

ЛАНДШАФТНА ЕКОЛОГІЯ

УДК 502.2:911.5(075.8)

DOI: 10.31652/2786-5665-2022-2-84-101

Самойленко В.М.

Доктор географічних наук, професор.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна.

viksam1955@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0327-1477

Вішнікіна Л.П.

Доктор педагогічних наук, професор.

Полтавський національний педагогічний університет імені В.Г. Короленка, Україна.

lpvishnikina@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0976-5512

Діброва І.О.

Кандидат географічних наук, доцент.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна.

ivandibrova336@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1157-6315

ПРИРОДНИЧО-ГЕОГРАФІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЯК АНАЛІТИЧНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТРУМЕНТ СУЧАСНОЇ ЛАНДШАФТНОЇ ЕКОЛОГІЇ

Обґрунтовано та викладено теоретично-методичні підвалини природничо-географічного моделювання як аналітично-технологічного інструмента сучасної ландшафтної екології. Під ним розуміється дослідження структури, динаміки та стану природничих геосистем, зв'язків і процесів усередині них, між ними та із зовнішнім середовищем за допомогою природничо-географічних моделей. Природнича геосистема тлумачиться як складна вкеровна природно-натурально-антропогенна система з експлуатацією її ресурсів. Природничо-географічне моделювання здійснюється за закономірностями власної динаміки природничих геосистем. За кінцеву мету моделювання править стабілізація структури та стану геосистем шляхом геоecологічно-економічної оптимізації користування геосистемними ресурсами та інших заходів з геоecологічної безпеки на основі сучасних моніторингових систем і мереж та геоінформаційних технологій. Напрацювання може бути використано під час планування післявоєнного відновлення економіки та довкілля держави.

Ключові слова: природничо-географічне моделювання, природнича геосистема, природно-соціально-економічні функції, геоecологічно-економічне збалансування, оптимізація управління станом.

Samoilenko V.M., Vishnikina L.P., Dibrova I.O. NATURAL-GEOGRAPHIC MODELING AS AN ANALYTICAL-TECHNOLOGICAL TOOL OF MODERN LANDSCAPE ECOLOGY

Theoretical-methodological foundations of natural-geographic modeling as an analytical-technological tool of modern landscape ecology are substantiated and presented. Such modeling refers to the study of the structure, dynamics and condition of natural geosystems, relationships and processes within and between them and with the external environment using natural-geographic models. Natural geosystem is interpreted as a complex controllable natural-anthropogenic system with the exploitation of its resources. Natural-geographic modeling is carried out according to regularities of natural geosystems' own dynamics. Stabilization of geosystems' structure and state through geoecological-economic optimization of the geosystem resources use and other measures of geoecological security on the basis of modern monitoring systems and networks and geographic information technologies is the ultimate goal. The interpretation and ways to formalize the concepts of «natural-geographical system», «resources and natural-socio-economic functions of the geosystem» is improved. The principles of natural geosystems management optimizing have been further developed. These principles are designed to numerically determine the effectiveness of real, possible or appropriate through geoecological criteria natural-socio-economic functions of the geosystem. Such efficiency is equated with the efficiency of geosystem natural resources use, which is adequate to the efficiency of the geosystem operation mode. The results are intended for students and lectures of

natural, especially geographic, specialties of universities and higher education institutions, as well as specialists in the scope of conservation and restoration of the environment based on the optimization of resource use, taking into account international environmental cooperation. The experience can be used in planning the post-war recovery of Ukraine's economy and environment.

Keywords: natural-geographic modeling, natural geosystem, natural-socio-economic functions, geocological-economic balancing, state management optimization.

Актуальність теми дослідження. Сучасні виклики, зокрема й воєнні, які спричинюють загрози ландшафтному різноманіттю та нагальну необхідність його збереження, відновлення і відтворення, зумовлюють потребу в удосконаленні інструментів змістового, інформаційного та розрахункового оцінювання впливу людської діяльності на довкілля. Це стосується передусім моделювання антропогенного впливу на ландшафти та/або їхні агрегації у вигляді регіональних ландшафтних структур. Метою при цьому є подальше управління антропогенним впливом, зменшення зазначених загроз і забезпечення геоекологічно-економічно збалансованого розвитку довкілля.

Стан вивчення питання, основні праці. В узагальнювальних частинах праць [1-6] зазначено, що наразі існує вельми багато наукових розробок із застосування різноманітного модельного апарату в ландшафтній екології, зокрема напрацювання [7-14]. Утім відсутнє цілісне концептуально-прикладне подавання змісту і засобів саме природничо-географічного моделювання як інструментарію, що опікується предметною областю не тільки ландшафтної екології, а й природничої географії в цілому.

Мета дослідження. За мету цього дослідження править обґрунтування та виклад теоретично-методичних принципів і підходів природничо-географічного моделювання як аналітично-технологічного інструмента сучасної ландшафтної екології.

Методи дослідження. Для отримання положень, наведених далі, застосовувалися сучасні методи конструктивно-географічного та ландшафтно-екологічного аналізу. Останні було синергічно доповнено методами ймовірнісного аналізу, геоінформаційного моделювання та експертних оцінювань у геоекології. Також було використано багаторічний науково-методичний досвід та прикладні розвідки авторів цієї праці в царині геоінформаційного математичного моделювання різноманітних геосистем ([3-14]).

Виклад основного матеріалу. Для і під час природничо-географічного моделювання використовуються такі принципи та підходи.

Природничо-географічна система або **природнича геосистема** певного ієрархічного рангу (надалі, інколи просто «**геосистема**», аббревіатурно «**ГЕО**») розглядається як складна вкеровна природно-натурально-антропогенна система з експлуатацією її ресурсів, яка містить чотири генезисно-еволюційні структурно-функціональні підсистеми (**ГЕП**). А саме, така геосистема подається через поєднання та взаємодію її (квазі)природної (**КПГЕП**), натурально-антропогенної (**НАГЕО**) та антропогенної підсистем (**АГЕП**), а також підсистеми геосистемних каркасних меж (**КМГЕО**), як зовнішньоструктурних, тобто всієї **ГЕО**, так і внутрішньоструктурних різного ґатунку (див. [3]). Це можна записати, по-перше, як

$$\mathbf{ГЕО} \in \{\mathbf{ГЕП}\} \in \{\mathbf{КПГЕП}; \mathbf{НАГЕП}; \mathbf{АГЕП}; \mathbf{КМГЕО}\} . \quad (1.1)$$

По-друге, праву частину моделі (1.1) для **структурно-функціональної формалізації природничої геосистеми** можна також інтерпретувати як перетин (квазі)природної підсистеми ком-

бінацією натурально-антропогенної та антропогенної підсистем і об'єднання всіх трьох таких підсистем з підсистемою каркасних меж геосистеми. А отже, відповідно застосовуючи оператори кон'юнкції та диз'юнкції, можна записати, що

$$(1.2) \{GEO\} \in \{GEP\} \in \{((KPGEP) \cap (NAGEP \cup AEP)) \cup KM GEO\}.$$

Слід зважати на те, що для певних різновидів каркасних меж, насамперед антропогенних, а також т.зв. структуро-нерозподільних тощо, не виключеною є доцільність зміни останнього оператора формули (1.2) на оператор кон'юнкції (див., наприклад, [3]).

По-третє, динаміку складників моделі (1.2) можна формалізаційно подати як

$$(1.3) \quad D \{GEO\} = D \{GEP\} = \{((KPGEP(\omega_{KPGEP}, R_{KPGEP}, t)) \cap (NAGEP(\omega_{NAGEP}, R_{NAGEP}, t) \cup AEP(R_{AEP}, t))) \cup KM GEO((\omega_{KM GEO}, R_{KM GEO}, t))\},$$

де $KPGEP(\omega_{KPGEP}, R_{KPGEP}, t)$ і $NAGEP(\omega_{NAGEP}, R_{NAGEP}, t)$ – набір випадкових полів (квазі)природної та натурально-антропогенної підсистем GEO ; $AEP(R_{AEP}, t)$ – набір «антропогенно»-детермінованих полів антропогенної підсистеми GEO ; $KM GEO((\omega_{KM GEO}, R_{KM GEO}, t))$ – набір випадкових і/або «антропогенно»-детермінованих полів підсистеми каркасних меж GEO в залежності від походження / функціонування таких меж; ω у цілому – сукупність елементарних результатів досліду або його серій, а отже ω_{KPGEP} , ω_{NAGEP} і $\omega_{KM GEO}$ – числа фіксацій випадкових полів за їхніми значеннями та/або координатами, відповідно, (квазі)природної та натурально-антропогенної підсистем і підсистеми (квазі)природних і натурально-антропогенних каркасних меж GEO ; R у цілому – загальна просторова область (визначення) всіх полів моделі (1.3), тобто загальні межі геосистеми при $R \in (x, y)$ у прямокутній системі координат зазвичай обраного ГІС-інструментарію, а отже ця область містить власні просторові області (різнорангові субобласті) полів геосистем-складників, тобто, з огляду на модель (1.3), $R \in \{((R_{KPGEP} \cap (R_{NAGEP} \cup R_{AEP})) \cup R_{KM GEO})\}$; t – параметр неперервного часу.

Специфіку задавання «антропогенно»-детермінованих полів моделі (1.3), зокрема умовність ад'єктива «детерміновані» та оперування т.зв. позиційно квазінезмінними полями, розглянуто більш докладно в наших монографіях [3-5].

«Базова» під час структурно-функціональної формалізації (квазі)природна підсистема GEO ототожнюється з відповідними геосистемами, які тією, чи іншою мірою віддзеркалюють референційний (реконструйований) для моделювання природний стан GEO , зосібна й гіпотетично-інваріантний тощо (див. нашу монографію [5]). Такі природні, а найчастіше, з огляду на «уявність» зазначених референційних систем, квазіприродні геосистеми може бути формалізаційно задано як різнорівневі геосистеми, по-перше, ландшафтних територіальних структур ($ЛТС$). Поміж останніх – генетико-морфологічна ($ГМЛТС$), позиційно-динамічна ($ПДЛТС$), басейнова ($БЛТС$) і геотонна ($ГТЛТС$) структура, а також біоландшафтна територіальна структура ($БЛЛТС$) (див. [6]) тощо. По-друге, (квазі)природні геосистеми можуть задаватися певним чином поєднаними із щойно зазначеними $ЛТС$ таксонами фізико-географічного ($ФГТ$), басейнового територіального ($БТР$) і морфологічно-позиційного ($БМПР$), геоботанічного ($ГБР$), зоогеографічного

(ЗГР) та ін. районування тощо. Спрощений формалізаційний запис таких побудов виглядає як

$$\{КПГЕП\} \in \{ГМЛТС \cap ПДЛТС \cap БЛТС \cap ГТЛТС \cap БІЛТС \cap \Phi ГТ \cap БТР \cap БМПР \cap ГБР \cap ЗГР \cap КПІН\}. \quad (1.4)$$

де *КПІН* – інші (квазі)природні геосистеми, а також певні комбінації таких геосистем.

Натурально-антропогенну та антропогенну підсистеми ГЕО формул (1.1)-(1.3) доцільно ототожнювати з відповідними сукупностями певною мірою антропізованих геосистем – від «суто» натуральних до «суто» штучних.

При цьому рівень натуральності геосистем розуміється як міра успадкованої, набутої чи успадковано-набутої здатності реальних геосистем до нештучної самоорганізації та саморегуляції шляхом самовкервного упорядкування речовинно-енергетичних потоків в єдиній системі. За таких умов провідні чинники та параметри натуральних або близьких до них систем можуть бути як схожими, так і геть відмінними від «попередніх до антропізації». Утім в усіх випадках ці чинники та параметри повинні визначатися певними нештучними процесами довіклля тощо.

Власне міра антропізації та рівень натуральності геосистем змістово-функціонально та експертно-параметрично визначається в залежності від міри антропогенного впливу на них (табл.1),

Таблиця 1 – Міра антропізації та рівень натуральності геосистем у залежності від міри антропогенного впливу на них (на основі нашої монографії [5], н/к – нижньокатегорійний; в/к – верхньокатегорійний)

Міра антропогенного впливу на геосистеми	Категорійний код і міра антропізації геосистем	Код і рівень натуральності геосистем	Категорійні діапазони значень і середньокатегорійні значення індексу антропізації геосистем ($I_{АНТ. \%}$) *
майже відсутній вплив	1 – вельми незначна антропізація	1 – натуральні	(0...15,8]; 7,9
слабкий вплив	2 – незначна антропізація	2 – майже натуральні	(15,8...28,3]; 22,1
помірний вплив	3 – помірна антропізація	3 – напівнатуральні	(28,3...39,2]; 33,7
н/к помірно-сильний вплив	4а – н/к помірно-значна антропізація	4а – н/к відносно далекі від натуральних	(39,2...44,8]; 42,0
в/к помірно-сильний вплив	4б – в/к помірно-значна антропізація	4б – в/к відносно далекі від натуральних	(44,8...50,4]; 47,6
н/к сильний вплив	5а – н/к значна антропізація	5а – н/к далекі від натуральних	(50,4...57,1]; 53,8
в/к сильний вплив	5б – в/к значна антропізація	5б – далекі від натуральних	(57,1...63,7]; 60,4
вельми сильний вплив	6 – вельми значна антропізація	6 – чужі натуральним	(63,7-79,5]; 71,6
надзвичайно сильний вплив	7 – надмірна антропізація	7 – штучні	(79,5-100]; 89,8

* задається та/або обчислюється для модельних об'єктів як розрахунковий за табл.1.1-1.3 і ін. або як середньовиважений за формулами (1.7), (1.8) тощо (див. далі).

тобто його змісту, інтенсивності, тривалості тощо. При цьому оперують сьома категоріями, подекуди з поділом для суходільних (теральних) геосистем категорій 4 і 5 на 2 субкатегорії кожену – верхню і нижню для категорії. Це зумовлює і віднесення геосистем до:

– натурально-антропогенної підсистеми, яка містить натуральні, майже натуральні та напівнатуральні геосистеми з категоріями міри антропоізації / рівня натуральності 1-3;

– антропогенної підсистеми, яку сформовано відносно далекими й далекими від натуральних, чужими до натуральних і штучними геосистемами з категоріями (субкатегоріями) міри антропоізації / рівня натуральності 4а-7.

Зазначена вище міра антропогенного впливу для *суходільних (теральних) геосистем* задається через визначальні атрибути тих, які формують геосистеми, різнотипових і різнорівневих систем землекористування та/або наслідків землекористування (СЗК/НЗ або, скорочено, «систем землекористування» чи «землекористувальних систем»). Останні подаються через типізовані земельні угіддя й покрити з урахуванням цільового призначення земель тощо. А отже, тип, ранг і власне назва СЗК/НЗ визначають і тотожний їм тип, ранг і назву тих, які вони формують, геосистем, які і є складниками натурально-антропогенної та антропогенної підсистем *ГЕО* за формулами (1.1)-(1.3).

Безпосередньо використовуються різні варіанти т.зв. **робочої шкали міри антропоізації (рівня натуральності) суходільних (теральних) геосистем** (див. детальніше [5, 6]). Таку шкалу для рівнинних геосистем України, розроблену на основі [5], наведено в табл.2.

Звідси, зважаючи на можливість вирізнення щойно наведених у табл.2 геосистем і на тлі *ГЕО* у цілому, і на тлі її певних (квазі)природних геосистем потрібного рівня, які визначають межі обраних для моделювання об'єктів загалом, можна, з урахуванням можливості подальшого задавання відповідних полів (див. (1.3)), спрощено записати для геосистем першого рівня (рангу), що

$$(1.5) \quad \{НАГЕП, АГЕП\} \in \{ПО_I \cup БО_{II} \cup ЛП_{III} \cup ЧТ_{IV} \cup АГ_V \cup ГТГМ_{VI}, \cup \\ \cup РКОВ_{VII} \cup СЕ_{VII} \cup ПБ_{IX} \cup ГП_X \cup ТЗ_{XI} \cup БРР_{XII} \cup ГП_{XIII}\} .$$

Аналогічно формалізуються і геосистеми наступних рівнів табл.2. Наприклад, лісову геосистему 1-го рівня можна далі поділяти на другорівневі широколистяно-, хвойно- та мішано-лісову геосистеми, тобто (див. табл.2)

$$(1.6) \quad \{ЛП_{III}\} \in \{ЛП_{III.1} \cup ЛП_{III.2} \cup ЛП_{III.3}\} .$$

тощо.

Шкала за табл. 2 або будь-які її робочі модифікації, як загалом і вихідна шкала табл.1, можуть оцінювально оперувати середньовиваженим за площами відповідних натурально-антропогенних і антропогенних геосистем **індексом антропоізації суходільних (теральних) геосистем** певного об'єкта моделювання ($I_{АНТ,Т}^{**}$, %) за формулою

$$(1.7) \quad I_{АНТ,Т}^{**} = \sum_{i=1}^n I_{АНТ,Т,Р,i} \bullet S_i ,$$

Таблиця 2 – Робоча шкала міри антропоізації (рівня натуральності) суходільних (теральних) геосистем, спричиненої різними системами землекористування та/або його наслідків (СЗК/НЗ) ($PK_{АНТ}$ – розрахункові категорії міри антропоізації геосистем за табл.1; $I_{АНТ,T,P,i}$ – розрахункові часткові індекси антропоізації геосистем, %, за (1.7))

Коди, назви й символи натурально-антропогенних і антропогенних геосистем, сформованих певними СЗК/НЗ	Міра антропоізації ($PK_{АНТ} / I_{АНТ,T,P,i}$ %)
I – природоохоронна (ПО_I), зокрема:	1, 2
природних і біосферних заповідників і заповідних територій міжнародного значення – I.1 (ПО _{I.1})	1 / 7,9 %
заповідних зон національних природних і регіональних ландшафтних парків, заказників загальнодержавного значення та заповідних урочищ – I.2 (ПО _{I.2})	2 / 22,1 %
II – болотяна (боліт і заболочених земель) (БО_{II})	2 / 20,0 %
III – лісова (лісогосподарська) (ЛІ_{III}), зокрема:	2
III.1 – широколистяно-лісова (ЛІ _{III.1})	2 / 26,4 %
III.2 – хвойно-лісова (ЛІ _{III.2})	2 / 27,7 %
III.3 – мішано-лісова (ЛІ _{III.3})	2 / 27,7 %
IV – чагарниково-трав'яна (чагарникової та трав'яної натуральної рослинності) (ЧТ_{IV})	3 / 33,7 %
V – аграрна (сільськогосподарська) (АГ_V), зокрема:	3-6
V.1 – лук і пасовищ (АГ _{V.1})	3 / 35,2 %
V.2 – сіножатей (АГ _{V.2})	3 / 36,8
V.3 – хмільників, квітників тощо (АГ _{V.3})	4b / 48,4%
V.4 – ягідників (АГ _{V.4})	5a / 51,4%
V.5 – садів (АГ _{V.5})	5a / 52,1 %
V.6 – виноградників (АГ _{V.6})	5a / 54,2
V.7 – ріллі та перелогів (АГ _{V.7}), зокрема:	(4b...6] / (44,8 %...79,5 %]
V.7.1 – нелісова розорана (АГ _{V.7.1}), поміж неї за інтегрального коефіцієнта розчленованості рельєфу (K_{PPEL}) *:	(4b...5b] / (44,8 %...63,7 %]
слабко похилі за $K_{PPEL} \leq 0,25$ – V.7.1.1 (АГ _{V.7.1.1})	4b / 46,7 %
помірно похилі за $K_{PPEL} = (0,25...0,5]$ – V.7.1.2 (АГ _{V.7.1.2})	5a / 50,5 %
середньо похилі за $K_{PPEL} = (0,5...1,0]$ – V.7.1.3 (АГ _{V.7.1.3})	5a / 54,3 %
істотно похилі за $K_{PPEL} = (1,0...2,0]$ – V.7.1.4 (АГ _{V.7.1.4})	5b / 58,0 %
сильно похилі за $K_{PPEL} > 2,0$ – V.7.1.5 (АГ _{V.7.1.5})	5b / 61,8 %
V.7.2 – лісова розорана (АГ _{V.7.2}), зосібна:	6 / (63,7 %...79,5 %]
V.7.2.1 – широколистяно-лісова розорана (АГ _{V.7.2.1}), серед неї за K_{PPEL} :	6 / (63,7 %...69,0 %]
слабко похилі за $K_{PPEL} \leq 0,25$ – V.7.2.1.1 (АГ _{V.7.2.1.1})	6 / 64,3 %
помірно похилі за $K_{PPEL} = (0,25...0,5]$ – V.7.2.1.2 (АГ _{V.7.2.1.2})	6 / 65,3 %
середньо похилі за $K_{PPEL} = (0,5...1,0]$ – V.7.2.1.3 (АГ _{V.7.2.1.3})	6 / 66,4 %
істотно похилі за $K_{PPEL} = (1,0...2,0]$ – V.7.2.1.4 (АГ _{V.7.2.1.4})	6 / 67,4 %
сильно похилі за $K_{PPEL} > 2,0$ – V.7.2.1.5 (АГ _{V.7.2.1.5})	6 / 68,5 %

V.7.2.2 – мішано-лісова розорана ($AG_{V.7.2.2}$), поміж неї за K_{PPEI} :	6 / (69,0 %...74,3 %]
слабко похилі за $K_{PPEI} \leq 0,25$ – V.7.2.2.1 ($AG_{V.7.2.2.1}$)	6 / 69,6 %
помірно похилі за $K_{PPEI} = (0,25...0,5]$ – V.7.2.2.2 ($AG_{V.7.2.2.2}$)	6 / 70,6 %
середньо похилі за $K_{PPEI} = (0,5...1,0]$ – V.7.2.2.3 ($AG_{V.7.2.2.3}$)	6 / 71,7 %
істотно похилі за $K_{PPEI} = (1,0...2,0]$ – V.7.2.2.4 ($AG_{V.7.2.2.4}$)	6 / 72,7 %
сильно похилі за $K_{PPEI} > 2,0$ – V.7.2.2.5 ($AG_{V.7.2.2.5}$)	6 / 73,8 %
V.7.2.3 – хвойно-лісова розорана ($AG_{V.7.2.3}$), серед неї за K_{PPEI} :	6 / (74,3 %...79,5 %]
слабко похилі за $K_{PPEI} \leq 0,25$ – V.7.2.3.1 ($AG_{V.7.2.3.1}$)	6 / 74,8 %
помірно похилі за $K_{PPEI} = (0,25...0,5]$ – V.7.2.3.2 ($AG_{V.7.2.3.2}$)	6 / 75,9 %
середньо похилі за $K_{PPEI} = (0,5...1,0]$ – V.7.2.3.3 ($AG_{V.7.2.3.3}$)	6 / 76,9 %
істотно похилі за $K_{PPEI} = (1,0...2,0]$ – V.7.2.3.4 ($AG_{V.7.2.3.4}$)	6 / 78,0 %
сильно похилі за $K_{PPEI} > 2,0$ – V.7.2.3.5 ($AG_{V.7.2.3.5}$)	6 / 79,0 %
VI – гідротехнічно-гідромеліоративна ($ГТГМ_{VI}$) , зокрема:	5а, 6
VI.1 – осушувально-зволожувальна ($ГТГМ_{VI.1}$)	5а / 52,8 %
VI.2 – осушувальна або зволожувальна ($ГТГМ_{VI.2}$)	6 / 65,2 %
VI.3 – гідромеліоративно-геонегативна (зафіксованих геонегативних наслідків меліорації) ($ГТГМ_{VI.3}$)	6 / 79,5 %
VII – рекреаційно-оздоровча ($РКО_{VII}$)	6 / 67,0 %
VIII – селитебна (CE_{VIII}) , зосібна:	6, 7
VIII.1 – сільської (дискретної) забудови ($CE_{VIII.1}$)	6 / 63,8 %
VIII.2 – міської та селищної міського типу (суцільної) забудови ($CE_{VIII.2}$), поміж неї з кількістю жителів:	7 / (79,5 %...100 %]
$\leq 10\ 000$ – VIII.2.1 ($CE_{VIII.2.1}$)	7 / 80,8 %
(10 000 – 20 000] – VIII.2.2 ($CE_{VIII.2.2}$)	7 / 83,4 %
(20 000 – 50 000] – VIII.2.3 ($CE_{VIII.2.3}$)	7 / 85,9 %
(50 000 – 100 000] – VIII.2.4 ($CE_{VIII.2.4}$)	7 / 88,5 %
(100 000 – 200 000] – VIII.2.5 ($CE_{VIII.2.5}$)	7 / 91,0 %
(200 000 – 500 000] – VIII.2.6 ($CE_{VIII.2.6}$)	7 / 93,6 %
(500 000 – 1 000 000] – VIII.2.7 ($CE_{VIII.2.7}$)	7 / 96,2 %
$> 1\ 000\ 000$ – VIII.2.8 ($CE_{VIII.2.8}$)	7 / 98,7 %
IX – промислово-будівельна (промислових і/або будівельних об'єктів) ($ПБ_{IX}$)	7 / 82,5 %
X – гірничопромислова ($ГП_X$)	7 / 89,8 %
XI – транспортно-зв'язкова (об'єкти транспорту та зв'язку) ($ТЗ_{XI}$) , серед неї:	4, 6, 7 / 44,8 %; 71,6 %; (79,5 %...100 %]
грунтові дороги (путівці) – XI.1 ($ТЗ_{XI.1}$)	4 / 44,8 %
удосконалені ґрунтові дороги – XI.2 ($ТЗ_{XI.2}$)	6 / 71,6 %
шосе, ЛЕП низької напруги – XI.3 ($ТЗ_{XI.3}$)	7 / 82,9 %
удосконалені шосе, вузькоколійні залізниці тощо, ЛЕП середньої напруги – XI.4 ($ТЗ_{XI.4}$)	7 / 89,7 %
автостради, ширококолійні залізниці, ЛЕП високої напруги – XI.5 ($ТЗ_{XI.5}$)	7 / 96,6 %

ХІІ – без(рідко)рослинна (територій з відсутньою або незначною рослинністю) (<i>БРР_{ХІІ}</i>), зокрема:	1, 2
ХІІ.1 – оголених скель (оголених виходів і відслонень гірських порід) (<i>БРР_{ХІІ,1}</i>)	1 / 12,6 %
ХІІ.2 – пісків (<i>БРР_{ХІІ,2}</i>)	2 / 22,1 %
ХІІ.3 – рідкорослинна (територій з рідкою (розкиданою) рослинністю) (<i>БРР_{ХІІ,3}</i>)	2 / 26,0 %
ХІІ.4 – згарищ (<i>БРР_{ХІІ,4}</i>)	4а / 43,8 %
ХІІІ – гетерогенні та інші геосистеми (<i>ГІГ_{ХІІІ}</i>), зокрема:	2, 4а, 5а
ХІІІ.1 – перехідна лісо-чагарниково-трав'яна (перехідної лісо-чагарниково-трав'яної рослинності) (<i>ГІГ_{ХІІІ,1}</i>)	2 / 26,0 %
ХІІІ.2 – аграрно-лісова (<i>ГІГ_{ХІІІ,2}</i>)	4а / 44,8 %
ХІІІ.3 – аграрно-натурально-рослинна (агроугідь з істотними площами натуральної рослинності) (<i>ГІГ_{ХІІІ,3}</i>)	5а / 57,1 %
ХІІІ.4 – аграрно-комплексна (комплексних агроугідь) (<i>ГІГ_{ХІІІ,4}</i>)	5b / 60,4 %

* K_{PPEI} – інтегральний коефіцієнт розчленованості рельєфу за [5,6]

де $I_{ANT,T,Pi}$ – розрахунковий індекс антропоізації, який є частковим для i -тої розрахункової натурально-антропогенної або антропогенної геосистеми об'єкта моделювання, заданого межами його (квазі)природної підсистеми, і визначається за табл.2 або її робочими модифікаціями; s_i – загальна частка площі геосистеми з $I_{ANT,Pi}$ (в частках одиниці, за яку править загальна площа модельного об'єкта); n – кількість розрахункових натурально-антропогенних і/або антропогенних геосистем об'єкта моделювання.

Доцільно зважати і на таке. По-перше, принципи та способи деталізації або модифікації шкали табл.2 розглянуто в [5]. По-друге, склад і категорювання натурально-антропогенних і антропогенних геосистем у табл.2 наведено для модельних геосистем регіонально-районного рангу з відповідними цьому масштабами моделювання. Це стосується, наприклад, геосистем, заданих межами до фізико-географічних районів включно тощо. Для модельних геосистем локального рангу та великого масштабу моделювання склад і категорювання зазначених геосистем, як, подекуди, і (квазі)природних геосистем, може бути дещо іншим. Наприклад, селитебні геосистеми регіонально-районного рангу категорюються в цілому в табл.2 як антропогенні 6-7 категорії міри антропоізації. Вони розрізняються лише ієрархічно за кількістю жителів. Натомість склад і категорювання рівня натуральності локальних геосистем-компонентів міст, як ландшафтно-урбанізаційних систем, під час великомасштабного моделювання є різноманітним з вирізненням вже 10 різновидів таких геосистем – від природоохоронної до промислової (див. [6]).

Щодо шкали міри антропоізації (рівня натуральності) *аква-теральних геосистем*, спричиненої відповідними їм системами землекористування, насамперед водокористування, слід зазначити таке.

Наразі ця складна модельна проблема є несповна розв'язаною і геосистеми водних об'єктів суходолу з їхніми береговими зонами (берегами) потребують детальної розробки окремих специфічних підходів і шкал оцінювання міри їхньої антропоізації. При цьому, для **геосистем натуральних і штучних водойм разом з їхніми береговими зонами**, а саме озер, лиманів, водосховищ і неруслих ставків, це є завданням майбутнього. Його вирішення має базуватись на

підвалинах гідроінвайронментології та гідроекології (див. наші праці [2-4] та ін.).

Натомість для **геосистем натуральних і штучних водотоків**, зокрема річок і струмків, каналів і водоводів тощо, а також руслових ставків на них, разом з берегами цих об'єктів доцільно використовувати в першому наближенні адекватний індекс і **шкалу міри антропоізації** (рівня натуральності). Останні визначаються в залежності від наявності чи відсутності *заданих варіантів антропогенного впливу* на зазначені геосистеми та/або наслідків такого впливу як безпідпірної або підпірної каналізації русла і берегів. Відповідну цьому шкалу наведено в табл.4 і вона оперує лише оцінювальними категоріями без вирізнення субкатегорій. При цьому коди варіантів антропогенного впливу визначають і тотожні їм коди різних типів аква-теральних геосистем, які розглядаються. Це можуть бути, наприклад, геосистеми II типу, V.1 типу тощо. Не слід забувати, що, знову-таки, типи геосистем з 1-3 категоріями міри антропоізації за табл.3 є натурально-антропогенними, що стосується типів I-III, а з 4-7 категоріями – антропогенними, куди тяжіють типи IV.1-VII.3.

Таблиця 3 – Шкала міри антропоізації (рівня натуральності) аква-теральних геосистем русла (ложа) і берегів натуральних і штучних водотоків, зокрема із ставками на них, в залежності від варіантів антропогенного впливу на геосистеми та/або його наслідків *

Категорійний код і міра антропоізації геосистем і діапазони $I_{АНТ,К,АТ,i}$ та його $I_{АНТ,К,АТ}^*$, %	Коди та варіанти антропогенного впливу (безпідпірної або підпірної каналізації) на геосистеми, які визначають адекватні коди типів цих геосистем
1 – вельми незначна антропоізація (0...15,8]; 7,9	I – русло й береги, штучно не спрямлені та/або поглиблені й нетрансформовані гідротехнічними спорудами, та без штучного підпору водотоку з розташуванням в межах природних і біосферних заповідників і заповідних урочищ
2 – незначна антропоізація (15,8...28,3]; 22,1	II – русло й береги, штучно не спрямлені та/або поглиблені й нетрансформовані гідротехнічними спорудами, та без штучного підпору водотоку з розташуванням поза межами природних і біосферних заповідників і заповідних урочищ
3 – помірна антропоізація (28,3...39,2]; 33,7	III.1 – штучно трансформовані береги з руслом, штучно не спрямленим і/або поглибленим і нетрансформованим гідротехнічними спорудами; III.2 – загачений водотік разом з його підпертим незаблокованим гирлом з не спрямленим (поглибленим) руслом і штучно нетрансформованими берегами; III.3 – підперте заблоковане гирло водотоків з не спрямленим (поглибленим) руслом і штучно нетрансформованими берегами
4 – помірно-значна антропоізація (39,2...50,4]; 44,8	IV.1 – штучно спрямлене та/або поглиблене русло, нетрансформоване гідротехнічними спорудами, з штучно нетрансформованими берегами; IV.2 – загачений водотік разом з його підпертим незаблокованим гирлом) зі спрямленим (поглибленим) руслом і штучно нетрансформованими берегами; IV.3 – підперте заблоковане гирло водотоків зі спрямленим (поглибленим) руслом і штучно нетрансформованими берегами
5 – значна антропоізація (50,4...63,7]; 57,1	V.1 – штучно спрямлене та/або поглиблене русло, нетрансформоване гідротехнічними спорудами, з штучно трансформованими берегами; V.2 – загачений водотік, зокрема його підперте незаблоковане гирло, зі спрямленим (поглибленим) руслом і штучно трансформованими берегами; V.3 – підперте заблоковане гирло водотоків зі спрямленим (поглибленим) руслом і штучно трансформованими берегами; V.4 – русловий ставок-загата з нетрансформованим ложем;

6 – вельми значна антропоїзація (63,7-79,5]; 71,6	VI.1 – русло й береги, штучно спрямлені гідротехнічними спорудами відкритого типу (каналами, колекторами тощо); VI.2 – русловий відкритий підпірний ставок-накопичувач
7 – надмірна антропоїзація (79,5-100]; 89,8	VII.1 – русло й береги, штучно спрямлені гідротехнічними спорудами закритого типу (тунелями тощо); VII.2 – русловий закритий підпірний ставок-накопичувач; VII.3 – русловий, нерусловий або комбінований підпірний і/або напірний канал, водовід тощо з трансформованим ложем

* (0...15,8] ... (79,5-100] – категорійні діапазони розрахункового індексу антропоїзації $I_{АНТ,К,АТ}$ та його середньокатегорійні значення $I_{АНТ,К,АТ}^*$ у %, див. (1.8) і табл.1

Шкала за табл.4 теж може оперувати середньовиваженим за відповідними довжинами **індексом антропоїзації** набору вже **аква-теральних геосистем** певного об'єкта моделювання ($I_{АНТ,АТ}^{**}$, %) з визначенням цього індексу як

$$I_{АНТ,АТ}^{**} = \sum_{i=1}^n I_{АНТ,АТ,Р,i} \bullet l_i, \quad (1.8)$$

де $I_{АНТ,АТ,Р,i}$ – розрахунковий індекс антропоїзації, який є частковим для i -того розрахункового варіанта антропогенного впливу за другим стовпчиком табл.3 і чисельно варіантно визначається з першого стовпчика цієї таблиці як $I_{АНТ,АТ,Р,i} \equiv I_{АНТ,К,АТ}^*$ або з відповідних категорійних діапазонів; l_i – загальна частка довжини ділянок розрахункової гідромережі об'єкта дослідження з $I_{АНТ,АТ,Р,i}$ (у частках одиниці стосовно загальної довжини цієї гідромережі, яка параметризується за [4]); n – кількість розрахункових варіантів антропогенного впливу за табл.3.

Формалізація **підсистеми каркасних меж ГЕО** (див. моделі (1.1)-(1.3)) суттєво залежить від обраної чи розробленої класифікаційної схеми таких меж (див. наприклад, нашу працю [3]). У загальних рисах, цю підсистему можна диференціювати на **другопорядкові підсистеми** (квазі)природних (**КПКМ**), натурально-антропогенних (**НАКМ**) і антропогенних (**АКМ**) **каркасних меж геосистеми**, тобто за обраними підходами

$$\{КМГЕО\} \in \{КПКМ \cup НАКМ \cup АКМ\}, \quad (1.9)$$

$$D \{КМГЕО\} = \{КМГЕО((\omega_{КМБГ}), R_{КМБГ}, t)\} = \\ \{КПКМ(\omega_{КПКМ}, R_{КПКМ}, t) \cup НАКМ(\omega_{ПАКМ}, R_{НАКМ}, t) \cup АКМ(R_{АКМ}, t)\}, \quad (1.10)$$

де $\omega_{КМБГ}$, $\omega_{КПКМ}$ і $\omega_{НАКМ}$ – числа фіксацій випадкових субполів відповідних підсистем за (1.9); $R_{КПКМ}$, $R_{НАКМ}$ і $R_{АКМ}$ – просторові субобласті випадкових і «антропогенно»-детермінованих субполів усіх підсистем моделі (1.9), зважаючи на те, що межі в цілому можуть подаватися не лише як площинні, а й як лінійні просторові об'єкти (див. [3]), а загальна просторова область субполів підсистем $КМГЕО$ $R_{КМГЕО} \in \{R_{КПКМ} \cup$ з огляду, що при цьому $R_{КМБГ} \neq R$.

У всіх випадках, під час структурно-функціональної формалізації (квазі)природно-натурально-антропогенних геосистем **ГЕО** для безпосереднього моделювання слід обов'язково зазначати:

– елемент, модуль чи їхню комбінацію тощо (квазі)природної підсистеми, за яким задано загальні межі **ГЕО** як об'єкта моделювання. Це можуть бути, наприклад, геосистеми фізико-гео-

графічних областей або районів; геосистеми басейнової ЛТС (басейнові геосистеми), геосистеми урочищ, геосистеми берегових ландшафтних смуг, геосистеми геотонних меж, (квазі)геосистеми мережної БЛТС тощо;

– визначальні гіперпозиційні атрибути геосистем з їхнім поділом на суходільні (теральні) та аква-теральні. При цьому слід зважати, наприклад, на те, що басейнова геосистема, як аква-теральна природнича в цілому, складається з суходільних геосистем її водозбору та аква-теральних геосистем її водотоків тощо;

– ранг геосистемних об'єктів моделювання. Його слід зазначати, за необхідності, на додаток до ієрархічного рівня, згаданого в першому абзаці цього переліку. Зокрема, за таких умов, можна вести мову про басейнові макрогеосистеми, берегові мезогеотони тощо;

– деякі інші специфічні атрибути геосистем, необхідні для їхнього модельного задавання.

Принципові засновки природничо-географічного моделювання базуються також на тому, що у чотиривимірній вкеровній динамічній природничій геосистемі розрізняють **2 головних класи структурно-функціональної організації**. Це **клас** (квазі)природно-натурально-антропогенних **таксонів** (структур і субструктур) різного рівня та **клас ресурсів** геосистеми. Обидва ці класи реалізуються через різного виду **природно-соціально-економічні функції (ПСЕФ)** з урахуванням того, що геосистема *ГЕО* є невід'ємним складником економіки та довкілля.

Природно-соціально-економічні функції тлумачаться як характеристики виконання геосистемою цільових запитів і вимог ресурсокористувачів, зважаючи на природоохоронні критерії. Ці функції розподілено на два головних типи – *геоекологічно-позитивні* або *геопозитивні*, а саме довкілля-ресурсо-відтворювальні, довкілля-ресурсо-охоронні тощо, та *геоекологічно-негативні* або *геонегативні*, серед них довкілля-ресурсо-деградаційно-редукційні, «екоризикові» тощо (див. далі).

Стабілізація та поліпшення стану природничої геосистеми трактуються як цільові функції. Вони припускають два етапи **нормування** для управління геосистемою (режимом її роботи) – **геоекологічне** та **геоекологічно-економічне**, – з переходом до **тарифікації природних ресурсів** геосистеми та її субструктур із можливістю застосування механізму платного ресурсокористування.

Першим принциповим критерієм геоекологічно-економічного збалансування управління станом природничої геосистеми і вибору оптимального режиму функціонування різних геосистем, за безумовного пріоритету геоекологічних нормативів, є мінімізація необхідних витрат на ліквідацію чи обмеження геонегативних ПСЕФ (ГН ПСЕФ) і на максимізацію відтворення геопозитивних ПСЕФ (ГП ПСЕФ) геосистеми, тобто

$$(1.11) \quad \left[\begin{array}{l} n \\ \prod_{i=1} (ГН ПСЕФ)_i \rightarrow \min \\ n \\ \prod_{i=1} (ГП ПСЕФ)_i \rightarrow \max \end{array} \right] \longleftrightarrow ГЕО, \text{opt} ,$$

де *n* – кількість формалізованих геонегативних і геопозитивних природно-соціально-еко-

номічних функцій; **opt** – позначка оптимізації як спрямованості нормування.

Оцінка та оптимізація режимів функціонування геосистем базуються, *по-перше*, на їхній **систематизації** (класифікації, диференціації тощо) **та/або структуруванні**, щодо формалізації якого вже частково йшла мова у попередньому тексті. Систематизація та/або структурування геосистем проводяться на основі синтезованого набору класифікаційних детерміновано-стохастичних критеріїв. Останні можуть відображати типи, ранги та рівні геосистем та фактичні й бажані цілі їхнього функціонування, враховуючи домінуючу ознаку, вертикальні та горизонтальні часові зв'язки, баланс речовини та енергії, взаємозумовленість складників геосистем тощо.

Систематизація та/або структурування геосистем загалом здійснюються, по-перше, шляхом послідовного застосування низки взаємопов'язаних критеріїв. При цьому спираються на існуючі або спеціально розроблені відповідні категорійно-класифікаційні схеми й аналогічні побудови з їхніми різномісними **таксонами** тощо (див. наприклад, співвідношення категорій табл.1).

По-друге, зрозуміло, що структурування різних за рангом і типом геосистем відзначається своїми критеріями та змістом таксонів (підсистем), які вирізняються, зі збереженням загальних підходів до зазначеного структурування. Серед них можна виокремити ієрархічну супідрядність таксонів (підсистем), вже розглянуте вирізнення природної, натурально-антропогенної та антропогенної підсистем, застосування певної системи координат для структурування тощо.

Природні ресурси (ПРС), як другий головний клас структурно-функціональної організації природничої геосистеми, доцільно рангувати за двома групами стосовно основних їхніх видів, а саме:

- 1) 1 група: земельні (територіальні) (**ЗТРс**); водні (**ВРС**); біологічні (**БРс**) і мінерально-сировинні (**МСРС**) ресурси;
- 2) 2 група: транспортні (**ТРс**); енергетичні (**ЕРс**) та рекреаційно-оздоровчі (**РкРС**) ресурси, тобто

$$\{ПРС\} \in \{ЗТРс; ВРС; БРС; МСРС; ТРС; ЕРС; РкРС\} . \quad (1.12)$$

Відтворення першої групи ресурсів поєднано з паритетним співвідношенням параметрів стану геосистеми та її природно-соціально-економічних функцій, а другої групи – за переважання таких функцій.

Оцінка та оптимізація режимів функціонування природничих геосистем базуються, *по-друге*, на **структурно-функціональній тарифікації природних ресурсів геосистеми**. Під такою тарифікацією розуміється **визначення кількості та якості видів ресурсів геосистеми для їхнього платного використання та відтворення** за розрахунковим рівнем стану геосистеми, нормативами геоекологічної стабільності (зокрема безпеки) та, відповідним їм, оптимальним режимом розвитку геосистеми. За таких умов слід враховувати, що згадані показники природних ресурсів – кількість і якість – і у натуральному, і у вартісному вираженні, так само як і пріоритетність ресурсокористування та ресурсозбереження, є категоріями просторово-часовими. Вони визначаються на основі відповідного врахування національних пріоритетів з огляду на багаторічно-сезонну мінливість станів геосистем, наявність і специфіку ресурсів у геосистемах різного рівня та структурно-функціональної організації тощо.

Природні ресурси за (1.12) може бути **типізовано за багатьма класифікаційними ознаками**:

- 1) (умовно) поновні ресурси – водні, біологічні, рекреаційно-оздоровчі, транспортні;
- 2) (умовно) непоновні ресурси – земельні (територіальні), мінерально-сировинні;
- 3) (умовно) незамінні для часу існування та цілей геосистеми ресурси – водні, біологічні

тощо;

- 4) (умовно) замінні ресурси – мінерально-сировинні, транспортні тощо.

У всіх випадках прийнята **тарифікаційна схема ресурсів природничої геосистеми**, з відповідними градаціями та критеріями наявності та стану природних ресурсів для різних навантажень на геосистему, повинна оперувати *рангами комплексних показників фактичного та спрогнозованого стану* певних видів природних ресурсів. Тобто, така схема має враховувати, з одного боку, традиційні кількісні параметри ресурсів, такі як експлуатаційні чи перспективні запаси і т.ін., а також, у кращому випадку, деякі якісні їхні атрибути, зокрема клас якості тощо. З іншого боку, тарифікаційна схема має зважати на результати системного цільового імовірнісного кількісного обліку та визначення якості ресурсів за складниками геосистеми з орієнтацією на оптимальні ПСЕФ під час геоекологічно-економічно збалансованої експлуатації ресурсів.

Природно-соціально-економічні функції (ПСЕФ), є, як вже зазначалось, характеристиками виконання геосистемою цільових запитів і вимог ресурсокористувачів, зважаючи на природоохоронні критерії. Ці функції треба розподіляти на **геопозитивні та геонегативні**, а їхнє формалізоване подавання використовувати в алгоритмах будь-яких модельних задач стосовно геосистеми – як т.зв. «обернених», так і «прямих». При цьому зміст «обернених» задач визначає тарифікація природних ресурсів геосистеми та регламентація ресурсокористування в ній. Натомість сутність «прямих» задач зумовлюється критеріальним оцінювання різних ознак стану геосистем для власне обґрунтування стратегії геоекологічно-економічної оптимізації їхнього функціонування.

Потенціал природно-соціально-економічних функцій геосистеми (Pt ПСЕФ) визначають як добуток розрахункового, визначеної якості об'єму залученого (залученого) до експлуатації ресурсного потенціалу (V Pt ПРС) та питомих витрат на відтворення кожної з геопозитивних ПСЕФ або ліквідацію (обмеження) кожної з геонегативних ПСЕФ ($V_{VIDT,LIK}$) за виразом

$$(1.13) \quad Pt \text{ ПСЕФ} = V \text{ ПРС} \cdot V_{VIDT,LIK} \cdot$$

При цьому залучений або залучений до експлуатації об'єм ресурсного потенціалу вирізняють на відміну від загального такого об'єму. Потенціал же кожної з геопозитивних функцій позначається Pt ГП ПСЕФ, кожної з геонегативних – Pt ГН ПСЕФ.

Певним чином зінтегровані ПСЕФ утворюють **загальний природно-соціально-економічний потенціал геосистеми** або, просто, **загальний потенціал геосистеми Pt ГЕО**). На нього слід зважати з огляду на задані геоекологічні критерії для визначення міри геоекологічно-економічного збалансування режиму функціонування геосистем, тобто експлуатації їхніх ресурсів.

За всіх оцінювань для потенціалів ПСЕФ (Pt ПСЕФ) і потенціалу геосистеми (Pt ГЕО) використовуються визначники «реальний» (що фактично реалізується), «можливий» (потенційний) і «доцільний» (оптимальний). *Принципом балансування динаміки стану геосистеми є досягнення за заданими її параметрами, враховуючи зниження чи ліквідацію геоекологічно-економічного збитку, оптимального потенціалу цієї геосистеми. Він у цілому трактується як міра можливостей виконання системою її ПСЕФ і чисельно моделюється через надійність геосистеми. Останню, у наведеній постановці, можна інтерпретувати як перетин умов обов'язкового збереження власти-*

востей стійкості геосистеми та реалізації її заданого доцільного (оптимального) потенціалу.

Тобто, **зміст геоекологічно-економічного нормування** з відповідною оптимізацією управління станом природничої геосистеми має полягати в регулюванні антропогенного навантаження для запобігання зміні властивостей і структури геосистеми (за *критеріями стійкості*) та припиненню виконання нею вимогових природно-соціально-економічних функцій (за *критеріями надійності*).

Загальний потенціал геопозитивних ПСЕФ ($Pt\Sigma(GП ПСЕФ)$) визначають як

$$Pt\Sigma(GП ПСЕФ) = \sum_{i=1}^n (Pt ГП ПСЕФ)_i + \sum_{i=1}^n (Pt ГП ПСЕФ)_{sin,em,i} + \sum_{i=1}^n (Pt ГП ПСЕФ)_{sin,m,i} - \sum_{i=1}^n (Pt ГП ПСЕФ)_{ant,i} , \quad (1.14)$$

де перший доданок – простий адитивний ефект, наступні, відповідно, синергічний ефект інтегрування потенціалів геопозитивних ПСЕФ емерджентного типу, далі – те ж мультиплікативного типу і, нарешті, антагоністичний ефект інтегрування зазначених потенціалів; n – кількість природно-соціально-економічних функцій, формалізованих під час визначення різних ефектів інтегрування їхніх потенціалів.

Загальний потенціал геонегативних ПСЕФ ($Pt\Sigma(ГН ПСЕФ)$) визначається за аналогічною до (1.14) формулою

$$Pt\Sigma(ГН ПСЕФ) = \sum_{i=1}^n (Pt ГН ПСЕФ)_i + \sum_{i=1}^n (Pt ГН ПСЕФ)_{sin,em,i} + \sum_{i=1}^n (Pt ГН ПСЕФ)_{sin,m,i} - \sum_{i=1}^n (Pt ГН ПСЕФ)_{ant,i} , \quad (1.15)$$

Загальний потенціал обох видів природно-соціально-економічних функцій ($Pt\Sigma(ПСЕФ)$), який розглядається як загальний потенціал геосистеми ($Pt ГЕО$), розраховують за виразом

$$Pt\Sigma(ПСЕФ) = Pt ГЕО = Pt\Sigma(GП ПСЕФ) + Pt\Sigma(ГН ПСЕФ) \pm \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N (Pt ГП,ГН ПСЕФ)_{sin,ant,i,j} , \quad (1.16)$$

де останній доданок – синергічно-антагоністичний ефект інтегрування загальних потенціалів геопозитивних і геонегативних ПСЕФ для формалізованих n геопозитивних та N геонегативних ПСЕФ.

Наведені вище підходи використовуються для чисельного визначення **ефективності реальних, можливих чи доцільних** за геоекологічними критеріями ПСЕФ ($E(ПСЕФ)$). Її отожднюють з **ефективністю використання ресурсів природничої геосистеми** [$E(ГЕО)$], яка віддзеркалює міру геоекологічно-економічного збалансування такої експлуатації та адекватна **ефективності режиму експлуатації геосистеми**, тобто

$$\begin{aligned}
 E(GEO) = E(ПСЕФ) &= [Pt\Sigma(GП ПСЕФ) + Pt\Sigma(ГН ПСЕФ)] - \\
 (1.17) \quad &- (V_{VIDT} + V_{LIKV}) \pm \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N (Pt \text{ ГП, ГН ПСЕФ})_{sin, ant, ij} = \\
 &= Pt\Sigma(ПСЕФ) - (V_{VIDT} + V_{LIKV}) = Pt \text{ GEO} - (V_{VIDT} + V_{LIKV}) ,
 \end{aligned}$$

де, крім вже визначених символів, V_{VIDT} , V_{LIKV} – відповідно, сумарні витрати на відтворення формалізованих або реалізованих геопозитивних і ліквідацію або обмеження геонегативних ПСЕФ.

Згідно з попередньою тезою, за **другий принципний критерій геоекологічно-економічного збалансування управління станом природничої геосистеми**, в процесі імітаційно-оптимізаційного моделювання режимів її експлуатації, крім вимоги (1.11) править вимога

$$(1.18) \quad E(GEO) = E(ПСЕФ) \xrightarrow{\text{[для заданих параметрів стану]}} \max .$$

Для забезпечення всіх щойно викладених побудов може бути використано **класифікацію природно-соціально-економічних функцій природничої геосистеми** (табл.4)

Таблиця 4. Класифікація геопозитивних (ГП) та геонегативних (ГН) природно-соціально-економічних функцій (ПСЕФ) природничої геосистеми

Види ПСЕФ	Підвиди ПСЕФ	Різновиди підвидів ПСЕФ
Геопозитивні ПСЕФ:		
1) довілля-ресурсо-відтворювальні (ДРВ)	ландшафтно-відтворювальні	геосистемно-структуротвірні, екосистемно-структуротвірні, збереження біоландшафтного різноманіття тощо
	ресурсо-відтворювально-постачальні	промислово-сировинна, енергетична, зрошувальна, водопостачальна, селитебна, транспортна, біопродукційна, землеробська тощо
	рекреаційно-оздоровчі	рекреаційна, спортивна, оздоровча тощо
	ландшафтно-естетичні	естетично-приваблива, композиційно-впорядкована, багатопланово-унікальна, ієрархічно-гармонійна, пейзажно-видово-гармонійна тощо
2) довілля-ресурсо-охоронні (ДРО)	історико-культурно-заповідні	збереження історико-культурного середовища, заповідання, екорекреаційна, спеціальної охорони певних територій тощо
	водоохоронні	водно-стоково-регулювальна, берегоохоронна тощо
	санітарно-екологічні	за складниками геосистеми
	грунтозахисні	грунто-структуротвірні, дренажна тощо
	самоочищувальні	фільтрації, акумуляції, деградації забрудників, зокрема в різних складниках геосистеми, тощо

3) інші, серед них специфічні геопозитивні (ІСПП)	специфічно-екомережні	генофондно-відтворювальна, біоміграційно-сприятлива, екотопічно-сприятлива, екотонно-позитивна (геотонно-позитивна) тощо
	імпаکتно-позитивні	за видами оптимізувального впливу на сусідні геосистеми тощо
	інші геопозитивні та підрядні, які посилюють певні ГП ПСЕФ	за змістом підсилення тощо
Геопонегативні ПСЕФ:		
1) довкілля-ресурсо-деградаційно-редукційні (ДРДР)	ландшафтно-деградаційні	за складниками геосистем, компонентами біоландшафтного різноманіття тощо
	загальноресурсно-редукційні	за видами ресурсів тощо
	полюціо-міграційно-аккумулятивні	хімічно-забруднювальні, радіоактивно-забруднювальні і т.ін., зосібна за видами забруднення та складниками геосистеми тощо
	гідрогалодинамічно-несприятливі та ін.	підтоплювальна, заболочувальна, засолювальна тощо
2) "екоризикові" (ЕР)	життеризикові	за підсистемами й процесами геосистеми, механізмами впливу та прояву тощо
	екоструктурно-деструкційні чи геоструктурно-деструкційні	те ж
3) інші, поміж них специфічні геонегативні (ІСГН)	водно-стоково-трансформаційні несприятливі	водонепроникно-збільшувальна, ґрунтово-стоково-втратна, пересихаючо-збільшувальна тощо
	екомережно-деструкційні	генофондно-редукційна, біоміграційно-несприятлива, екотонно-негативна тощо
	імпаکتно-негативні	за видами негативного впливу на сусідні геосистеми тощо
	інші геонегативні та підрядні, які посилюють певні ГН ПСЕФ	за змістом посилення тощо

Додатково доцільно зазначити, що досить поширеною наразі є концепція т.зв. **екосистемних сервісів (послуг)** або **сервісів (послуг) екосистем** (англ. *ecosystem services*, див. [1, 6] тощо). Останні за змістом є досить близькими до розглянутого вище поняття «геопозитивні природно-соціально-економічні функції геосистем».

Моделюючи динаміку природничої геосистеми, слід враховувати, що природно-соціально-економічні функції, по-перше, може бути поєднано з її підсистемами різного рівня. Наприклад, біопродукційна функція може оцінюватися для фації (геотопа) або підурочища чи урочища тощо.

По-друге, ПСЕФ можуть одночасно мати полярно-протилежний функціональний зміст. Зокрема, для аква-теральної геосистеми водойми функція розчищення її ложа (днорозчищуваль-

на), з одного боку, є різновидом геопозитивних ресурсо-відтворювально-постачальних функцій за рахунок збільшення внаслідок розчищення об'єму доступних для використання водних ресурсів водойми. З іншого боку, за умови депонування в ложі водойми токсичних забрудників, реалізація зазначеного розчищення ложа може призвести до переходу депонованих у ньому токсичних речовин у воду водойми, тобто до ініціювання її вторинного забруднення. За такої ситуації дно-розчищувальна функція вже ідентифікується як геонегативна хімічно-забруднювальна та «екоризикова» – життєризикова для населення, яке споживає водні ресурси водойми.

У всіх випадках обрана для моделювання *детальна класифікаційна схема ПСЕФ* повинна будуватися, по-перше, за принципом просторово-часового поєднання з структурно-функціональною організацією природничої геосистеми конкретного типу, тобто з її головними таксонами та їхніми складниками більш низьких рівнів (див. приклади у наших працях [3-7] тощо). По-друге, зазначена схема має створюватися з урахуванням компоновки та посилення чи послаблення під час реалізації інтегрованих *ПСЕФ*, зважаючи на різні ефекти їхнього інтегрування. Беруть до уваги і те, що під час геоекологічно-економічної оптимізації експлуатації природничих геосистем природоохоронні засоби та технології, які використовуються, досить часто є багатофункціональними. За приклад останнього може правити створення екомереж і заповідання територій, проектування біоплато вищої водної рослинності на водоймах тощо.

Висновки. Обґрунтовано та викладено теоретично-методичні підвалини природничо-географічного моделювання як аналітично-технологічного інструмента сучасної ландшафтної екології. Під ним розуміється дослідження структури, динаміки та стану природничих геосистем, зв'язків і процесів усередині них, між ними та із зовнішнім середовищем за допомогою природничо-географічних моделей. Природнича геосистема тлумачиться як складна вкеровна природно-натурально-антропогенна система з експлуатацією її ресурсів. Природничо-географічне моделювання здійснюється за закономірностями власної динаміки природничих геосистем. За кінцеву мету при цьому править стабілізація структури та стану геосистем шляхом геоекологічно-економічної оптимізації користування геосистемними ресурсами та інших заходів з геоекологічної безпеки на основі сучасних моніторингових систем і мереж та геоінформаційних технологій. Напрацювання може бути використано під час планування післявоєнного відновлення економіки та довкілля держави.

Новизна дослідження. Уперше здійснено цілісний концептуально-прикладний виклад змісту і засобів природничо-географічного моделювання, що править за інструментарій як сучасної ландшафтної екології, так і природничої географії в цілому. Удосконалено тлумачення і способи формалізації понять «природничо-географічна система», «ресурси та природно-соціально-економічні функції геосистеми». Отримали подальший розвиток принципи оптимізації управління природничими геосистемами.

Бібліографічні посилання

1. Grodzynskyi M.D. (2014). Landscape ecology. Textbook. Kyiv: Znannia, 550. [In Ukrainian] [Гродзинський М.Д. Ландшафтна екологія: підручник. – К.: Знання, 2014. – 550 с.]
2. Samoilenko V. (2002). Probabilistic mathematical methods in geocology. Manual. Kyiv: Nika-Center, 404. [In Ukrainian] [Самойленко В.М. Ймовірнісні математичні методи в геоєкології: навчальний посібник. – К.: Ніка-Центр, 2002. – 404 с.]
3. Samoilenko V.M, Dibrova I.O. (2012). Model identification of coastal geosystems. Monograph. Kyiv: Nika-Center, 328. [In Ukrainian] [Самойленко В.М., Діброва І.О. Модельна ідентифікація берегових геосистем: монографія. – К.: Ніка-Центр, 2012. – 328 с.]
4. Samoilenko V.M., Ivanok D.V. (2015). Modeling of basin geosystems. Monograph. Kyiv: SE “Print Service”, 208. [In Ukrainian] [Самойленко В.М., Іванок Д.В. Моделювання басейнових геосистем: монографія. – К.: ДП «Прінт Сервіс», 2015. – 208 с.]
5. Samoilenko V.M, Dibrova I.O., Plaskalniy V.V. (2018). Anthropization of Landscapes. Monograph. Kyiv: Nika-Center, 232. [in Ukrainian] [Самойленко В.М., Діброва І.О., Пласкальний В.В. Антропізація ландшафтів: монографія. – К.: Ніка-Центр, 2018. – 232 с.]
6. Samoilenko V.M, Dibrova I.O. (2019) Natural-geographic modeling. Textbook. Kyiv: Nika-Tsentr. 320. [In Ukrainian] [Самойленко В.М., Діброва І.О. Природничо-географічне моделювання: підручник. – Київ : Ніка-Центр, 2019. – 320 с.]
7. Samoilenko V., Osadchyi V., Vishnikina L., Dibrova I. Procedure of Landscape Anthropization Extent Modeling: Implementation for Ukrainian Physic-Geographic Taxons // Environmental Research, Engineering and Management. – 2018. – Vol. 74. – No 2. – P.67-81. – Available at: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.erem.74.2.20646>
8. Topuzov O., Vishnikina L., Samoilenko V., Yaprynets T. Modernization of Geographic Education at High School: Geoinformation Training Models // Information Technologies and Learning Tools. – 2019. – Vol 73. – №5. – P. 174-184. – Available at: <https://doi.org/10.33407/itlt.v73i5.3190>
9. Samoilenko V. Dibrova I. Geoeological Situation in Land Use // Environmental Research, Engineering and Management. – 2019. – Vol. 75. – No 2. – P.36-46. – Available at: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.erem.75.2.22253>
10. Samoilenko V., Osadchyi V., Vishnikina L., Dibrova I. Shape of cumulative land use systems' area distribution as a parameter of anthropogenic impact on landscapes // Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series “Geology. Geography. Ecology”, 2020, Vol.53: 267-285. Available at: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-20>
11. Bilous L., Shyshchenko P., Samoilenko V., Havrylenko O. Spatial morphometric analysis of digital elevation model in landscape research // European Association of Geoscientists & Engineers. Conference Proceedings, Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020, May 2020, Kyiv, V.2020: 1 – 5. Available at: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo124>
12. Havrylenko O., Shyshchenko P., Samoilenko V., Bilous L. Criteria for optimising air quality monitoring in Ukrainian cities (by example of Kyiv) // European Association of Geoscientists & Engineers. Conference Proceedings, XIV International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”, Nov. 2020, Kyiv, V.2020: 1-5. Available at: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056009>
13. Samoilenko V., Bilous L., Havrylenko O., Dibrova I. Geoinformation model cause-effect analysis of anthropogenic impact in the Podilsko-Prydniprovskiyi region // European Association of Geoscientists & Engineers. Conference Proceedings, Geoinformatics, May 2021, Kyiv, V.2021: 1–6.
14. Samoilenko V., Bilous L., Havrylenko O., Dibrova I. Monitoring of anthropogenic impact in the Left Bank Dnipro and the Eastern Ukrainian regions // European Association of Geoscientists & Engineers. Conference Proceedings, XV International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”, Nov. 2021, Kyiv, V.2021: 1-5. Available at: <http://dx.doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2013>