на квадратний метр, у 2005 р. – вже 0,004. За цей час лише у Північній Америці виробництво пластику зросло у кілька десятків разів.

Вважається, що пластик становить близько 90 % всього сміття в океанах. У 2006 р. співробітники Програми ООН з навколишнього середовища (UNEP) підраховали, що на квадратну милю океану припадає 46 тис. одиниць плавучого пластикового сміття.

За даними UNEP, близько 70 % сміття, що потрапляє в океан, тоне. Поки що невідомо, які гори відходів збираються на дні океану та чи доберуться біологи до них коли-небудь. Організація Ocean Conservancy [11] склала список найпоширеніших складників сміття (в штуках): недопалки – 1,9 млн; папір для обгортки та упаковки для їжі – 768 тис.; кришки та ковпачки – 704 тис.; сумки та пакети – 700 тис.; пластикові пляшки – 570 тис.; скляні пляшки – 412 тис.; чашки/тарілки/ложки/виделки/ножі – 353 тис.; соломинки для коктейлів – 350 тис.; бляшанки з-під напоїв – 328 тис.; кінчики сигар – 186 тис.

Крім того, було виявлено велику кількість повітряних кульок, одягу, взуття, ярличків, іграшок, батарейок, автопокришок, шприців, підгузків. Згідно з даними [12], мінімум 60 % сміття становлять предмети, що стосуються різноманітних захоплень і хобі людини, які мали б перебувати зовсім не в океані чи річці, а на березі; 29 % становлять цигаркові недопалки. Частка сміття, що викидається безпосередньо в океані, становить 7 %, а відходів, які спеціально затоплюються в морі, – 2 %.

Пластикові відходи є причиною загибелі більше 1 млн морських птахів за рік, а також більше 100 тис. морських ссавців – дельфінів, китів, тюленів [6, 7, 12]. Частина сміття викидається назад на берег, що негативно впливає на існування прибережних видів тварин.

Продукти розкладу пластику отруюють водне середовище. Крім того, існує ще одна проблема: тварини плутаються у смітті, що плаває. За 2000–2006 рр. добровольці знаходили безліч морських тварин, заблокованих у смітті та покинутих риболовецьких снастях. Лише в 2006 р. було виявлено 1074 тварини, і тільки одна із них виявилася живою – це була річна самка тюленя.

Бачимо, що наслідки існування плями сміття у Тихому та й загалом у Світовому океані для біосфери є трагічними.

Методологія сценарного аналізу

Аналіз сценаріїв (сценарний аналіз) – метод прогнозування, який полягає в поділі всієї сукупності можливих подій на кілька груп та у визначенні логічної послідовності наслідків для кожної групи подій. Застосовується у разі, якщо ймовірність виникнення різних подій майже однакова та існує необхідність заздалегідь вибрати стратегію дій у рамках кожного сценарію. Сценарій – можливий набір подій, що визначає розвиток тих чи інших факторів, які впливають на результат діяльності. Існують різноманітні підходи до роботи зі сценаріями, тому виникають відмінності у типах самих сценаріїв та методах їх побудови.

Незалежно від типу, до якого належить сценарій, загальну методику побудови можна описати за допомогою ітеративної послідовності базових кроків, що включає в себе якісний опис процесу та побудову кількісної моделі [13, 14].

Вхідні дані для побудови сценарного аналізу

Як вхідні дані для побудови сценарного аналізу використовуємо статистику переробки твердих побутових відходів у США, країнах Європейського союзу та Сингапурі [15–17].

На рис. 2 відображено зростання кількості відходів у США з 1960 по 2010 рр. Протягом 2010 р. у США було утворено 250 млн т сміття, з яких більш ніж 85 млн т перероблено або компостовано, тобто рівень переробки становив 34,1%. Крім того, близько 12% відходів використано на відновлення енергії.

Якщо ж розглядати кількість пластикових відходів, то тут ситуація найгірша. Перероблено було лише 8,2% від загальної маси 34,01 млн т. З графіка на рис. 3 простежується загальний тренд значного відставання рівня переробки від рівня їх загального утворення. Така тенденція різною мірою спостерігається для окремих підвидів сміття, втім відсоток перероб-

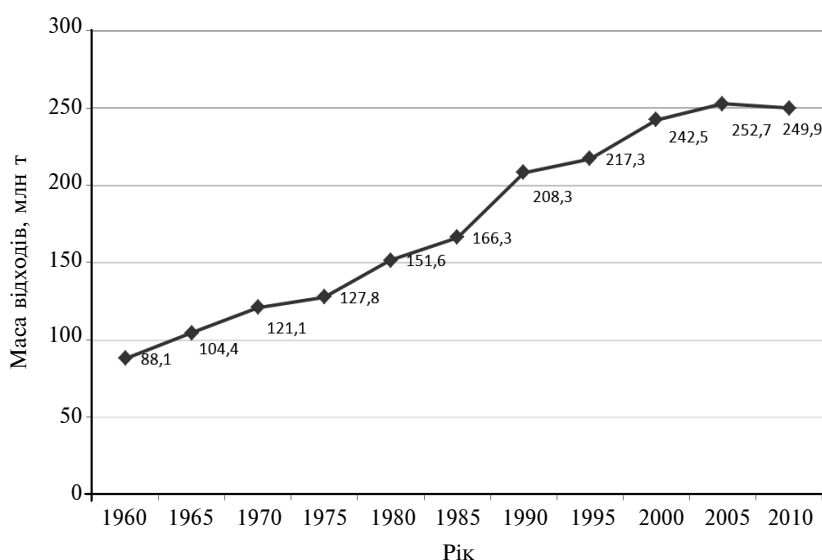


Рис. 2. Маса відходів у США з 1960 по 2010 рр.

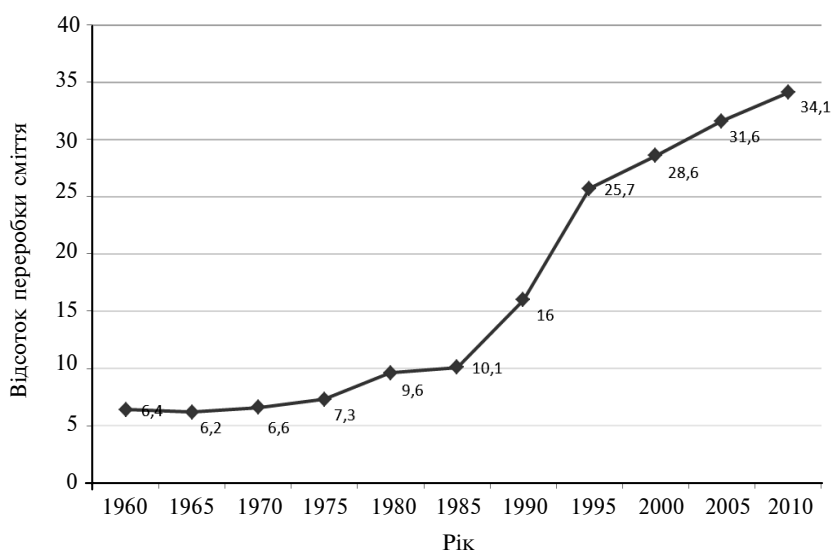


Рис. 3. Відсоток переробки сміття у США з 1960 по 2010 рр.

ки пластику найнижчий (для порівняння, відсоток переробки металевих відходів – близько 65 %).

Ситуація з переробкою пластикових відходів у країнах Європи ще гірша. Порівняно з 2004 р. відсоток переробленого пластику незначно, але знизився. Офіційні звіти пов'язують таку тенденцію зі зростанням кількості пластику, що вивозиться на переробку за межі Європейського Союзу. Станом на 2008 р. пластик становив лише 1,2 % відходів, що були перероблені.

Країни Азії мають різний підхід до проблем засмічення, що корелює з рівнем життя у цих країнах. Статистика по країнах Південно-східної Азії не ведеться, як не ведеться централізований збір сміття. Можна лише припускати, що відсоток переробки пластику в регіоні стабільно низький або майже відсутній.

Сингапур демонструє політику “нульових відходів”. Населенням країни щорічно утворюється близько 7 млн т сміття, 59 % якого переробляється, 38 % спалюється із відновленням енергії і лише 3 % утилізується на полігоні Семакау. Пластик тут становить близько 11 % усіх відходів, 23 % відходів, що використовуються як енергоносії, та 2 % сміття, що переробляється. Національний план Сингапура на найближчі роки – довести рівень переробки пластику до 35 % та реалізувати освітні заходи, спрямовані на зменшення використання пластику та поліетилену в побуті.

Таким чином, на прикладах різних країн можна виділити 4 різні підходи до поводження з пластиковими відходами:

1) поступове збільшення рівня переробки в межах однієї країни (приклад – США);

2) відсутність вираженої динаміки зростання рівня переробки за наявності планів такого зростання, основний метод – зменшення рівня споживання пластику (приклад – Сингапур);

3) зростання рівня переробки за рахунок переробки в інших країнах (приклад – країни ЄС);

4) відсутність моніторингу ситуації щодо твердих побутових відходів та відсутність умов для переробки (приклад – нерозвинені країни).

Для даних по кількості сміття, утвореного в США, та по відсотках його переробки для прогнозування було побудовано регресійні моделі 1, 2 і 3-го порядків, та моделі з трендом 1, 2 і 3-го порядків. Результати моделювання наведені в табл. 1–6.

За результатами моделювання та одержаними характеристиками можна визначити, що процес утворення відходів найкраще описується за допомогою авторегресійної моделі 1-го порядку (AR1), також хорошими характеристиками відзначається модель з трендом 3-го порядку. Процес переробки відходів найкраще описується за допомогою авторегресійної моделі 2-го порядку (AR2), також хорошими характеристиками відзначається модель з трендом 3-го порядку.

Використовуючи ці моделі, можемо спрогнозувати, що в найближчі 10 років маса утвореного сміття буде зростати, але незначно, і досягне близько 272 млн т на рік. Відсоток переробки також зростатиме незначно і може становити близько 36–37 % на рік.

Таблиця 1. Моделювання часового ряду кількості утвореного сміття

Критерій	AR1	AR2	AR3	Тренд 1-го порядку	Тренд 2-го порядку	Тренд 3-го порядку
R^2	0,957240	0,947888	0,942102	0,974548	0,975025	0,990175
Akaike	8,058115	8,348301	8,595886	7,661855	7,824755	7,073651
Schwartz	8,118632	8,414043	8,635607	7,734199	7,933272	7,218341
DW	2,251583	1,663986	1,918865	1,457240	1,448569	2,558983

Таблиця 2. Коефіцієнти регресії часового ряду кількості утвореного сміття

Параметр	AR1	AR2	AR3
C1	25,96026	32,58177	28,30994
C2	0,941788	0,662438	0,949415
C3	–	0,272988	0,515637
C4	–	–	–0,601757

Таблиця 3. Коефіцієнти моделі з трендом часового ряду кількості утвореного сміття

Параметр	Тренд 1-го порядку	Тренд 2-го порядку	Тренд 3-го порядку
C1	66,24909	62,50061	95,56818
C2	18,20091	19,93098	–7,383081
C3	–	–0,144172	5,306527
C4	–	–	–0,302817

Таблиця 4. Моделювання часового ряду відсотків переробки сміття

Критерій	AP1	AP2	AP3	Тренд 1-го порядку	Тренд 2-го порядку	Тренд 3-го порядку
R^2	0,932603	0,938007	0,931369	0,888525	0,956436	0,975342
Akaike	5,272270	5,425120	5,791359	5,739237	4,981485	4,594158
Schwartz	5,332787	5,490862	5,831080	5,811581	5,090002	4,738847
DW	1,364447	2,006565	2,033973	0,601505	1,201224	1,584473

Таблиця 5. Коефіцієнти регресії часового ряду відсотків переробки сміття

Параметр	AP1	AP2	AP3
C1	1,609814	2,355856	2,752741
C2	1,078338	1,381279	1,349939
C3	–	–0,406265	–0,519824
C4	–	–	0,173993

Таблиця 6. Коефіцієнти моделі з трендом часового ряду відсотків переробки сміття

Параметр	Тренд 1-го порядку	Тренд 2-го порядку	Тренд 3-го порядку
C1	–2,489091	5,683636	12,43333
C2	3,175455	–0,596573	–6,171873
C3	–	0,314336	1,426923
C4	–	–	–0,061810

Побудова проектних сценаріїв розвитку ситуації

Проектні сценарії загалом подібні до візуальних сценаріїв, але мають важливу концептуальну відмінність. Проектні сценарії, на відміну від візуальних, описують майбутнє, виходячи в основному з очікувань, що базуються на реальності, а не з найбільш бажаних результатів.

Виконаємо процес побудови сценарію поетапно.

Визначення рамок процесу. В рамках побудови сценарної моделі розглядаються рівні продукування відходів та їх переробки залежно від поточної ситуації у різних країнах. Часовий інтервал моделювання – 10 років.

Визначення зацікавлених сторін. Зацікавленими сторонами виступають уряди окремих держав, громадяни окремих держав, представники громадських та екологічних організацій, мешканці прибережних зон, що займаються рибним промислом.

Визначення основних трендів. Серед основних трендів, що впливають на процес, можна визначити такі:

- політика держав у галузі поводження з відходами, спрямована на збільшення кількості сміття, що переробляється;
- зростання рівня екологічної свідомості громадян, зокрема відмова від використання надлишку пластику в побуті, викидання відходів лише в призначені для цього місця тощо;
- зростання активності громадських організацій, спрямованих на прибирання зелених зон та освітню діяльність;

- стабільна відсутність активності в зоні плями сміття, спрямованої на зменшення її розмірів.

Встановлення факторів невизначеності. Відсутність статистики стосовно рівня переробки пластику в багатьох країнах істотно впливає на характеристики процесу накопичення відходів у цілому. Втім реальний ступінь такого впливу невідомий. Другий фактор невизначеності – реальні розміри плями сміття. Оцінки площі та маси різняться у кілька разів, тому говорити про кількісне моделювання неможливо.

Створення початкових груп. Для створення початкових груп виділимо основні тренди й фактори невизначеності та перетнемо їх області впливу. Основні фактори – збільшення кількості пластику, що потрапляє в переробку, та відсутність відповідальності за пляму, відтак і відсутність активності щодо її зменшення. Таким чином, у перетині отримуємо перспективу зменшення потрапляння відходів в океан та приріст, хоч і повільний, площі плями.

Розроблення сценаріїв. Сценарії у цьому процесі мають якісний вигляд, оскільки не існує точних даних щодо розміру та маси плями сміття. Сценарії можуть мати вигляд проходів по дереву рішень або історій з урахуванням важливих трендів і факторів невизначеності. На основі статистичних даних можна зробити висновок, що найбільш вагомими є фактор підвищення рівня вторинної переробки пластику, зростання соціальної свідомості та наявність активності у зоні плями.

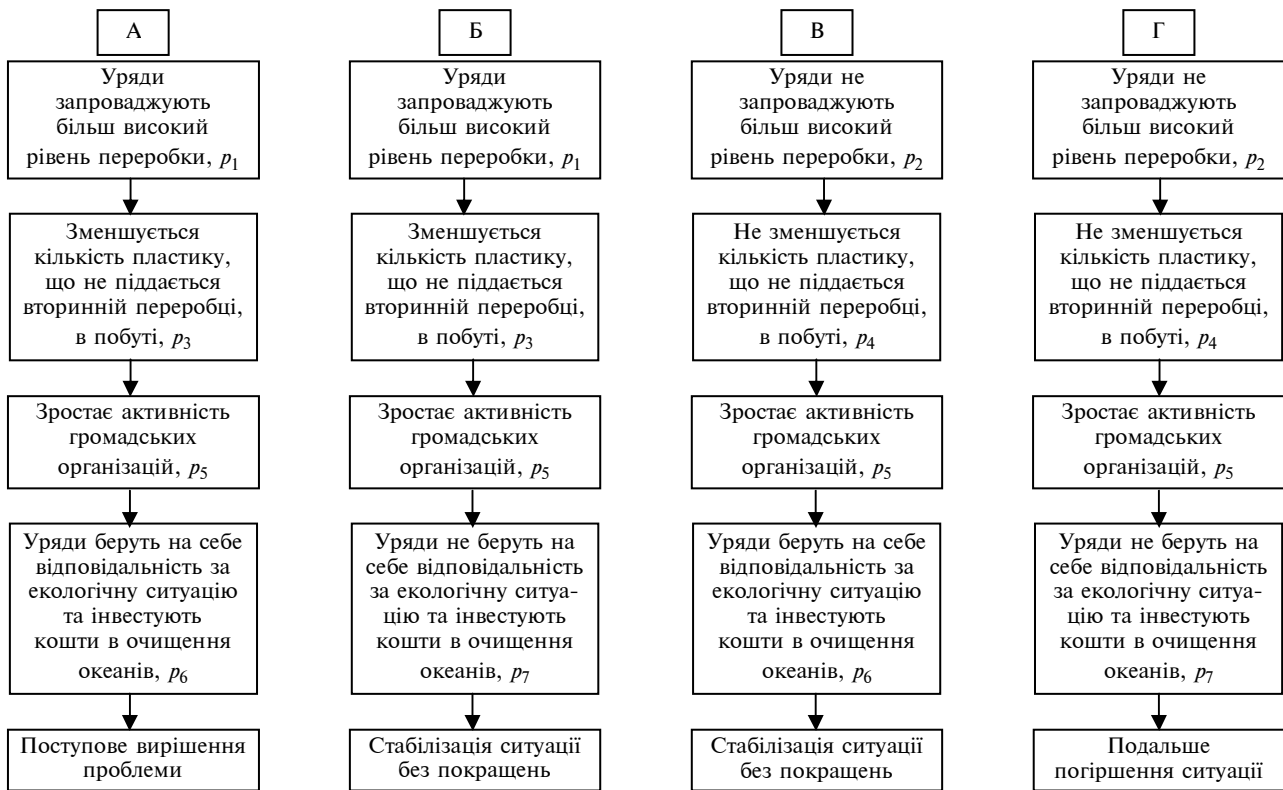


Рис. 4. Варіанти можливих проходів по дереву сценаріїв

Отже, варіюємо ці фактори та одержуємо сценарії. На рис. 4 наведено описані варіанти проходів по дереву сценаріїв. Імовірності станів вершин p_1, p_2, \dots, p_7 на сьогодні можуть бути визначені лише методом експертних оцінок.

Перехід до сценаріїв прийняття рішень. На цьому етапі можна визначити індикатори, за якими сценарії оцінюються на життєздатність. Такі індикатори можуть бути виділені з допомогою статистичних даних. Бачимо, що активність у зоні засмічення стабільно відсутня, отже, можна передбачити, що в найближчі 10 років уряди і надалі не візьмуть на себе відповідальність за екологічне лихо. Отже, сценарії "А" і "В" малоймовірні. На локальному рівні спостерігається зростання рівня переробки, суспільної свідомості та активності громадських організацій. Утім цих зусиль замало для покращення ситуації. Робимо висновок, що найбільш імовірний і життєздатний сценарій – "Б", тобто в кращому випадку у найближчі 10 років ситуація залишатиметься стабільно поганою.

Висновки

Виконане дослідження дає можливість порівняти сценарії розвитку політики поводження із твердими побутовими відходами у країнах світу та впливу можливих реалізацій даних сценаріїв на динаміку змін тихоокеанської плями сміття протягом найближчих десяти років. На прикладі цієї екологічної проблеми описано загальну методику побудови сценарного аналізу. За допомогою реальних даних визначено індикатори правдивості побудованих сценаріїв та визначено найбільш життєздатний серед них. У подальших дослідженнях можливо здійснювати кількісне моделювання на основі статистичних даних, зокрема визначення числових коефіцієнтів впливу основних трендів на динаміку росту тихоокеанської плями сміття.

Отримані результати досліджень будуть корисними для виконання сценарного аналізу надзвичайних ситуацій в Україні.

1. C.M. Boerger et al. Plastic Ingestion by Planktivorous Fishes in the North Pacific Central Gyre [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21067782>
2. G. Lattin et al. Quantity and type of plastic debris flowing from two urban rivers to coastal waters and beaches of South

- hern California [Online]. Available: http://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-194_Moore.pdf
3. *C.J. Moore et al.* A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre [Online]. Available: http://5gyres.org/media/Moore_2001_plastic_in_North_Pacific_Gyre.pdf
 4. *P.G. Ryan et al.* Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19528052>
 5. *R.C. Thompson et al.* Plastics. The environment and human health: current and future trends [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2873021/>
 6. *Entering Eastern Garbage Patch* [Online]. Available: <http://ship2shore.blogspot.com/2008/02/entering-eastern-garbage-patch.html>
 7. *The Trash Vortex* [Online]. Available: <http://www.greenpeace.org/international/en/campaigns/oceans/pollution/trash-vortex/>
 8. *Out of sight, out of mind* [Online]. Available: http://ipulsar.net/news/uploads/posts/2008-12/1228280180_ocean.jpg
 9. *Plastics In Oceans Decompose, Release Hazardous Chemicals, Surprising New Study Says* [Online]. Available: <http://www.sciencedaily.com/releases/2009/08/090819234651.htm>
 10. *Waste facts* [Online]. Available: http://www.cleanair.org/Waste/wasteFacts.html/#_edn13
 11. *Ocean Conservancy* [Online]. Available: <http://www.oceanconservancy.org>
 12. *Pacific Trash Vortex* [Online]. Available: <http://sprinterlife.com/2012/01/pacific-trash-vortex.html>
 13. *P.J.H. Schoemaker*, Multiple Scenario Development: its conceptual and behavioral foundation, *Strategic Management J.*, vol. 14, no. 3, pp. 193–213, 1993.
 14. *P.J.H. Schoemaker*, “Using Scenarios in Strategic Planning”, in *R&D Meets M&A*. Philadelphia: Chemical Heritage Press, 2004, ch.12, pp. 81–90.
 15. *Municipal Solid Waste (MSW) in the United States: Facts and Figures* [Online]. Available: <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/msw99.htm>
 16. *Waste statistics* [Online]. Available: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Waste_statistics
 17. *Singapore Waste Statistics 2011* [Online]. Available: <http://www.zerowastesg.com/2012/03/27/singapore-waste-statistics-2011>

Рекомендована Радою
Навчально-наукового комплексу
“Інститут прикладного системного
аналізу” НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
12 жовтня 2012 року