

Література

1 Рудько Г.І., Адаменко О.М., Міщенко Л.В. «Стратегічна екологічна оцінка та прогноз стану довкілля західного регіону України» Київ-Чернівці; 2017-472 с.

2 Шидловський А.К. «Енергоефективність та відновлювані джерела енергії» Київ, 2007-560 с.

3 Адаменко Я.О. «Оцінка впливів техногенно небезпечних об'єктів на навколишнє середовище: науково-теоретичні основи, практична реалізація» автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 21.06.01 "Екологічна безпека" Адаменко Я.О. ; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. - Івано-Франківськ, 2006- 48с.

4 Михайлів М.І. «Підвищення екологічної безпеки електроенергетики Карпатського регіону з використанням нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії» автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 21.06.01 "Екологічна безпека" / М. І. Михайлів ; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. - Івано-Франківськ, 2012. - 38 с. : табл. - 32-36.

5 <http://www.nerc.gov.ua/?id=26436> Статистична інформація щодо об'єктів альтернативної електроенергетики, яким встановлено "зелений" тариф за 2017 рік

6 http://www.nerc.gov.ua/data/filearch/Catalog3/Richnyi_zvit_NKREKP

7 Річний звіт про результати діяльності комісії , що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг

8 <http://alternative-energy.com.ua/>

© М. І. Михайлів,
В. В. Головка,
І. М. Михайлів

*Надійшла до редакції 03 листопада 2017 р.
Рекомендував до друку
докт. геол.-мін. наук О. М. Адаменко*

УДК 502.174.3:620.9

*С. В. Качала, Л. М. Архипова,
О. М. Мандрик, М. М. Приходько
Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу*

ДО ПИТАННЯ МЕТОДОЛОГІЇ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ПРИКЛАДІ МГЕС

У статті запропоновано методологію екологічно безпечного впровадження малих гідроелектростанцій на прикладі Карпатського регіону, яка передбачає синтез всієї наявної інформації про гідроенергетичні ресурси Карпатського регіону з детальним аналізом існуючих проектів та оцінкою використання гідроенергії у минулому, визначення гідроенергопотенціалу в основних басейнових системах регіону всіх малих річок; обґрунтування величини техногенно-екологічно безпечного гідроенергопотенціалу, аналіз його кількісних та якісних характеристик. Вибір перспективних, сприятливих та проблемних об'єктів для екологічно безпечного розташування МГЕС проведений з урахуванням територіальних обмежень. Запропоновано комплексний метод визначення гідроекологічного ризику. Вдосконалена система комплексного екологічного моніторингу за станом природно-техногенної безпеки гідро екосистем при улаштуванні МГЕС.

Ключові слова: екологічна безпека, методологія, малі гідроелектростанції, Карпатський регіон

The article proposes a methodology for the ecologically safe introduction of small hydroelectric power stations on the example of the Carpathian region, which provides for the synthesis of all available information on hydropower resources of the Carpathian region, with a detailed analysis of existing projects and the assessment of the hydropower use of the past, the definition and assessment of the hydropower potential within the main basin systems of the region of all small rivers; substantiation of the magnitude of technogenically and environmentally safe

hydropower, analysis of its quantitative and qualitative characteristics. The selection of promising, favorable and problematic sites for the environmentally safe location of small hydroelectric power was carried out taking into account the territorial constraints. Was proposed comprehensive method for determination of hydro-ecological risk. Was improved system of complex ecological monitoring on the state of natural and technogenic safety of hydro ecosystems.

Key words: ecological safety, methodology, small hydroelectric power stations, Carpathian region

Постановка проблеми. У 2006 р. Україна прийняла Енергетичну стратегію до 2030 року, яка передбачає, що у 2030 р. частка відновлюваної енергетики у сумарному споживанні первинної енергії становитиме 19%. Потенціал розвитку малої гідроенергетики вважають високим. В Україні активне відновлення малих ГЕС розпочалось лише після встановлення у 2008 році так званого «зеленого тарифу». Відповідно до Національного плану дій з відновлюваної енергетики (NREAP) та згідно дорожньої карти до 2020 року, за рахунок модернізації існуючих потужностей, відновлення старих малих гідроелектростанцій, будівництва та введення в експлуатацію нових генеруючих потужностей гідроенергетики в Україні можна довести виробництво електроенергії [1]:

- мікро- та міні-ГЕС - до 130 ГВт×год у 2020 році (при їх загальній потужності у 55 МВт);

- малі ГЕС - до 210 ГВт×год у 2020 році (при їх загальній потужності 95 МВт).

Актуальність проблеми викликана активним будівництвом малих ГЕС в Карпатському регіоні останні 10 років без їх науково обґрунтованого розташування, рекомендацій екологічно безпечних технологій використання, що у сукупності, викликало призупинення впровадження інвестиційних проектів розвитку.

Аналіз досліджень і публікацій. М. Шихайлов та В. Коханевич описали послідовність обрахунків для підбору відповідних потужностей технологій відновлюваних джерел енергії. Колектив авторів під загальною редакцією Р. Ю. Тормосова, О. П. Романюк, К. Р. Сафіуліної підготували практичний посібник для підготовки проектних пропозицій із чистої енергії [2]. Ряд закордонних вчених, таких як Adam James [3], John Twidell, Tony Weir [4], Godfrey Boyle [5] розглянули досвід використання відновлювальних джерел енергії в світі в світлі сталого розвитку. Аналіз попередніх досліджень показує, що роботи у цій сфері проводяться, як правило, на окремих пооб'єктних компонентах без їх належного системного опрацювання. Тому зазначеній вище проблемі в межах Карпатського регіону властива недостатня вивченість і відсутність єдиної методологічної основи.

Виділення невирішених частин проблеми. В останній час в Україні на державному рівні прийнято ряд заходів щодо стимулювання впровадження відновлюваних джерел енергії. Однак, широке впровадження малих гідроелектростанцій в Карпатському регіоні стримується невирішеною проблемою протиріччя пріоритету сталого збалансованого туристично-рекреаційного розвитку регіону й впровадження відновлюваних джерел енергії, невизначеністю гранично допустимих норм впровадження малих гідроелектростанцій в регіоні, відсутністю позитивних результатів моделювання і прогнозу екологічних процесів після застосування різних технологій використання ВДЕ тощо.

Постановка завдання. Отже, актуальним завданням є розроблення методології екологічно безпечного використання відновлюваних джерел енергії на прикладі малих гідроелектростанцій.

Виклад основного матеріалу. В цілому найбільші запаси гідроенергії в Україні (в тис.кВт.год на 1 км² території) припадають на Карпатський регіон [6], а в середині нього - на Закарпатську область. За дослідженнями, що проведені у ІФНТУНГ було встановлено,

що другою областю за потужністю гідроенергоресурсів в Карпатському регіоні є Івано-Франківська [7].

Авторами була узагальнена вся наявна інформація щодо гідроенергетичних ресурсів Карпатського регіону з детальним аналізом проектних розробок, що існували, та оцінкою гідроенергетичного використання річок в минулому. Встановлено, що для Карпатського регіону екологічно безпечним буде облаштування малих, мікро, міні ГЕС (МГЕС) потужністю до 5 МВт [8].

Одним з чинників вибору екологічно безпечних перспективних ділянок розміщення МГЕС стало визначення і оцінка гідроенергетичного потенціалу в межах основних басейнових систем регіону усіх малих річок (довжиною більше 10 км). Визначений в цілому гідроенергопотенціал малих річок Карпатського регіону, проаналізовані його кількісні і якісні характеристики (рис. 1) [9,10].

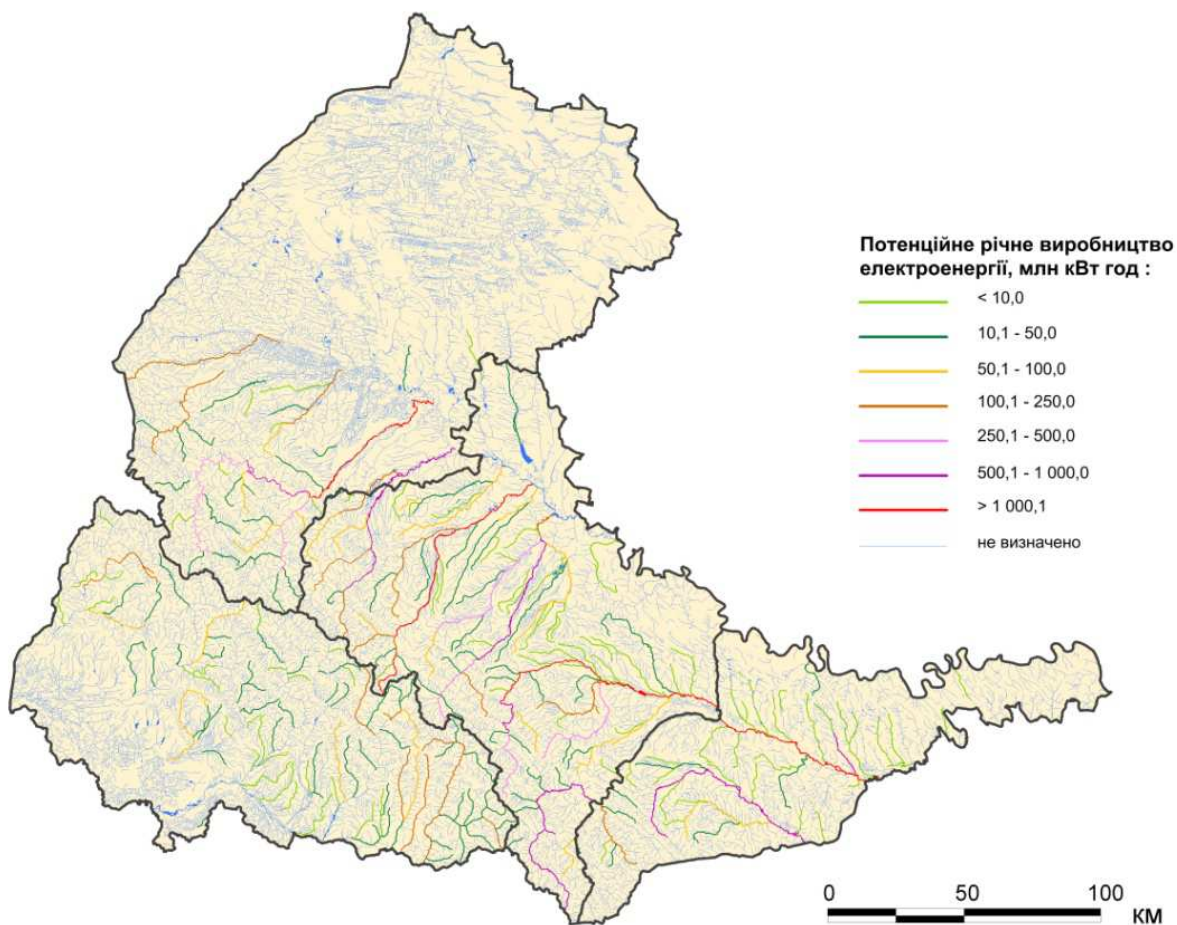


Рис. 1. Гідроенергетичний потенціал малих річок Карпатського регіону

Пропонуємо ввести для користування показник *техногенно-екологічно безпечного гідроенергопотенціалу*. Це частина гідроенерго-ресурсів, яку можна використати у найближчій перспективі за умов збереження екологічної безпеки та при мінімальному техногенному ризику, який підлягає управлінню.

Виходячи з аналізу гідроекологічного потенціалу, екологічно безпечна складова потенційних гідроенергетичних ресурсів була обґрунтована на рівні 15%. Ця величина для Карпатського регіону складає 4,5 млрд.кВт×год за рік, тобто на сьогоднішній день загальна потужність екологічно безпечних МГЕС, для яких ми вирішували задачу вибору перспективних ділянок складає понад 500 тис.кВт [6].

Нашими науковими дослідженнями встановлено, що метою збереження екологічної безпеки в річці необхідно залишати в незмінному природному стані витрату, яка дорівнює ґрунтовому живленню (в розрахунках за цю величину була прийнята мінімальна середньомісячна витрата маловодного року). Таким чином, всі екологічно безпечні МГЕС

Карпатського регіону, повинні проектуватись як безгребельні (які не зможуть використати в повному об'ємі витрату води) (гірляндні, рукавні, поплавкові і т.п.) та малі ГЕС дериваційного типу. Доцільно об'єднання декількох МГЕС в загальну гідросистему.

Для обрання перспективних, сприятливих та проблемних ділянок екологічно безпечного розташування малих ГЕС нами була узагальнена вся наявна інформація щодо гідроенергетичних ресурсів Карпатського регіону з детальним аналізом проектних розробок, що існували, та оцінкою гідроенергетичного використання річок в минулому та враховані обмеження. Результати проведених досліджень показали, що привабливість басейнів річок для екологічно безпечного розміщення гідроенергоспород зменшується з північного-заходу на південний схід, з пониженням висоти місцевості і в напрямку від Закарпаття до Прикарпаття (рис. 2).

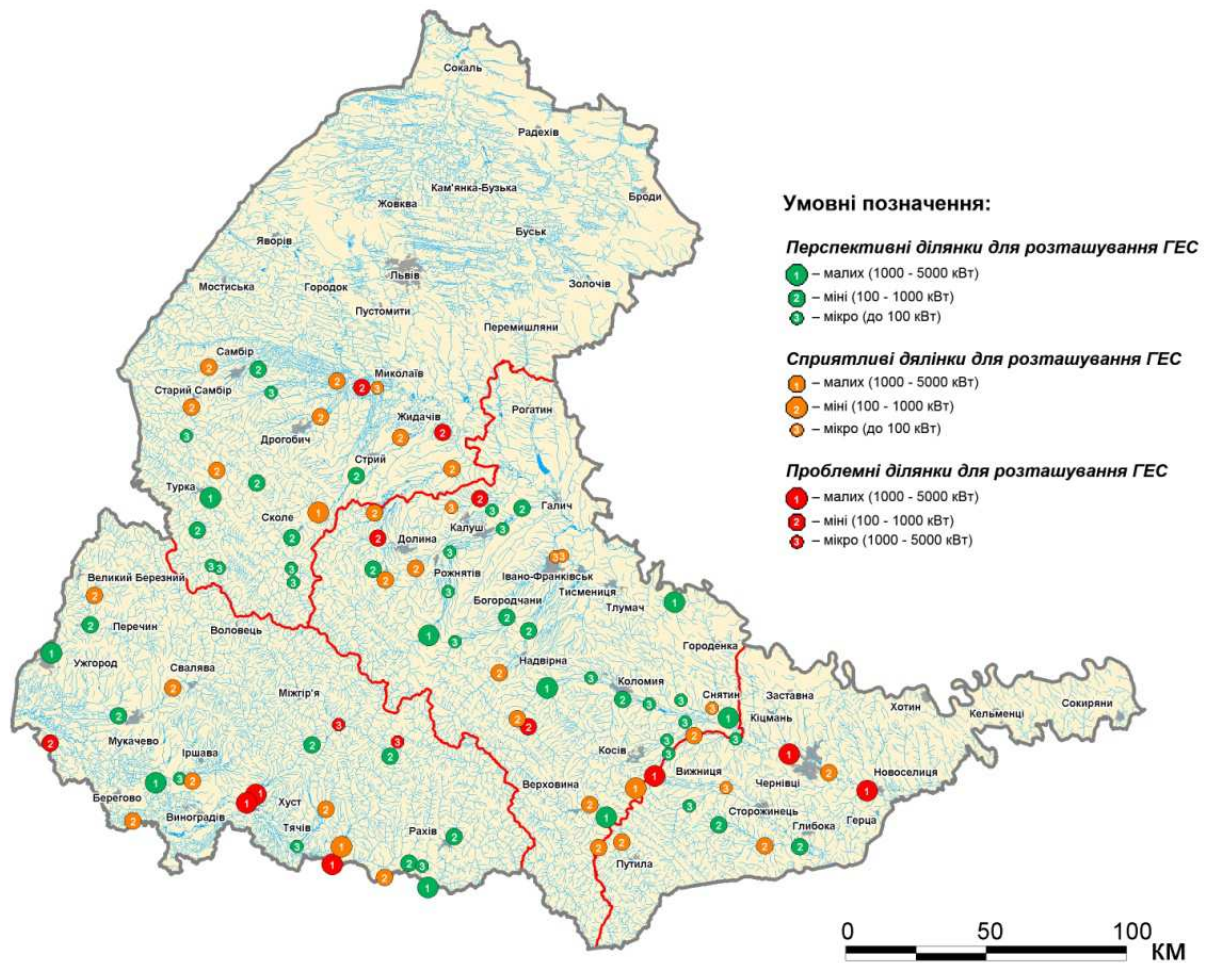


Рис.2. Ділянки екологічно безпечного розташування малих ГЕС

Вперше запропоновано комплексний метод визначення гідро екологічного ризику на проектній стадії будівництва МГЕС. Метод належить до комплексної оцінки природно-техногенного впливу в межах басейну водного об'єкту, який охоплює вплив гідрорежиму, ступінь трансформації водної екосистеми, блокування басейну, фрагментацію, екологічний стан басейну та якісний стан водних ресурсів, функціонування водних екосистем.

Інтегральний показник комплексного гідроекологічного ризику (Rhe) розраховують за запропонованою першим автором статті формулою:

$$Rhe = \sqrt[6]{IMP_{flood} * IM Pr es * IMP_{block} * IMP_{frgm} * Kedb * FCQ} , \quad (1)$$

де IMP_{flood} – зміна гідрологічного режиму і екосистеми заплави в нижніх б'єфах гребель, аж до гирла; IMP_{res} – трансформація водних екосистем внаслідок затоплення; IMP_{block} –

блокування річкового басейну, зокрема перетин шляхів міграції біологічних видів; IMP_{frgm} – фрагментація басейну, ступінь розчленування басейну на окремі ділянки греблями, виражені, як відсоток втрачених шляхів пересування по річковій мережі; K_{edb} – коефіцієнт екологічного дисбалансу басейну ріки чи його ділянки; FCQ – коефіцієнт відповідності якості води.

Запропонований для вирішення проблеми екологічно безпечного впровадження МГЕС розрахунковий показник Rhe є відносною величиною, що залежить від рівня антропогенного навантаження та природних процесів і явищ, що відбуваються в межах басейнової гідроекосистеми. Ступінь природно-техногенного впливу або гідро екологічного ризику оцінюють за такою шкалою:

$Rhe < 0,2$ – еталонний стан – діапазон з низьким рівнем ушкодження та сприятливим станом гідроекосистеми;

$0,2 < Rhe < 0,4$ – зона оптимуму – діапазон найсприятливіших для функціонування гідроекосистеми значень факторів середовища;

$0,4 < Rhe < 0,6$ – зона песимуму – діапазон несприятливих для функціонування гідроекосистеми значень факторів середовища;

$0,6 < Rhe < 0,8$ – кризова зона – діапазон з високим рівнем ушкодження гідроекосистеми, стан біосистеми критичний;

$Rhe > 0,8$ – зона екологічного лиха – діапазон з дуже високим рівнем ушкодження гідроекосистеми, стан біосистеми небезпечний.

Отриманий ступінь впливу для певної басейнової одиниці, за динамічності всіх складників, можна використовувати для оцінки ступеня екологічного впливу об'єктів-аналогів. Введення спеціально розробленої шкали для оцінки природно-техногенного впливу при будівництві МГЕС дасть можливість використання простого методу встановлення пріоритетів, де певні райони чи ділянки гідроекосистеми, які відповідають визначеним стандартам якості навколишнього середовища, без подальшого втручання, можна вважати еталонними, а інші ділянки гідроекосистем можна ранжувати і оцінювати залежно від ступеня гідроекологічного ризику.

Сьогодні необхідністю є організація системи ефективного управління взаємодією гідроенергетичних об'єктів з навколишнім середовищем, основою якої є моніторинг, що повинен містити такі етапи [11]:

- формування ефективної системи спостереження, збирання, передавання, оброблення, зберігання та аналізування інформації про взаємодію гідроенергетичного об'єкта та гідроекосистеми;

- оцінювання екологічного стану навколишнього природного середовища території розташування об'єкту впливу;

- прогнозування зміни стану навколишнього природного середовища при впровадженні та експлуатації об'єкта гідроенергетики;

- визначення відповідності параметрів гідроенергетичного об'єкту й водної екосистеми нормативним вимогам, відповідності проектних параметрів і критеріїв безпеки, визначення потенційної загрози населенню;

- прогнозне оцінювання розвитку процесів та безпеки, яку вони можуть нести;

- розроблення управлінських рішень стосовно зниження рівня впливу в гідроекосистемі, уникнення, локалізації та мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій.

Моніторинг стану водної екосистеми має оцінювати стан навколишнього природного середовища до початку впровадження об'єктів гідроенергетики і її зміну в процесі будівництва й експлуатації об'єкта [12].

Формування системи моніторингу передбачає кілька функціональних етапів. На первинному етапі визначають фонові характеристики навколишнього середовища на території розміщення об'єкта гідроенергетики, виявляють особливості функціонування природної гідроекосистеми, екологічні й соціальні проблеми.

На підставі паспорта проекту об'єкта гідроенергетики формують програму й проект моніторингу, який передбачає, основні напрямки роботи, вихідну інформацію, рекомендовані методи аналізування й інтерпретації результатів, обґрунтування організації мережі спостережень, оцінювання взаємодії об'єкта гідроенергетики з гідроекосистемою і її станом, розроблення рекомендацій зі збереження оптимального стану гідроекосистеми. При цьому гідроекосистему, що містить об'єкт гідроенергетики, розглядають як єдиний об'єкт, оптимальний стан якого характеризується сприятливою соціальною й екологічною обстановкою в зоні його впливу, зі збереженням нормативних параметрів навколишнього природного середовища.

Запропоновану функціональну схему організації моніторингу гідроекосистеми наведено на рис. 3.

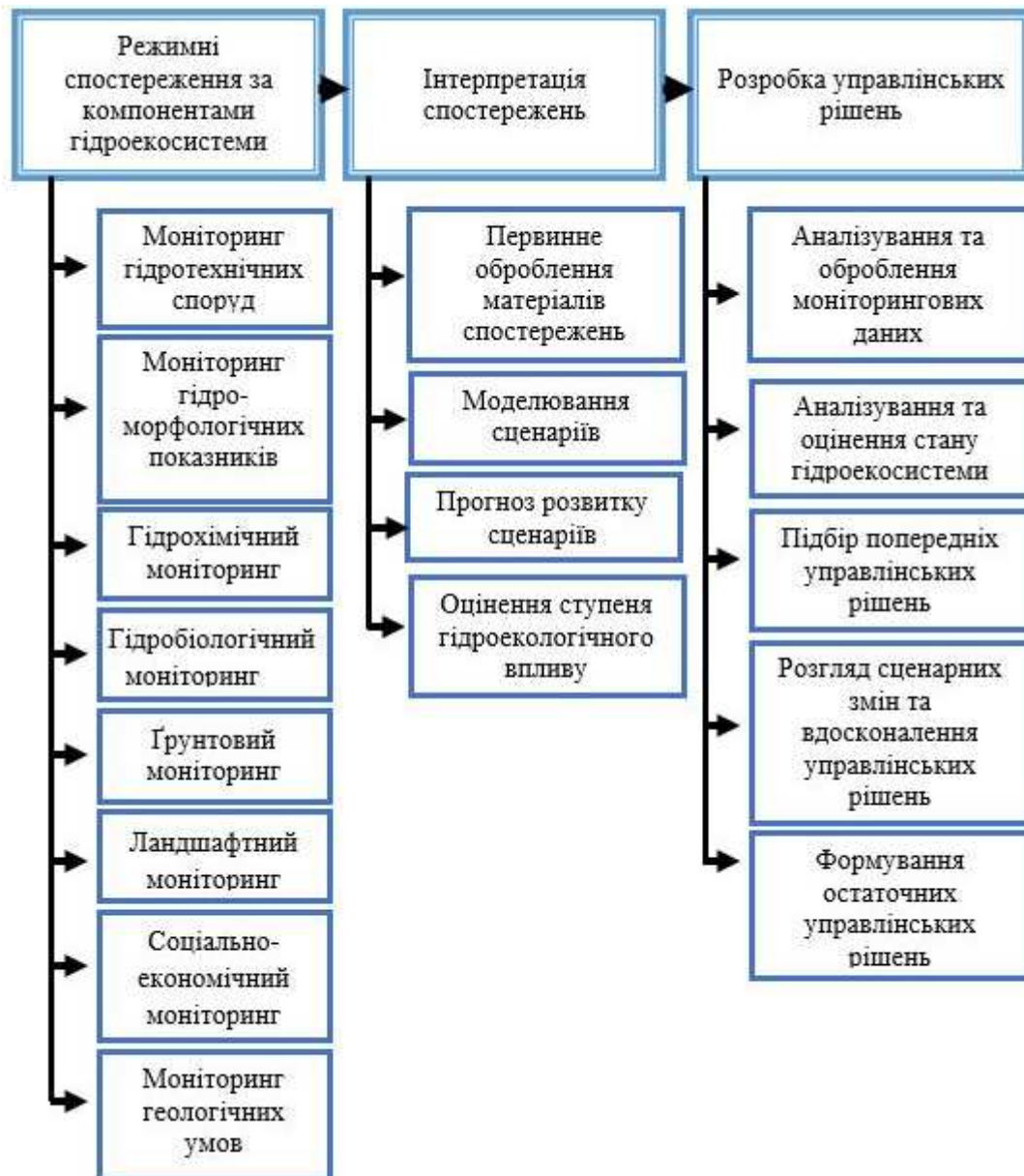


Рис. 3. Функціональна схема організації моніторингу гідроекосистеми при впровадженні МГЕС [11]

Зважаючи на наведені фактори, рекомендуємо запровадити на робочих і майбутніх малих ГЕС програму комплексного екологічного моніторингу за станом природно-техногенної безпеки гідроекосистеми:

- 1) постійний гідроморфологічний моніторинг – з обов'язковим заміром швидкості

течії та рівня води у рибиході;

2) одноразово після завершення будівництва – комплексний гідроморфологічний, гідрохімічний, гідробіологічний моніторинг;

3) перший рік після введення в експлуатацію:

а) комплексний гідроморфологічний, гідрохімічний, гідробіологічний моніторинг – посезонно (весняне водопілля, літній паводок, осіння межень і зимова межень);

б) періодичний моніторинг гідротехнічних споруд, моніторинг геологічних умов, ґрунтовий моніторинг, ландшафтний моніторинг;

в) соціально-економічний моніторинг;

4) протягом наступних чотирьох років (щорічно в період осінньої межень) – комплексний гідроморфологічний, гідрохімічний, гідробіологічний моніторинг;

5) за умови стабілізації екологічної ситуації – раз в п'ять років до завершення життєвого циклу малої ГЕС – комплексний гідроморфологічний, гідрохімічний, гідробіологічний моніторинг;

б) після завершення життєвого циклу ГЕС і демонтажу споруд одноразово для оцінення залишкових впливів:

а) комплексний гідроморфологічний, гідрохімічний, гідробіологічний моніторинг;

б) моніторинг гідротехнічних споруд, моніторинг геологічних умов;

в) ландшафтний моніторинг, моніторинг ґрунтового покриву.

В табл. 1 нижче нами запропоновано перелік рекомендованих точок спостережень для моніторингу водних об'єктів, з функціонуючими об'єктами малої гідроенергетики у Карпатському регіоні та розроблено програму спостережень відповідно до вимог Водної Рамкової Директиви ЄС.

Таблиця 1

Рекомендовані пункти спостережень за водними об'єктами, на яких функціонують малі ГЕС Карпатського регіону

№	Назва об'єкта	Координати МГЕС	Географічні координати рекомендованих постів		Водний об'єкт	Розташування
1	2	3	4		5	6
1	Білинська ГЕС	48.1110990 24.2543790	Фоновий створ	48.1128756 24.2606449	Тиса (Дунай)	Закарпатська обл., Рахівський р-н, с. Білин
			Контрольний створ	48.1067219 24.2550445		
			Створ за межами зони впливу	48.102194 24.255023		
2	Золото-липська ГЕС	48.9856932 25.0701517	Фоновий створ	48.988961 25.0660801	Дністер – Золота Липа	Івано-Франківська обл., Тлумацький р-н, с. Золота Липа
			Контрольний створ	48.982463 25.0731397		
			Створ за межами зони впливу	48.977379 25.0735795		
3	Краснянська ГЕС	48.245583 23.934417	Фоновий створ	48.2476508 23.9284319	Тиса (Дунай) – Тересва	Закарпатська обл., Тячівський р-н, с. Красна
			Контрольний створ	48.2428442 23.9389542		
			Створ за межами зони впливу	48.2385158 23.9384151		
4	Новошицька ГЕС	49.476389 23.427500	Фоновий створ	49.475068 23.4209096	Бистриця Тисменицька	Львівська область, Дрогобицький район, с. Новошичі
			Контрольний створ	49.474458 23.433229		
			Створ за межами зони впливу	49.4760074 23.4381321		

Продовження табл. 1

1	2	3	4		5	6
5	Оноківська ГЕС	48.662500 22.357500	Фоновий створ	48.6600862 22.3515987	Тиса (Дунай) – Уж	Закарпатська обл., Ужгородський р-н, с. Оноківці
			Контрольний створ	48.6657552 22.3621988		
			Створ за межами зони впливу	48.6693122 22.3663616		
6	Саратська ГЕС	47.7481215 25.0007898	Фоновий створ	47.7442583 24.9998724	Сарата	Чернівецька область, Путильський район, с. Сарата
			Контрольний створ	47.7523307 24.9987888		
			Створ за межами зони впливу	47.7562583 24.9975443		
7	Снятинська ГЕС	48.438056 25.575278	Фоновий створ	48.4387677 25.568769	Прут (Дунай)	Івано-Франківська обл., м. Снятин
			Контрольний створ	48.4341481 25.5785108		
			Створ за межами зони впливу	48.4299979 25.5814719		
8	Ужгородська ГЕС	48.624278 22.317861	Фоновий створ	48.6284449 22.3191574	Тиса (Дунай) – Уж	Закарпатська обл., м. Ужгород
			Контрольний створ	48.6211902 22.3142731		
			Створ за межами зони впливу	48.6178178 22.309708		
9	Яблуницька ГЕС	48.0188972 24.9113944	Фоновий створ	48.0147742 24.9130869	Прут (Дунай) – Білий Черемош	Івано-Франківська обл., Верховинський р-н, с. Яблуниця
			Контрольний створ	48.0219793 24.9119282		
			Створ за межами зони впливу	48.026256 24.9107265		
			Створ за межами зони впливу	48.0241967 24.916445		
10	Явірська ГЕС	49.1981077 23.0725443	Фоновий створ	49.1936802 23.0713749	Дністер – Стрий	Львівська обл., Турківський р-н, с. Явори
			Контрольний створ	49.2005228 23.0783272		
			Створ за межами зони впливу	49.2005789 23.0852151		

Висновки. В статті запропонована методологія екологічно безпечного впровадження малих гідроелектростанцій на прикладі Карпатського регіону, яка передбачає узагальнення всієї наявної інформації щодо гідроенергетичних ресурсів Карпатського регіону з детальним аналізом проектних розробок, що існували, та оцінкою гідроенергетичного використання рік в минулому, визначення і оцінка гідроенергетичного потенціалу в межах основних басейнових систем регіону усіх малих річок; обґрунтування величини техногенно-екологічно безпечного гідроенергопотенціалу, аналіз його кількісних і якісних характеристик. Обрання перспективних, сприятливих та проблемних ділянок для екологічно безпечного розташування МГЕС проводилось з врахуванням територіальних обмежень природно-заповідного фонду, туристичних об'єктів, технологій використання гідроенергетичного потенціалу. Запропонований комплексний метод визначення гідроекологічного ризику на проектній стадії будівництва МГЕС, який включає вплив гідрорежиму, оцінку ступеня трансформації водної екосистеми, блокування басейну, фрагментацію, екологічний стан басейну та якісний стан водних ресурсів. Удосконалена система комплексного екологічного моніторингу за станом

природно-техногенної безпеки гідроєкосистем при впровадженні МГЕС.

Література

- 1 Програма розвитку гідроенергетики України до 2026 року - [Електронний ресурс] <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/>
- 2 Підготовка проектних пропозицій із чистої енергії: практичний посібник / Під загальною редакцією Тормосова Р.Ю., Романюк О.П., Сафіуліної К.Р. — К.: ТОВ «Поліграф плюс», 2015. — 176 с.
- 3 Adam James. Fact Sheet: 6 Things You Should Know About The Value Of Renewable Energy [Електронний ресурс]. – 2015 — Режим доступу: <http://thinkprogress.org>.
- 4 Renewable Energy Resources. John Twidell, Tony Weir. Taylor & Francis Ltd. ROUTLEDGE: London, United Kingdom. – 2015. - 816 pages.
- 5 Renewable Energy: Power for a Sustainable Future/ Edited by Godfrey Boyle. Oxford, United Kingdom. - 2012, 584 pages.
- 6 Архипова Л.М. Природно-техногенна безпека гідроєкосистем: монографія / Л.М.Архипова. – Івано-Франківськ: Видавництво ІФНТУНГ, 2011. – 366 с.
- 7 Arkhyrova L. M., Pernerovska S.V. Forecasting water bodies hydrological parameters using singular spectrum analysis// Scientific bulletin of National Mining University. Scientific and technical journal number. – 2015. – № 2 (146). – P.45-50.
- 8 O M Mandryk, L M Arkhyrova, O V Pobigun, O R Maniuk. Renewable energy sources for sustainable tourism in the Carpathian region// IOP Publishing. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 144 (2016) 012007. International Conference on Innovative Ideas in Science (IIS2015) 12–13 November 2015, Baia Mare, Romania. Volume 144. - August 2016.
- 9 Стратегічна оцінка використання відновлюваних джерел енергії у сталому туристично-рекреаційному розвитку Карпатського регіону: колективна монографія за ред. Л.М. Архипової /О.М. Мандрик, Л.М. Архипова, Я.О. Адаменко, М.М. Приходько, О.М. Адаменко, О.В. Побігун, О.Р. Манюк, Н.М. Москальчук, Ю.І. Мурава, Ю.Д. Михайлюк. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2016. – 323 с.
- 10 Adamenko Ya. O., Arkhyrova L. M., Mandryk O. M. Territorial standard quality hydroecosystem protected areas, Hydrobiological Journal, 52(6), 2016. – P. 51–59 English version published by Begell House.
- 11 Качала С.В. Вдосконалення системи організації мережі моніторингу водних об'єктів/С.В. Качала// Екологічна безпека та збалансоване природокористування: науково-технічний журнал – ІФНТУНГ, №1 (15). -2017. С.90-96.
- 12 Korchemlyuk M, Arkhyrova L Environmental audit of Ukrainian basin ecosystem of the Prut river// Scientific bulletin of National Mining University, – 2016 – №5 (155). – P 98-106.

© С. В. Качала,
Л. М. Архипова,
О. М. Мандрик,
М. М. Приходько

*Надійшла до редакції 28 листопада 2017 р.
Рекомендував до друку
докт. техн. наук Я. О. Адаменко*