

Національна академія наук України
Інститут інформаційних технологій та систем

м. Київ

20.01.2026

Наукова доповідь на семінарі
«Образний комп'ютер»

Оптимізація методів та розробка графічного формату прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат

Доповідач:

докторант НУВГП,

к.т.н., доц. Шпортько Олександр Володимирович


Науковий консультант: д.т.н., проф. Бомба Андрій Ярославович, НУВГП



Національний університет
водного господарства
та природокористування

National University of Water
and Environmental
Engineering





Актуальність та
мета
дослідження

Етапи стиснення
зображень без
втрат

Ієрархічні
предиктори

Модифікації
алгоритму LZ77

Модифікації
формату
DEFLATE

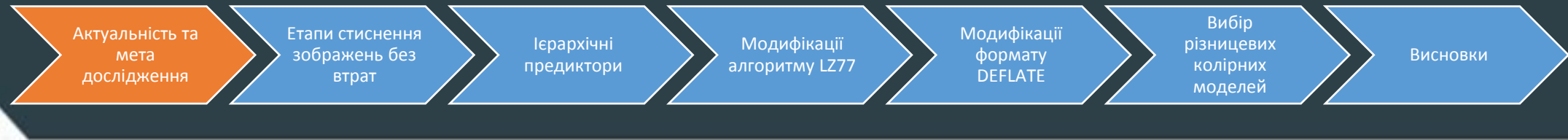
Вибір
різницевих
колірних
моделей

Висновки

Факти, що підтверджують актуальність теми дослідження:

- для прискорення виводу великих зображень у форматах компресії з втратами все частіше застосовують прогресуюче (поступальне) ієрархічне стиснення (наприклад, у вейвлетах). Такий підхід дає змогу зупинити декодування вже після декомпресії шару з кількістю пікселів, не меншою від області виводу по кожній з осей, не очікуючи відтворення всіх пікселів зображення;
- кодування пікселів зображень у поширених графічних форматах, що виконують стиснення без втрат (наприклад, у BMP, JPEG-LS чи PNG), як правило здійснюється послідовно по рядках зверху вниз, а у кожному рядку – підряд зліва направо чи навпаки. Тому вивести стиснуте зображення у цих форматах можливо лише після декодування всіх пікселів.





Саме тому проблема підвищення ефективності стиснення зображень без втрат з використанням принципів прогресуючого ієрархічного опрацювання є **актуальною сьогодні і буде актуальною в найближчому майбутньому**

Мета дослідження: пристосування і оптимізація існуючих та створення нових методів кодування для розробки графічного формату прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат, які б забезпечували прийнятні коефіцієнти стиснення та високу швидкість декодування.


Завдання дослідження для реалізації прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат:

1. Дослідити та проаналізувати механізм використання найуживаніших методів та алгоритмів кодування, які використовуються для стиснення зображень без втрат;
2. Розробити дієву схему обходу пікселів зображень та відповідні симетричні і асиметричні предиктори та обґрунтувати ефективність їх використання;
3. Вдосконалити алгоритм словникового стиснення LZ77 шляхом реалізації додаткового проходу по найближчих опрацьованих пікселях.
4. Модифікувати формат стиснення даних DEFLATE-блоків;
5. Розробити алгоритм формування різницевих колірних моделей з цілими коефіцієнтами та зміщеннями різниць;
6. Перевірити доцільність застосування різницевих колірних моделей з цілими коефіцієнтами до фрагментів зображень;
7. Розробити графічний формат HBF-LS та дослідити його ефективність на стандартних тестових наборах зображень ACT і KLTCIS.

Об'єкт дослідження: методи та графічні формати для компресії зображень без втрат.

Предмет дослідження: методи та графічні формати для послідовного та прогресуючого ієрархічного стиснення 24-бітних RGB-зображень без втрат





Актуальність та
мета
дослідження

Етапи стиснення
зображень без
втрат

Ієрархічні
предиктори

Модифікації
алгоритму LZ77

Модифікації
формату
DEFLATE

Вибір
різницевої
колірної
моделей

Висновки

Концептуальна основа дослідження – стиснення даних зображень за рахунок зменшення надлишковостей

Теоретичною та методологічною основою роботи стали праці таких вчених: C. Shannon, D. Knuth, D. Huffman, J. Rissanen, G. Langdon, A. Moffat, J. Ziv, A. Lempel, W. Pratt, R. Gonzalez, R. Woods, D. Salomon, J. Miano, T. Boutell, P. Deutsch, а також результати досліджень стандартів, текстів програм та функціонування існуючого програмного забезпечення для стиснення зображень.

На сьогодні стисненням зображень без втрат займаються M. Rahman, M. Hamada, J. Shin, I. Manga, E. Garba, A. Ahmadu, V. Makarichev, V. Lukin, V. Kharchenko, T. Guo, T. Zhang, E. Lim, M. López-Benítez, J. Hua, H. Xu, Y. Du, L. Du та інші дослідники.

Типи надлишковостей в зображеннях:

- візуальна;
- міжелементна або просторова;
- кодова.

Типові етапи кодування зображень без втрат:

- перехід до альтернативної колірної моделі (ефективний для фотореалістичних зображень);
- застосування предикторів (ефективне для фотореалістичних зображень);
- стиснення контекстно-залежним алгоритмом (ефективне для штучних зображень);
- стиснення контекстно-незалежним алгоритмом (універсальне).



Актуальність та
мета
дослідження

Етапи стиснення
зображень без
втрат

Ієрархічні
предиктори

Модифікації
алгоритму LZ77

Модифікації
формату
DEFLATE

Вибір
різницевого
колірного
моделей

Висновки

Основи контекстно-незалежного кодування

Основний принцип: елементи з більшою ймовірністю доцільно кодувати послідовностями бітів меншої довжини від довжини кодів елементів з меншою ймовірністю.

Варіанти: кодування Хафмана та арифметичне кодування.

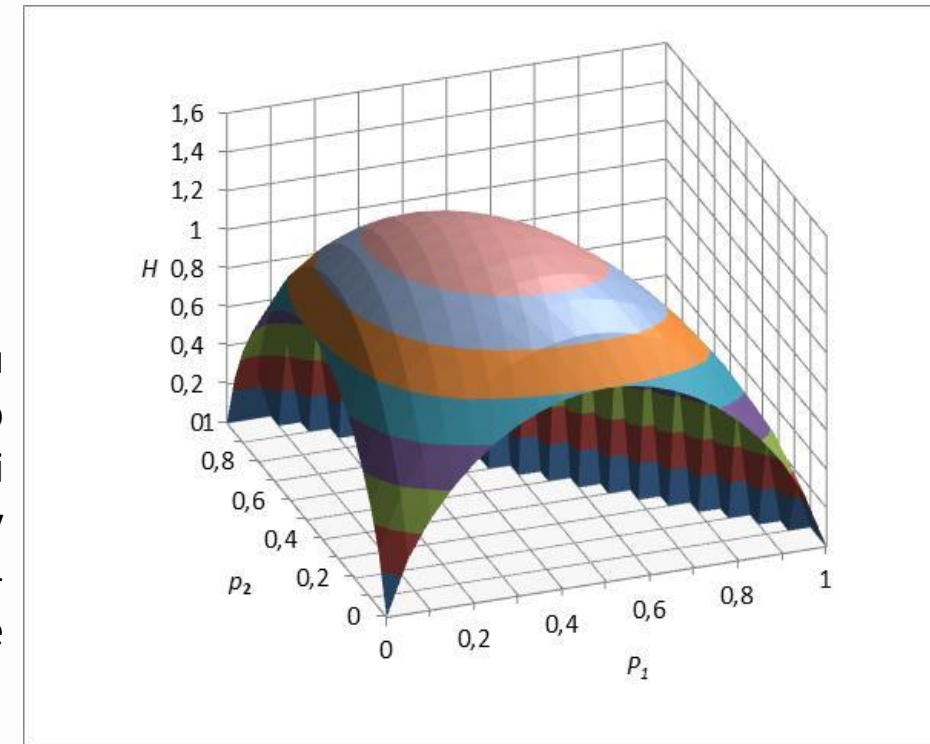
Обмеження середньої довжини коду контекстно-незалежних алгоритмів

Згідно з фундаментальним положенням теорії інформації, для мінімізації довжини коду послідовності, елемент s_i з ймовірністю появи $p(s_i)$ доцільно кодувати $-\log p(s_i)$ бітами (тут і надалі логарифми беруться за основою 2). Тому середня довжина коду елемента блоку після застосування будь-якого контекстно-незалежного алгоритму, згідно з формулою Шеннона не може бути меншою *інформаційної ентропії джерела*

$$H = -\sum p(s_i) \times \log p(s_i)$$

Довжина ентропійного коду: $L = N \times H = N \log(N) - \sum_i n_i \log(n_i)$

Ентропія джерела зменшується зі збільшенням нерівномірності розподілу ймовірностей між елементами



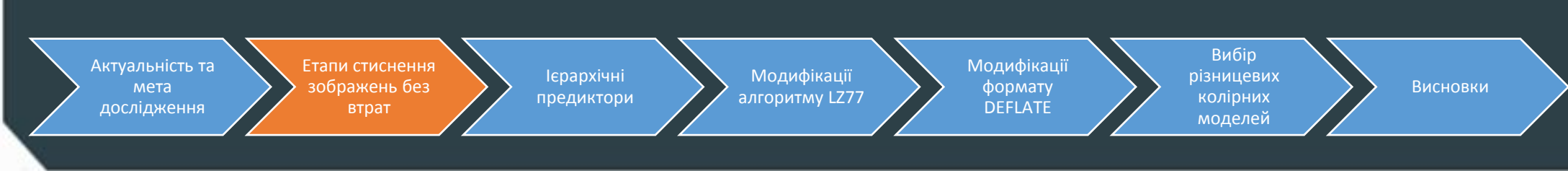
Залежність ентропії джерела з трьох елементів від ймовірностей появи двох елементів



Національний університет
водного господарства
та природокористування

National University of Water
and Environmental
Engineering



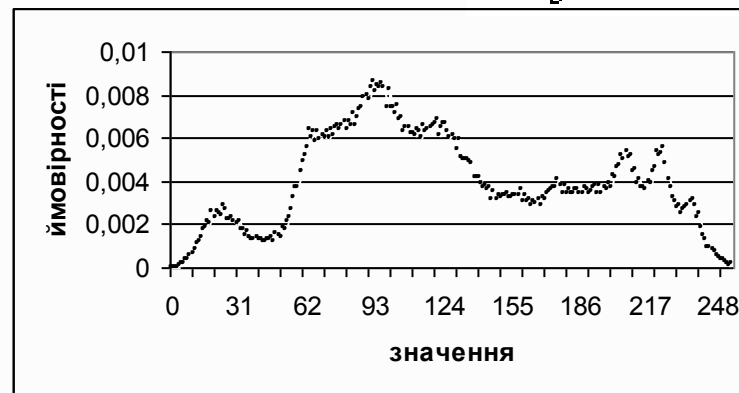


Механізм застосування предикторів

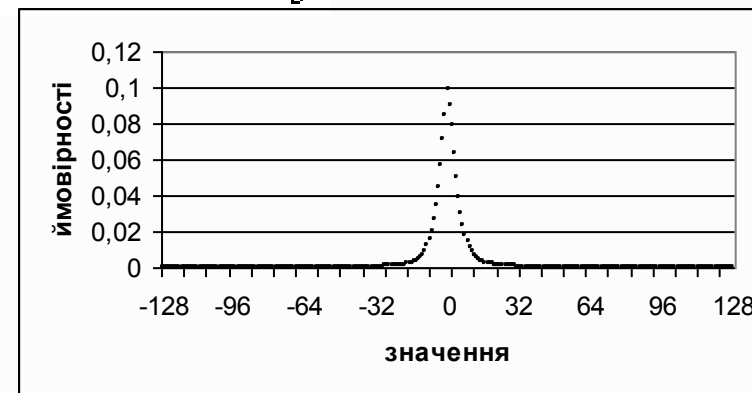
Предиктор – це функція, що прогнозує (моделює) значення чергового елемента, використовуючи значення відомих суміжних елементів.

Результат дії предиктора для кожної компоненти пікселя обчислюється за формулою

$$\Delta_{ij} = F_{ij} - \text{predict}_{ij}$$



а)



б)

Розподіл ймовірностей яскравостей компонентів зображення Lena.bmp:

а) до застосування предиктора ($H=7.75$ bpb); б) після застосування комбінацій предикторів ($H=4.77$ bpb)

Предиктори підвищують нерівномірність розподілу ймовірностей елементів і тому зменшують ентропію



Актуальність та
мета
дослідження

Етапи стиснення
зображень без
втрат

Ієрархічні
предиктори

Модифікації
алгоритму LZ77

Модифікації
формату
DEFLATE

Вибір
різницевої
колірних
моделей

Висновки

Механізм застосування різницевої колірної моделі

Приклад різницевої колірної моделі:

$$Y = \left(\frac{77}{256}\right)R + \left(\frac{150}{256}\right)G + \left(\frac{29}{256}\right)B;$$

$$Cb = -\left(\frac{44}{256}\right)R - \left(\frac{87}{256}\right)G + \left(\frac{131}{256}\right)B + 128;$$

$$Cr = \left(\frac{131}{256}\right)R - \left(\frac{110}{256}\right)G - \left(\frac{21}{256}\right)B + 128.$$

Швидке визначення різницевої
колірної моделі:

$$A = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} L(\Delta(R)) & L(\Delta(R-G)) & L(\Delta(R-B)) \\ L(\Delta(G-R)) & L(\Delta(G)) & L(\Delta(G-B)) \\ L(\Delta(B-R)) & L(\Delta(B-G)) & L(\Delta(B)) \end{pmatrix}$$



RGB



R



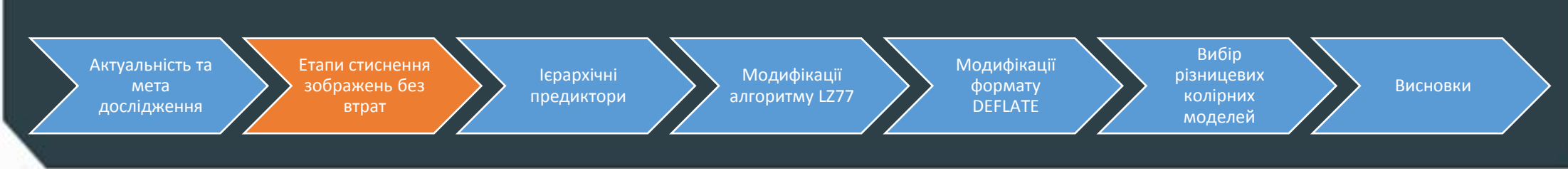
G



B

Різниці компонентів можуть підвищувати нерівномірність
розподілу ймовірностей елементів і тому зменшувати ентропію





Механізм застосування контекстно-залежного алгоритму LZ77 та особливості його реалізації у форматі словникової компресії DEFLATE

**Покрокові результати стиснення потоку
3, 4, 6, 3, 4, 6, 3, 2, 6, 3, 4, 4 згідно алгоритму LZ77**

№ кроку	Ковзне вікно (вхідний потік)		Співпадаюча послідовність	Закодовані дані (вихідний потік)	
	словник	буфер		<довжина, зміщення>	елемент
1.	-	3, 4, 6, 3, 4, 6, 3, 2, 6, 3, 4, 4	-	-	3
2.	3	4, 6, 3, 4, 6, 3, 2, 6, 3, 4, 4	-	-	4
3.	3, 4	6, 3, 4, 6, 3, 2, 6, 3, 4, 4	-	-	6
4.	3, 4, 6	3, 4, 6, 3, 2, 6, 3, 4, 4	3, 4, 6, 3	<4, 3>	-
5.	3, 4, 6, 3, 4, 6, 3	2, 6, 3, 4, 4	-	-	2
6.	3, 4, 6, 3, 4, 6, 3, 2	6, 3, 4, 4	6, 3, 4	<3, 6>	-
7.	3, 4, 6, 3, 4, 6, 3, 2, 6, 3, 4	4	-	-	4
8.	3, 4, 6, 3, 4, 6, 3, 2, 6, 3, 4, 4		-	-	-

Особливості реалізації алгоритму LZ77 у форматі DEFLATE:

У форматі DEFLATE довжини заміни та окремі літерали алгоритму LZ77 кодуються разом числами в межах [0; 285]. При цьому числа з діапазону [0; 255] відповідають кодам окремих літералів, 256 позначає закінчення блоку, а числа з діапазону [257; 285] вказують на базові значення довжин. Після базових значень довжин міститься визначена форматом додаткова кількість бітів (до п'яти), що разом з базовим значенням однозначно визначає довжину заміни. Зміщення зберігається відразу після відповідної довжини заміни аналогічно – у вигляді базового значення та додаткових бітів (до 13). Базове значення зміщення знаходиться в межах [0; 29]. Для контекстно-незалежного кодування використовуються коди Хафмана.

Алгоритм LZ77 кодує однакові послідовності яскравостей чи їх приростів для компонентів пікселів, які рідко трапляються у фотореалістичних зображеннях



Національний університет водного господарства та природокористування

National University of Water and Environmental Engineering



Актуальність та
мета
дослідження

Етапи стиснення
зображень без
втрат

Ієрархічні
предиктори

Модифікації
алгоритму LZ77

Модифікації
формату
DEFLATE

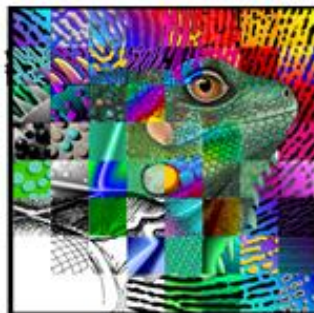
Вибір
різницевоїх
колірних
моделей

Висновки

Основний тестовий набір зображень - зображення набору АСТ



1. Clegg.bmp



2. Frymire.bmp



3. Lena.bmp



4. Monarch.bmp



5. Peppers.bmp



6. Sail.bmp



7. Serrano.bmp



8. Tulips.bmp



Національний університет
водного господарства
та природокористування

National University of Water
and Environmental
Engineering



Актуальність та
мета
дослідження

Етапи стиснення
зображень без
втрат

Ієрархічні
предиктори

Модифікації
алгоритму LZ77

Модифікації
формату
DEFLATE

Вибір
різницевих
колірних
моделей

Висновки

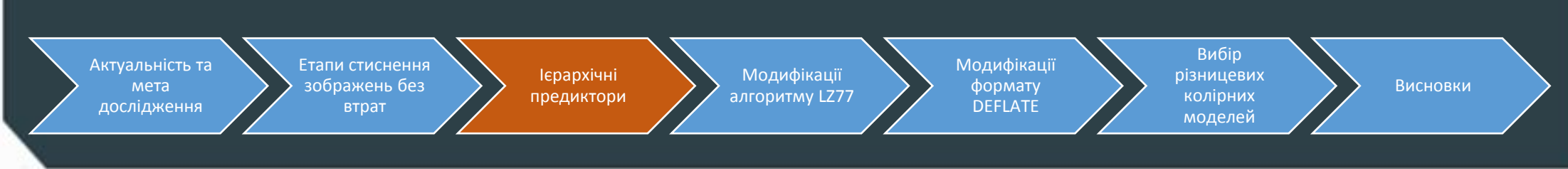
Послідовність обходу пікселів для реалізації прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат:

- на першому шарі послідовно обійдемо пікселі зображення, починаючи з першого, по рядках зверху вниз, а у кожному рядку – підряд зліва направо з кроком $h_1=2^k$, де k визначається з умови

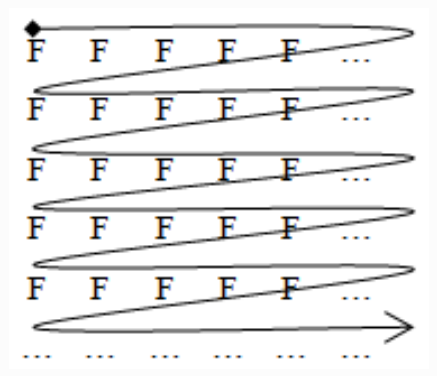
$$k = \left\lfloor \log_2 \left(\frac{\max(\min(\text{height}; \text{width}); 16) - 1}{15} \right) \right\rfloor$$

- на наступних шарах l (з другого по $k+1$ -й) обробимо проміжні пікселі зображення в два проходи: на першому послідовно опрацюємо ті з них, які містяться на перетині діагоналей квадратів з вершинами у суміжних пікселях попередніх шарів з кроком $h_l=2^{k+2-l}$ як по рядках так і по стовпцях, а на другому послідовно обійдемо пікселі між суміжними пікселями попередніх шарів і пікселями першого проходу з тим самим кроком по стовпцях і з удвічі зменшеним – по рядках (як на схемах наступного слайду).

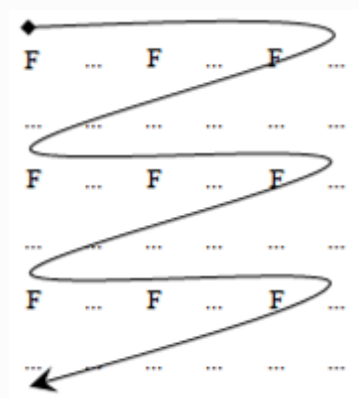




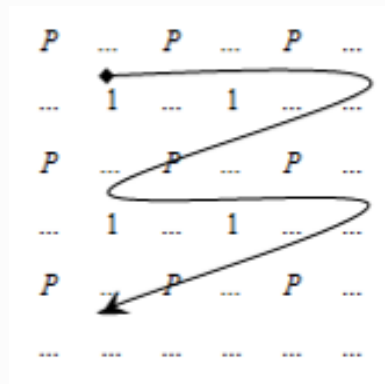
Черговість послідовного обходу пікселів



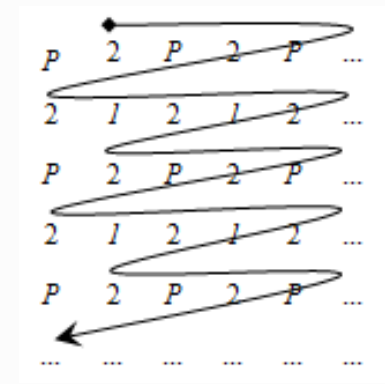
Черговість обходу пікселів в процесі прогресуючого ієрархічного опрацювання



Обхід пікселів першого шару

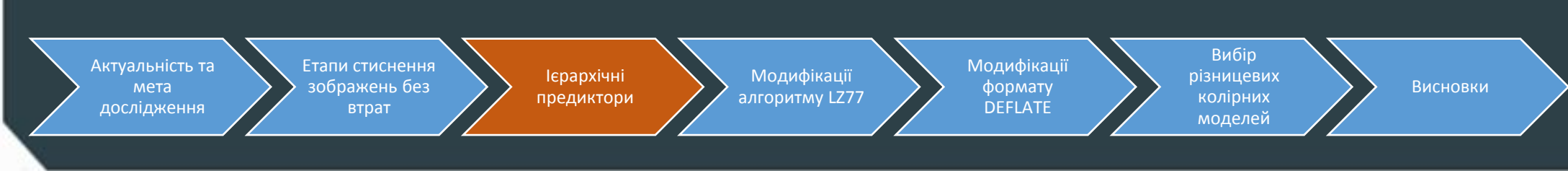


Обхід пікселів першого проходу наступних шарів



Обхід пікселів другого проходу наступних шарів

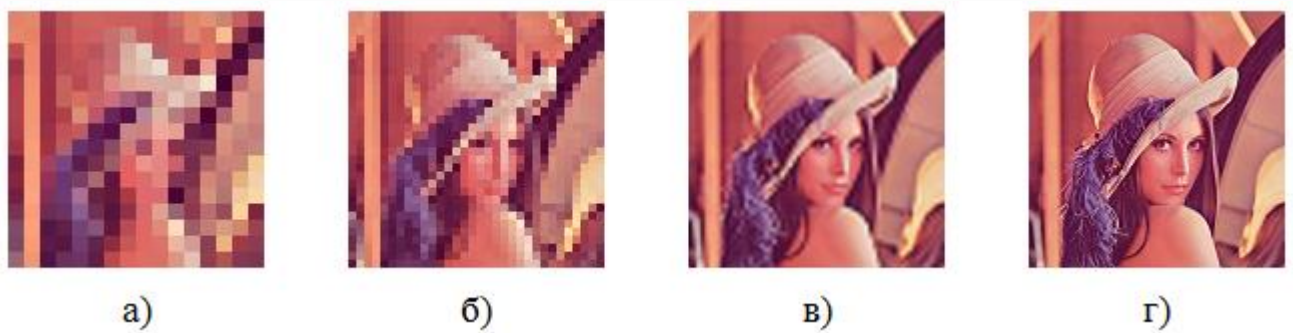




Прилад опрацювання пікселів зображення на перших шарах

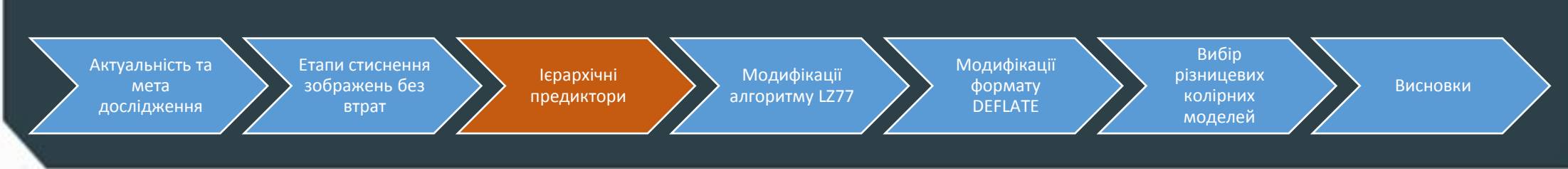


Опрацьовані пікселі зображення Lena.bmp після першого (а), другого (б), третього (в) та четвертого (г) шару



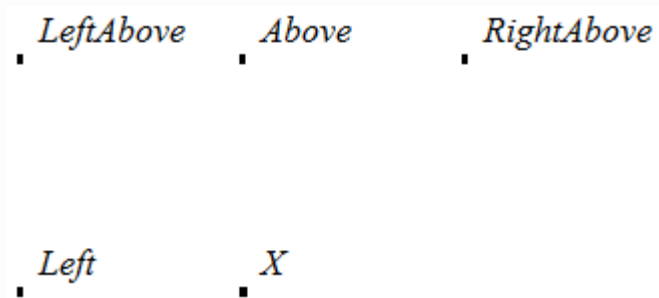
Прогресуюче заповнення області виводу 128 × 128 пікселів (стандарт дисплея Sony SmartWatch) після декодування результатів ієрархічного обходу зображення Lena.bmp до першого (а), другого (б), третього (в) та четвертого (г) шару



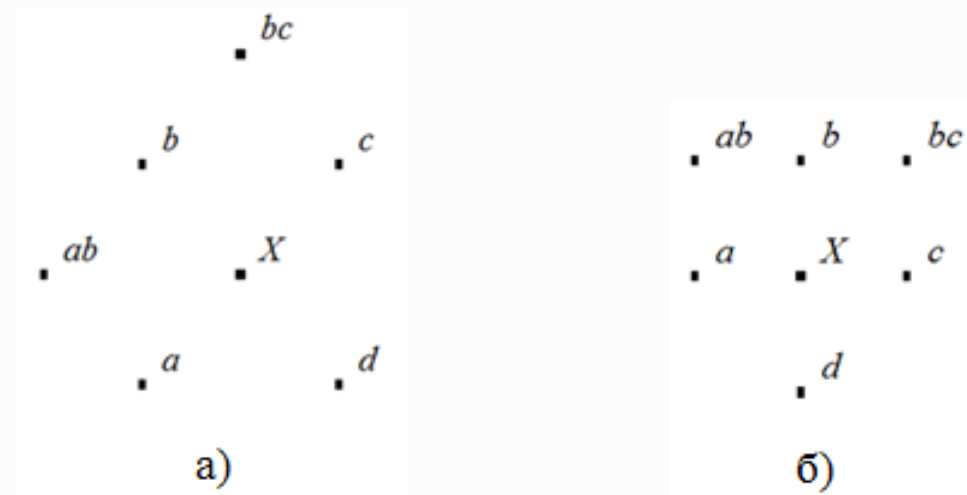


Предикторне кодування: схеми розміщення суміжних опрацьованих раніше елементів для елемента X

Послідовний обхід пікселів



Ієрархічний обхід пікселів



Обхід шарів, починаючи з другого:
а) для першого проходу; б) для другого проходу



Актуальність та
мета
дослідження

Етапи стиснення
зображень без
втрат

Ієрархічні
предиктори

Модифікації
алгоритму LZ77

Модифікації
формату
DEFLATE

Вибір
різницевих
колірних
моделей

Висновки

Предикторне кодування: відомі коди предикторів послідовного обходу

```
UBYTE LeftPredict(UBYTE Left, UBYTE Above, UBYTE LeftAbove)
{return Left;}
UBYTE AbovePredict(UBYTE Left, UBYTE Above, UBYTE LeftAbove)
{return Above;}
UBYTE AveragePredict(UBYTE Left, UBYTE Above, UBYTE LeftAbove)
{return (Left+Above)/2;}
UBYTE PaethPredict(UBYTE Left, UBYTE Above, UBYTE LeftAbove)
{int pp=Left+Above-LeftAbove;
 int pa, pb, pc;
 pa=abs(pp-Left); pb=abs(pp-Above); pc=abs(pp-LeftAbove);
 if (pa<=pb && pa<=pc) return Left;
 else if (pb<=pc) return Above;
 else return LeftAbove;}
UBYTE MedPredict(UBYTE Left, UBYTE Above, UBYTE LeftAbove)
{if (LeftAbove>=max(Left, Above)) return min(Left, Above);
 else if (LeftAbove<=min(Left, Above)) return max(Left, Above);
 else return Left+Above-LeftAbove; }
```



Актуальність та
мета
дослідження

Етапи стиснення
зображень без
втрат

Ієрархічні
предиктори

Модифікації
алгоритму LZ77

Модифікації
формату
DEFLATE

Вибір
різницевих
колірних
моделей

Висновки

Предикторне кодування: розроблені коди предикторів ієрархічного обходу

Коди двох основних симетричних ієрархічних предикторів, **орієнтованих на базове середнє арифметичне (шумова складова) тих двох протилежних елементів з найближчих чотирьох (a, b, c, d), які найменше між собою відрізняються (трендова складова), тобто найімовірніше належать одному об'єкту на зображенні:**

```
UBYTE ProgresPredict1(UBYTE a, UBYTE b, UBYTE c, UBYTE d)
{UBYTE pa, pb;
  if (a>=c) pa=a-c;
  else pa=c-a;
  if (b>=d) pb=b-d;
  else pb=d-b;
  if (pa<pb) return (a+c)/2;
  if (pb<pa) return (b+d)/2;
  return (a+b+c+d)/4; }
```

```
UBYTE ProgresPredict2(UBYTE a, UBYTE b, UBYTE c, UBYTE d)
{UBYTE absac, absbd, maxac, minac, maxbd, minbd, prognoz;
  if (a<=c) {absac=c-a; maxac=c; minac=a;}
  else {absac=a-c; maxac=a; minac=c;}
  if (b<=d) {absbd=d-b; maxbd=d; minbd=b;}
  else {absbd=b-d; maxbd=b; minbd=d;}
  if (absac<=absbd)
    {if (minbd>=minac && minbd<=maxac) return minbd;
     if (maxbd>=minac && maxbd<=maxac) return maxbd;
     if (minbd>maxac) return maxac;
     else return minac; }
  else
    {if (minac>=minbd && minac<=maxbd) return minac;
     if (maxac>=minbd && maxac<=maxbd) return maxac;
     if (minac>maxbd) return maxbd;
     else return minbd; }}
```



Актуальність та
мета
дослідження

Етапи стиснення
зображень без
втрат

Ієрархічні
предиктори

Модифікації
алгоритму LZ77

Модифікації
формату
DEFLATE

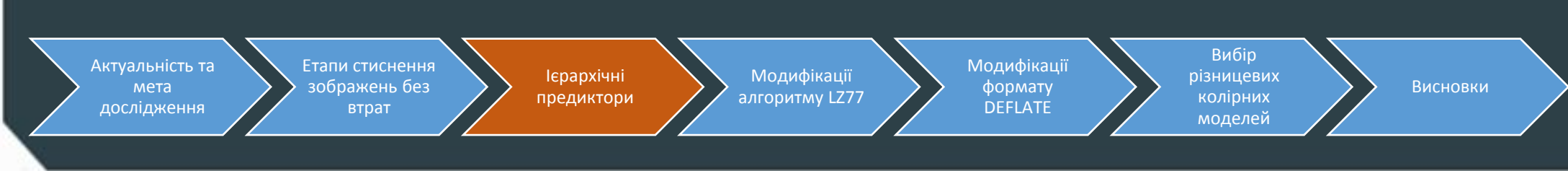
Вибір
різницевого
колірного
моделей

Висновки

Предикторне кодування: КС зображень АСТ окремими предикторами, брв

Предиктор	Шар	Прохід	№ файла								Середня ентропія
			1	2	3	4	5	6	7	8	
NonePredict	1	1	7.54	4.65	7.75	7.50	7.66	7.32	5.99	7.66	7.01
LeftPredict	1	1	3.57	1.68	5.26	4.57	4.60	5.67	1.74	5.13	4.03
AbovePredict	1	1	3.68	2.23	4.92	4.60	4.72	5.97	1.86	4.94	4.12
AveragePredict	1	1	4.66	2.88	4.86	4.27	4.40	5.59	2.58	4.74	4.25
PaethPredict	1	1	1.90	1.51	4.90	4.26	4.29	5.50	1.35	4.61	3.54
MedPredict	1	1	1.90	1.54	4.84	4.15	4.20	5.43	1.37	4.50	3.49
ProgresPredict1	2	1	7.46	4.61	6.93	6.83	7.18	7.19	5.99	7.33	6.69
		2	7.10	4.67	6.30	6.52	6.18	7.04	5.84	7.18	6.35
	3	1	7.27	4.48	6.43	6.44	6.61	7.12	6.00	6.91	6.41
		2	6.71	4.59	5.83	6.04	5.71	6.83	5.32	6.54	5.95
	$k+1$	1	5.65	2.90	4.80	4.10	4.44	5.59	2.85	4.52	4.36
	$k+1$	2	3.96	1.90	4.44	3.60	3.79	4.92	1.72	3.87	3.53
	Разом			4.88	2.57	4.72	4.03	4.22	5.41	2.47	4.41
ProgresPredict2	2	1	7.38	4.61	6.96	6.86	7.19	7.19	5.99	7.31	6.69
		2	7.07	4.67	6.29	6.57	6.21	7.04	5.30	7.10	6.28
	3	1	6.98	4.48	6.52	6.57	6.70	7.21	5.58	6.93	6.37
		2	6.67	4.59	5.89	6.12	5.84	6.85	4.30	6.52	5.85
	$k+1$	1	4.72	2.06	5.01	4.49	4.64	5.82	1.90	4.94	4.20
	$k+1$	2	0.23	1.19	4.65	4.03	4.10	5.24	0.96	4.38	3.10
	Разом			2.74	1.80	4.92	4.41	4.48	5.65	1.64	4.82





Предикторне кодування: коефіцієнти стиснення зображень набору АСТ комбінаціями предикторів, bpb

Комбінація	№ файла								Середня ентропія
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Послідовні предиктори формату PNG	1.89	1.46	4.81	4.23	4.28	5.49	1.33	4.61	3.51
Всі послідовні предиктори	1.89	1.46	4.80	4.15	4.20	5.43	1.33	4.50	3.47
Базові симетричні предиктори	2.74	1.80	4.72	4.03	4.21	5.41	1.64	4.41	3.62
Додаткові симетричні предиктори	4.21	1.83	4.66	4.01	4.16	5.40	1.77	4.40	3.81
Всі симетричні предиктори	2.74	1.76	4.66	3.99	4.15	5.39	1.61	4.39	3.59
Всі симетричні предиктори та ProgresPredict5	2.72	1.55	4.66	3.99	4.15	5.39	1.47	4.39	3.54
Всі симетричні предиктори та ProgresPredict6	2.09	1.69	4.66	3.99	4.15	5.39	1.47	4.39	3.48



Національний університет водного господарства та природокористування

Застосування комбінацій розроблених симетричних ієрархічних предикторів зменшує ентропію синтезованих зображень у середньому на 4.04 bpb, а фотореалістичних – на 3.06 bpb.

National University of Water and Environmental Engineering



Актуальність та
мета
дослідження

Етапи стиснення
зображень без
втрат

Ієрархічні
предиктори

Модифікації
алгоритму LZ77

Модифікації
формату
DEFLATE

Вибір
різницевої
колірних
моделей

Висновки

Модифікація алгоритму LZ77 для прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат з додатковим пошуком однакових послідовностей серед найближчих опрацьованих пікселів: кодування зміщень

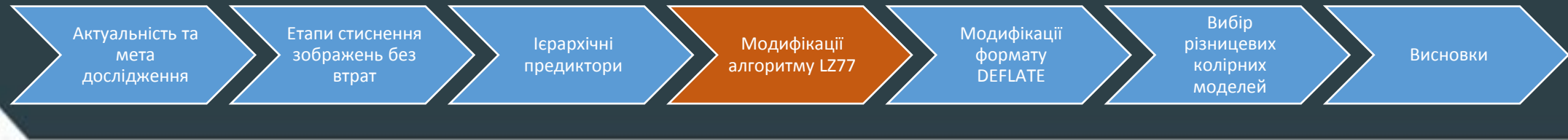
6
2 3
5 X
1 4

Додаткові зміщення
перших проходів
наступних шарів

5 2 6
1 X 3
4

Додаткові зміщення
других проходів
наступних шарів





Модифікація алгоритму LZ77 для прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат з додатковим пошуком однакових послідовностей серед найближчих опрацьованих пікселів: приклад однакової послідовності

3, 4, 6	3, 4, 6	3, 2, 6	3, 4, 4	2, 1, 5	...
3, 4, 5	3, 2, 6	3, 4, 4	2, 1, 5	0, 2, 2	...
2, 1, 3	3, 4, 4	3, 4, 4	4, 2, 3	1, 1, 1	...
4, 1, 1	3, 4, 4	3, 3, 4	0, 0, 3	1, 1, 1	...
3, 4, 6	3, 3, 4	6, 8, 3	4, 6, 3	4, 6, 8	...
...

Однакова послідовність довжиною 6 елементів за зміщенням 3 (заштрихована вертикально) для яскравостей пікселів першого проходу останнього шару (заштрихована горизонтально) умовного RGB-зображення



Актуальність та
мета
дослідження

Етапи стиснення
зображень без
втрат

Ієрархічні
предиктори

Модифікації
алгоритму LZ77

Модифікації
формату
DEFLATE

Вибір
різницевих
колірних
моделей

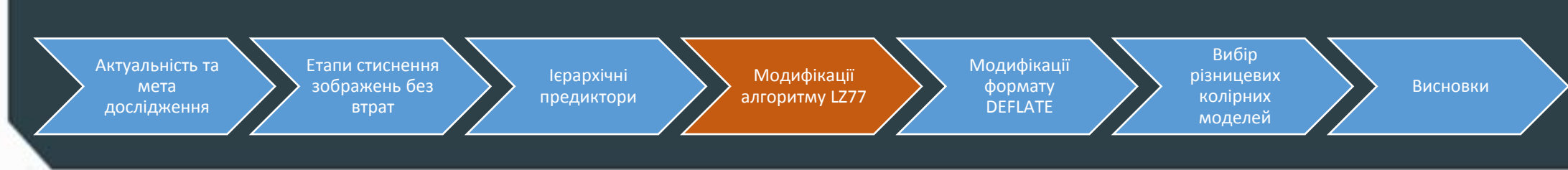
Висновки

Модифікація алгоритму LZ77 для прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат з додатковим пошуком однакових послідовностей серед найближчих опрацьованих раніше пікселів: КС зображень набору АСТ

Варіант алгоритму LZ77	№ файла								Середній КС
	1	2	3	4	5	6	7	8	
MinPNG без використання LZ77	2.20	1.84	4.84	4.21	4.32	5.51	1.75	4.64	3.66
MinPNG з LZ77 по словнику	1.67	0.50	4.82	4.16	4.31	5.16	0.52	4.61	3.21
Ієрархічне стиснення без використання LZ77	2.75	1.70	4.69	3.98	4.18	5.42	1.60	4.41	3.59
Ієрархічне стиснення з LZ77 по словнику з зміщеннями в елементах	2.53	0.90	4.67	3.95	4.16	5.31	0.98	4.40	3.36
Ієрархічне стиснення з LZ77 по словнику з зміщеннями в пікселях	2.52	0.87	4.67	3.94	4.16	5.25	0.93	4.40	3.34
Ієрархічне стиснення з LZ77 по потрійному словнику з зміщеннями в пікселях	2.52	0.86	4.67	3.93	4.15	5.21	0.93	4.39	3.33
Ієрархічне стиснення з LZ77 по найближчих опрацьованих пікселях	1.37	0.68	4.66	3.82	4.15	5.32	0.68	4.33	3.13
Ієрархічне стиснення з LZ77 по найближчих опрацьованих пікселях та по словнику	1.34	0.58	4.65	3.82	4.15	5.16	0.62	4.33	3.08



Національний університет
водного господарства
та природокористування



Інші модифікації алгоритму LZ77 для прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат:

- відкидання неефективних замін в процесі формування розкладу модифікованого алгоритму LZ77:
 - аналіз приростів додаткових бітів кодів зміщень (зменшує КС в середньому на 0.01 bpb);
 - ліквідація накладань замін по словнику на заміни по найближчих опрацьованих раніше пікселях (додатково зменшує КС в середньому на 0.02 bpb);
 - ліквідація замін по словнику з використанням прогнозованих довжин ентропійних кодів (зменшує КС окремих синтезованих зображень на 0.01-0.02 bpb);
- формування розкладу модифікованого алгоритму LZ77 з орієнтацією довжин **коротких замін** на цілі пікселі (зменшує КС окремих зображень на 0.01-0.02 bpb);
- кодування однакових квадратних фрагментів пікселів (зменшує КС лише зображення № 2 на 0.002 bpb).

1. Застосування класичного словникового алгоритму LZ77 по набору АСТ зменшує КС синтезованих зображень в середньому на 0.55 bpb, а фотореалістичних знімків – на 0.04 bpb.

2. Кодуючи зображення, зміщення алгоритму LZ77 доцільно зберігати в пікселях, а не в компонентах. Це дає змогу зменшити КС в середньому на 0.02 bpb.

3. Додатковий пошук однакових послідовностей серед найближчих опрацьованих раніше пікселів зменшує КС синтезованих зображень в середньому ще на 0.6 bpb, а фотореалістичних знімків – на 0.06 bpb.



Актуальність та
мета
дослідження

Етапи стиснення
зображень без
вtrat

Ієрархічні
предиктори

Модифікації
алгоритму LZ77

Модифікації
формату
DEFLATE

Вибір
різницевиx
колірних
моделей

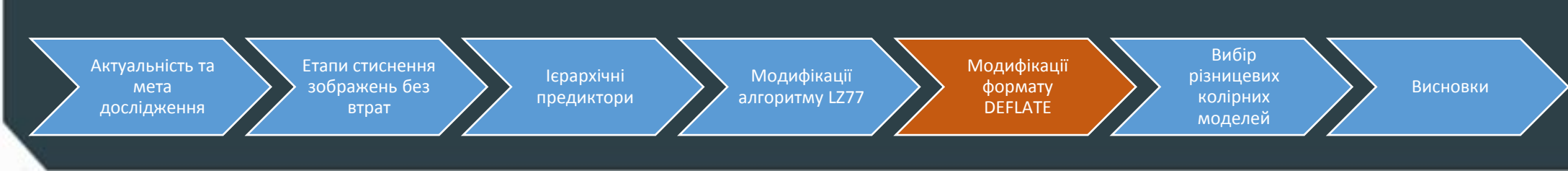
Висновки

Модифікації формату DEFLATE: вплив на КС зображень набору АСТ застосування кодування ARIC замість HUFF

Варіант контекстно-незалежних кодів	№ файла								Середній КС
	1	2	3	4	5	6	7	8	
HUFF по проходах без модифікованого LZ77	3.19	2.12	4.74	4.02	4.23	5.45	2.02	4.44	3.78
ARIC по проходах без модифікованого LZ77	2.75	1.70	4.69	3.98	4.18	5.42	1.60	4.41	3.59
HUFF по проходах після модифікованого LZ77	1.34	0.58	4.67	3.84	4.16	5.16	0.62	4.34	3.09
ARIC по проходах після модифікованого LZ77	1.34	0.58	4.65	3.82	4.15	5.16	0.62	4.33	3.08
ARIC з зберіганням у заголовках DEFLATE-блоків частот чи інтервалів елементів	1.34	0.58	4.65	3.81	4.14	5.16	0.61	4.32	3.07

1. Дані кожного шару і кожного проходу доцільно зберігати в різних DEFLATE-блоках, оскільки вони мають різні нерівномірності розподілів;
2. Застосування арифметичного кодування замість кодування Хафмана після алгоритму LZ77 зменшує КС зображень набору АСТ в середньому на 0.02 bpb.



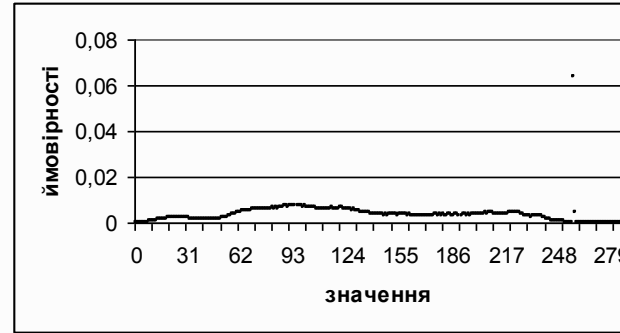


Модифікації формату DEFLATE: зменшення розміру блоків за рахунок відкидання неефективних заміन алгоритму LZ77

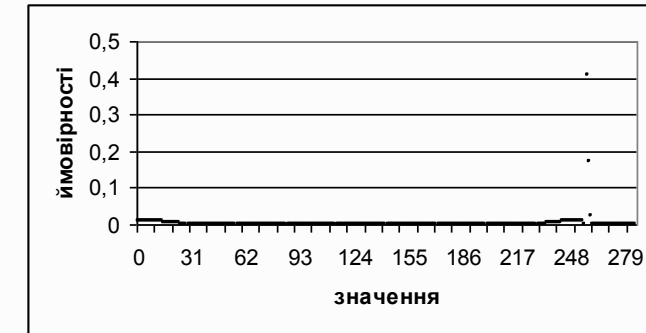
Умова ефективності окремої заміни:

$$\sum_{i=0}^{len_j-1} \tilde{l}_{sk+i} \geq \tilde{l}_{baseLL_{len_j}} + plusLL_{len_j} + \tilde{l}_{baseD_{offset_j}} + plusD_{offset_j}$$

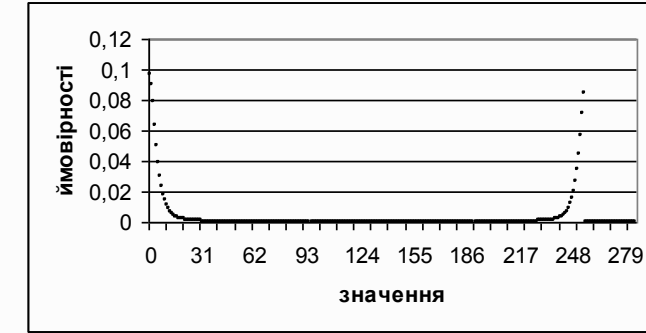
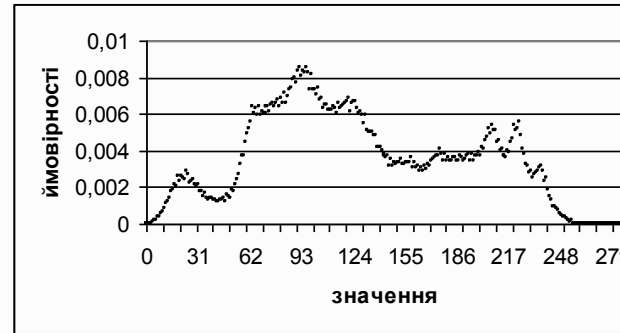
Для кожного вхідного блоку даних ми аналізуємо альтернативні стиснуті DEFLATE-блоки з різними максимальними довжинами неврахованих замін ЯК ПО НАЙБЛИЖЧИХ ОПРАЦЬОВАНИХ РАНІШЕ ПІКСЕЛЯХ, ТАК І ПО СЛОВНИКУ і обираємо серед них найкоротший блок для подальшої обробки.



а)



б)



Розподіл ймовірностей елементів літералів/довжин заміни модифікованих DEFLATE-блоків зображення Lena.bmp: а) після застосування всіх можливих LZ77-замін ($H=7.62$ bpb); б) після використання комбінацій ієрархічних предикторів та всіх можливих LZ77-замін ($H=4.16$); в) після застосування LZ77-замін від 9 елементів ($H=7.75$ bpb); г) після використання комбінацій ієрархічних предикторів та LZ77-замін від 9 елементів ($H=4.77$)



Актуальність та
мета
дослідження

Етапи стиснення
зображень без
втрат

Ієрархічні
предиктори

Модифікації
алгоритму LZ77

Модифікації
формату
DEFLATE

Вибір
різницевих
колірних
моделей

Висновки

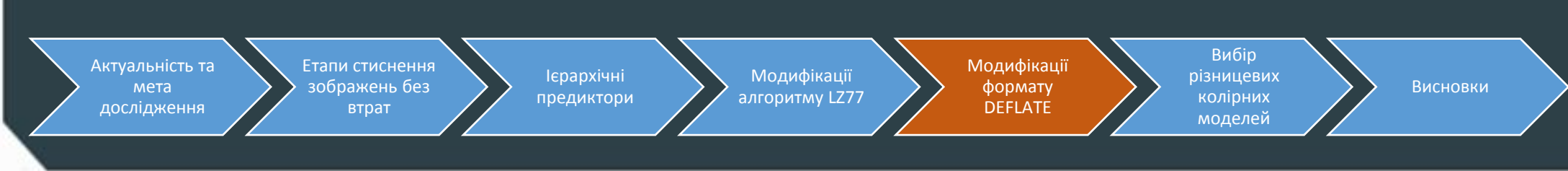
Модифікації формату DEFLATE: зменшення розміру блоків за рахунок відкидання неефективних замін алгоритму LZ77

Алгоритм зменшення розміру чергового DEFLATE-блоку:

1. Розрахувати частоти розподілів альтернативних стиснутих блоків з різними максимальними довжинами неврахованих замін як по найближчих опрацьованих раніше пікселях, так і по словнику, визначити їх прогнозовані довжини та обрати серед них найкоротший DEFLATE-блок;
2. Розрахувати за довжини ентропійних кодів DEFLATE-блоку, визначеного на першому кроці, та відкинути з початкового DEFLATE-блоку неефективні замінами;
3. Ітеративно зменшити розмір сформованого DEFLATE-блоку, щоразу враховуючи ефективні невраховані та відкидаючи неефективні враховані заміни алгоритму LZ77. Ми дослідили ефективність як **синтетичного**, так і **аналітичного** способів реалізації цього кроку.

Після виконання цього алгоритму сформований DEFLATE-блок потрібно використати для зберігання чергового вхідного блоку даних.





Модифікації формату DEFLATE: вплив на КС зображень набору АСТ зменшення розміру блоків за рахунок відкидання неефективних замінів алгоритму LZ77

Варіант алгоритму зменшення розміру DEFLATE-блоків	№ файла								Середній КС
	1	2	3	4	5	6	7	8	
З використанням всіх замінів LZ77 (без зменшення розміру DEFLATE-блоків)	1.35	0.57	5.04	4.16	4.65	5.32	0.60	4.73	3.30
Два кроки алгоритму зменшення розміру DEFLATE-блоків без виділення типів замінів	1.34	0.57	4.65	3.89	4.16	5.25	0.60	4.37	3.10
Два кроки алгоритму зменшення розміру DEFLATE-блоків з виділенням типів замінів	1.34	0.57	4.65	3.82	4.15	5.20	0.60	4.33	3.08
Всі кроки алгоритму зменшення розміру DEFLATE-блоків з виділенням типів замінів (синтетичний та аналітичний способи зменшення)	1.34	0.57	4.65	3.81	4.15	5.16	0.60	4.32	3.08

Ця модифікація дає змогу зменшити КС фотореалістичних зображень набору АСТ в середньому на 0.36 bpb, хоча й сповільнює їх кодування на 3.4 %. На розміри стиснутих зображень інших типів цей алгоритм суттєво не впливає.



Національний університет водного господарства та природокористування

National University of Water and Environmental Engineering



Актуальність та
мета
дослідження

Етапи стиснення
зображень без
втрат

Ієрархічні
предиктори

Модифікації
алгоритму LZ77

Модифікації
формату
DEFLATE

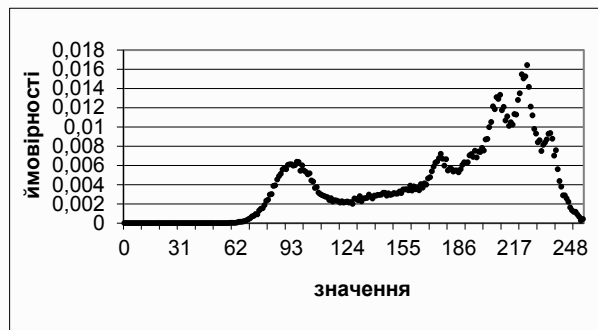
Вибір
різницевих
колірних
моделей

Висновки

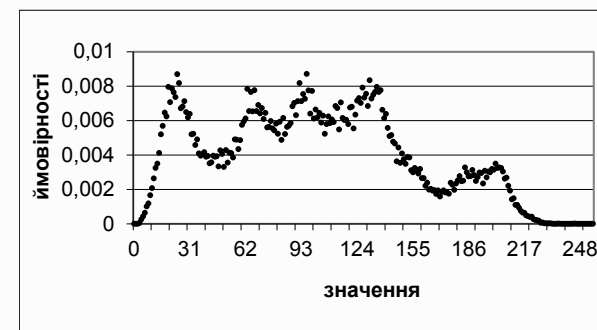
Застосування різницевих колірних моделей з цілими коефіцієнтами: обґрунтування доцільності зміщень різниць та врахування перехресної кореляції

Альтернативні моделі без
врахування цих факторів:

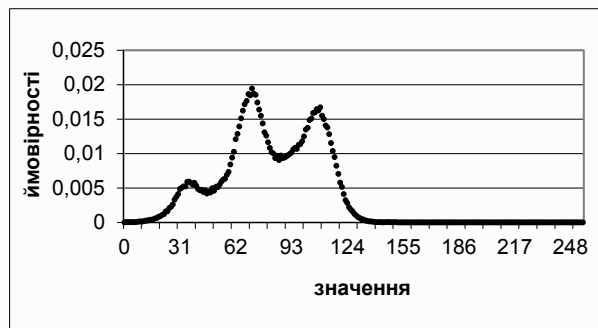
- 0'. R, G, B;
- 1'. R, R - G, R - B;
- 2'. R, R - G, B - G;
- 3'. R, G - B, R - B;
- 4'. G - R, G, G - B;
- 5'. G - R, G, B - R;
- 6'. R - B, G, G - B;
- 7'. B - R, G - R, B;
- 8'. R - G, B - G, B;
- 9'. B - R; B - G, B;
- 10'. R, G, G - B;
- 11'. R, G, R - B;
- 12'. R, R - G, B;
- 13'. R, B - G, B;
- 14'. G - R, G, B;
- 15'. B - R, G, B.



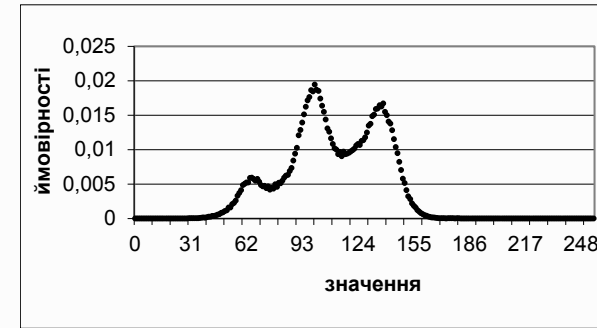
а)



б)

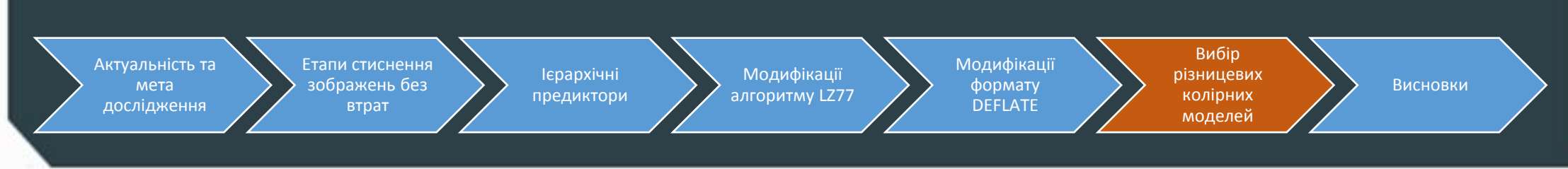


в)



г)

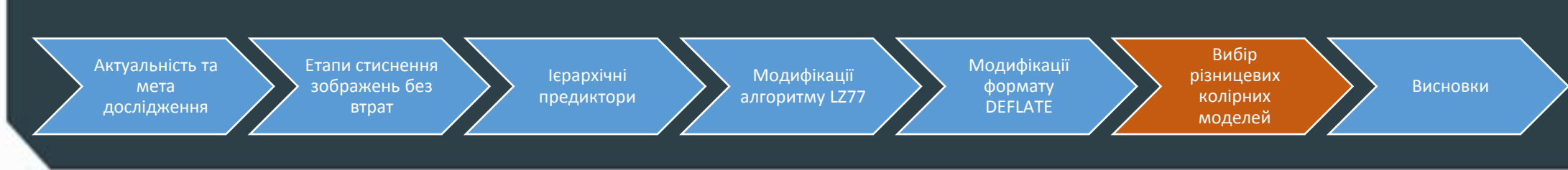
Розподіл ймовірностей яскравостей окремих компонентів та їх різниць, не
опрацьованих контекстно-залежним алгоритмом, для зображення Lena.bmp:
а) компоненти R; б) компоненти G; в) різниці R - G; г) зміщеної різниці R - G + 29



Застосування різницевої колірної моделі з цілими коефіцієнтами: альтернативні різницеві колірні моделі з медіанами компонентів та зміщеннями різниць

0. R, G, B;
1. R, G, $(R - \text{med}R) - (B - \text{med}B) + 128$;
2. R, G, $(G - \text{med}G) - (B - \text{med}B) + 128$;
3. R, $(R - \text{med}R) - (G - \text{med}G) + 128$, B;
4. R, $(B - \text{med}B) - (G - \text{med}G) + 128$, B;
5. $(G - \text{med}G) - (R - \text{med}R) + 128$, G, B;
6. $(B - \text{med}B) - (R - \text{med}R) + 128$, G, B;
7. R, G, $(B - \text{med}B) - (R - \text{med}R) + 128$;
8. R, G, $(B - \text{med}B) - (G - \text{med}G) + 128$;
9. R, $(G - \text{med}G) - (R - \text{med}R) + 128$, B;
10. R, $(G - \text{med}G) - (B - \text{med}B) + 128$, B;
11. $(R - \text{med}R) - (G - \text{med}G) + 128$, G, B;
12. $(R - \text{med}R) - (B - \text{med}B) + 128$, G, B;
13. R, $(R - \text{med}R) - (G - \text{med}G) + 128$, $(R - \text{med}R) - (B - \text{med}B) + 128$;
14. R, $(G - \text{med}G) - (R - \text{med}R) + 128$, $(G - \text{med}G) - (B - \text{med}B) + 128$;
15. R, $(B - \text{med}B) - (G - \text{med}G) + 128$, $(B - \text{med}B) - (R - \text{med}R) + 128$;
16. R, $(G - \text{med}G) - (R - \text{med}R) + 128$, $(B - \text{med}B) - (R - \text{med}R) + 128$;
17. R, $(R - \text{med}R) - (G - \text{med}G) + 128$, $(B - \text{med}B) - (G - \text{med}G) + 128$;
18. R, $(G - \text{med}G) - (B - \text{med}B) + 128$, $(R - \text{med}R) - (B - \text{med}B) + 128$;
19. $(R - \text{med}R) - (G - \text{med}G) + 128$, G, $(R - \text{med}R) - (B - \text{med}B) + 128$;
20. $(G - \text{med}G) - (R - \text{med}R) + 128$, G, $(G - \text{med}G) - (B - \text{med}B) + 128$;
21. $(B - \text{med}B) - (R - \text{med}R) + 128$, G, $(B - \text{med}B) - (G - \text{med}G) + 128$;
22. $(G - \text{med}G) - (R - \text{med}R) + 128$, G, $(B - \text{med}B) - (R - \text{med}R) + 128$;
23. $(R - \text{med}R) - (G - \text{med}G) + 128$, G, $(B - \text{med}B) - (G - \text{med}G) + 128$;
24. $(R - \text{med}R) - (B - \text{med}B) + 128$, G, $(G - \text{med}G) - (B - \text{med}B) + 128$;
25. $(R - \text{med}R) - (B - \text{med}B) + 128$, $(R - \text{med}R) - (G - \text{med}G) + 128$, B;
26. $(G - \text{med}G) - (R - \text{med}R) + 128$, $(G - \text{med}G) - (B - \text{med}B) + 128$, B;
27. $(B - \text{med}B) - (R - \text{med}R) + 128$, $(B - \text{med}B) - (G - \text{med}G) + 128$, B;
28. $(B - \text{med}B) - (R - \text{med}R) + 128$, $(G - \text{med}G) - (R - \text{med}R) + 128$, B;
29. $(R - \text{med}R) - (G - \text{med}G) + 128$, $(B - \text{med}B) - (G - \text{med}G) + 128$, B;
30. $(R - \text{med}R) - (B - \text{med}B) + 128$, $(G - \text{med}G) - (B - \text{med}B) + 128$, B;
31. R, $(G - \text{med}G) - (R - \text{med}R) + 128$, $(R - \text{med}R) - (B - \text{med}B) + 128$;
32. R, $(R - \text{med}R) - (G - \text{med}G) + 128$, $(G - \text{med}G) - (B - \text{med}B) + 128$;
33. R, $(G - \text{med}G) - (B - \text{med}B) + 128$, $(B - \text{med}B) - (R - \text{med}R) + 128$;
34. R, $(R - \text{med}R) - (G - \text{med}G) + 128$, $(B - \text{med}B) - (R - \text{med}R) + 128$;
35. R, $(G - \text{med}G) - (R - \text{med}R) + 128$, $(B - \text{med}B) - (G - \text{med}G) + 128$;
36. R, $(B - \text{med}B) - (G - \text{med}G) + 128$, $(R - \text{med}R) - (B - \text{med}B) + 128$;
37. $(G - \text{med}G) - (R - \text{med}R) + 128$, G, $(R - \text{med}R) - (B - \text{med}B) + 128$;
38. $(R - \text{med}R) - (G - \text{med}G) + 128$, G, $(G - \text{med}G) - (B - \text{med}B) + 128$;
39. $(R - \text{med}R) - (B - \text{med}B) + 128$, G, $(B - \text{med}B) - (G - \text{med}G) + 128$;
40. $(R - \text{med}R) - (G - \text{med}G) + 128$, G, $(B - \text{med}B) - (R - \text{med}R) + 128$;
41. $(G - \text{med}G) - (R - \text{med}R) + 128$, G, $(B - \text{med}B) - (G - \text{med}G) + 128$;
42. $(B - \text{med}B) - (R - \text{med}R) + 128$, G, $(G - \text{med}G) - (B - \text{med}B) + 128$;
43. $(B - \text{med}B) - (R - \text{med}R) + 128$, $(R - \text{med}R) - (G - \text{med}G) + 128$, B;
44. $(R - \text{med}R) - (G - \text{med}G) + 128$, $(G - \text{med}G) - (B - \text{med}B) + 128$, B;
45. $(R - \text{med}R) - (B - \text{med}B) + 128$, $(B - \text{med}B) - (G - \text{med}G) + 128$, B;
46. $(R - \text{med}R) - (B - \text{med}B) + 128$, $(G - \text{med}G) - (R - \text{med}R) + 128$, B;
47. $(G - \text{med}G) - (R - \text{med}R) + 128$, $(B - \text{med}B) - (G - \text{med}G) + 128$, B;
48. $(B - \text{med}B) - (R - \text{med}R) + 128$, $(G - \text{med}G) - (B - \text{med}B) + 128$, B.



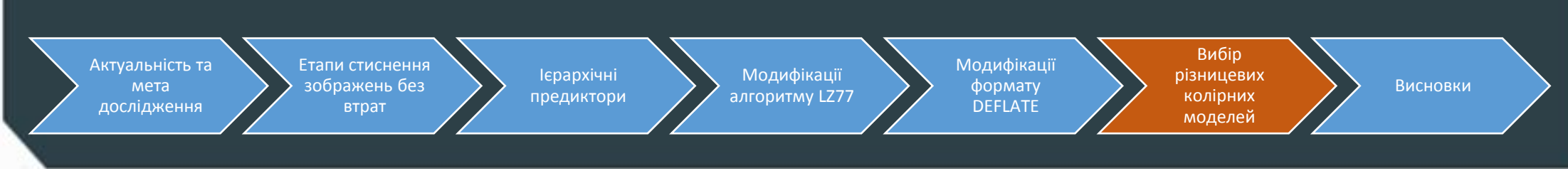


Застосування різницевих колірних моделей з цілими коефіцієнтами: вплив на КС зображень набору АСТ застосування вибраних різницевих колірних моделей з зміщеннями різниць на медіани компонентів

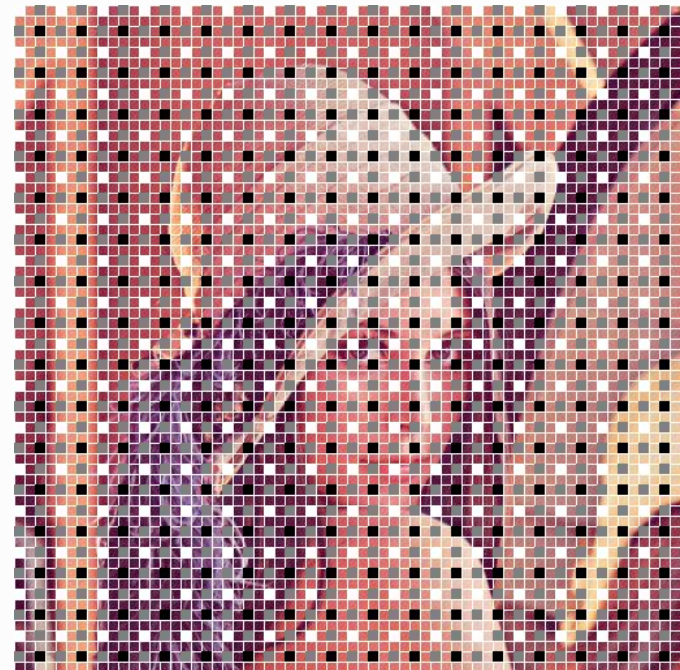
Колірна модель	№ файла								Середній КС
	1	2	3	4	5	6	7	8	
RGB	1.34	0.58	4.65	3.81	4.14	5.16	0.61	4.32	3.07
Різницева з 49-ти чи 31-ї альтернативної	1.34	0.57	4.45	3.25	3.69	4.06	0.59	3.71	2.71
Різницева з 49-ти альтернативних без <i>alfa</i>	1.34	0.57	4.62	3.27	3.81	4.21	0.59	3.82	2.78
Різницева з 49-ти альтернативних без медіан компонентів	1.34	0.57	4.47	3.27	3.75	4.05	0.59	3.70	2.72
Різницева з 16-ти альтернативних по матриці аналізу <i>A</i>	1.34	0.57	4.45	3.27	3.69	4.07	0.59	3.76	2.72
Різницева з 49-ти альтернативних по матриці аналізу <i>A</i>	1.34	0.57	4.45	3.27	3.69	4.06	0.59	3.73	2.71

Такі колірні моделі дають змогу зменшити КС для синтезованих зображень в середньому на **0.01 bpb**, а для фотореалістичних знімків – на **0.58 bpb** (якщо медіани замінити на центри інтервалів різниць – то на **0.6 bpb**).

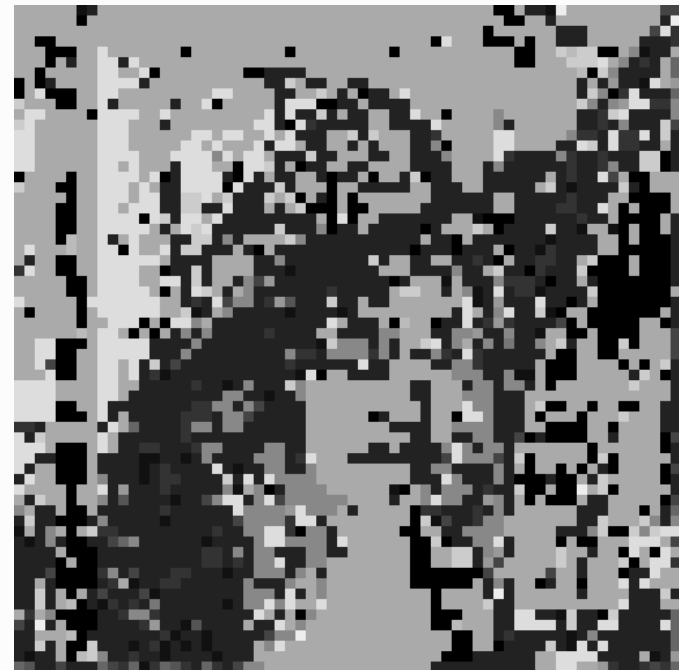




Застосування різницевої колірної моделі з цілими коефіцієнтами: синтез різницевої колірної моделі мінімальних кодованих блоків фрагментів зображень



MCU першого (містяться в білих квадратах), і другого (першого проходу – в чорних квадратах, другого проходу – в сірих квадратах) шарів для зображення Lena.bmp



Номери основних різницевої колірної моделі для окремих MCU зображення Lena.bmp у відтинках сірого (0 – чорний, 15 – білий колір)



Національний університет водного господарства та природокористування

Застосування різницевої колірної моделі до окремих MCU дає змогу зменшити КС в середньому на **0.01 bpb**, а з аналізом доцільності повернення до моделі цілого зображення – на **0.02 bpb**, але сповільнює кодування в **2.95 рази** і тому не рекомендується до використання в графічних форматах.

Актуальність та
мета
дослідження

Етапи стиснення
зображень без
втрат

Ієрархічні
предиктори

Модифікації
алгоритму LZ77

Модифікації
формату
DEFLATE

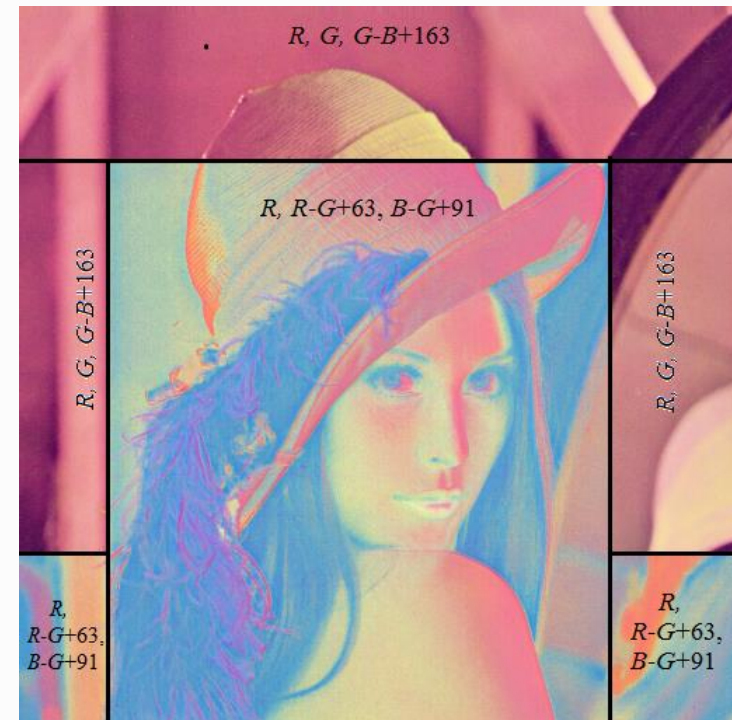
Вибір
різницевих
колірних
моделей

Висновки

Застосування різницевих колірних моделей з цілими коефіцієнтами: розбиття зображень на прямокутні фрагменти з різними різницевими колірними моделями

Для прискорення вибору різницевої колірної моделі з центруванням інтервалів різниць компонентів ми виділили з 49 альтернативних моделей 16 основних:

0. R, G, B ;
1. $R, R-G - \text{middle}(R-G) + 128, R-B - \text{middle}(R-B) + 128$;
2. $R, R-G - \text{middle}(R-G) + 128, B-G - \text{middle}(B-G) + 128$;
3. $R, G-B - \text{middle}(G-B) + 128, R-B - \text{middle}(R-B) + 128$;
4. $G-R - \text{middle}(G-R) + 128, G, G-B - \text{middle}(G-B) + 128$;
5. $G-R - \text{middle}(G-R) + 128, G, B-R - \text{middle}(B-R) + 128$;
6. $R-B - \text{middle}(R-B) + 128, G, G-B - \text{middle}(G-B) + 128$;
7. $B-R - \text{middle}(B-R) + 128, G-R - \text{middle}(G-R) + 128, B$;
8. $R-G - \text{middle}(G-R) + 128, B-G - \text{middle}(B-G) + 128, B$;
9. $B-R - \text{middle}(B-R) + 128; B-G - \text{middle}(B-G) + 128, B$;
10. $R, G, G-B - \text{middle}(G-B) + 128$;
11. $R, G, R-B - \text{middle}(R-B) + 128$;
12. $R, R-G - \text{middle}(R-G) + 128, B$;
13. $R, B-G - \text{middle}(B-G) + 128, B$;
14. $G-R - \text{middle}(G-R) + 128, G, B$;
15. $B-R - \text{middle}(B-R) + 128, G, B$.



Результати розбиття зображення Lena.bmp на прямокутні фрагменти з різними різницевими колірними моделями

а)
Національний університет
водного господарства
та природокористування

б)
Застосування різницевих колірних моделей до окремих прямокутників дає змогу зменшити КС в середньому **на 0.01 bpb**, але сповільнює кодування в **6.18 рази** і тому не рекомендується до використання в графічних форматах.

Актуальність та
мета
дослідження

Етапи стиснення
зображень без
втрат

Ієрархічні
предиктори

Модифікації
алгоритму LZ77

Модифікації
формату
DEFLATE


Вибір
різницевих
колірних
моделей

Висновки

Коефіцієнти прогресуючого ієрархічного стиснення різних типів зображень набору АСТ після застосування досліджених варіантів алгоритмів, брб

Варіант алгоритму	Тип зображення		Середній КС набору АСТ
	Синтезовані	Фото-реалістичні	
Лише кодування HUFF	6.06	7.58	7.01
Додаткове застосування комбінацій симетричних ієрархічних предикторів	2.44	4.58	3.78
Додаткове застосування ARIC замість HUFF	2.02	4.54	3.59
Додаткове використання алгоритму LZ77 по словнику	1.44	4.47	3.33
Додаткове застосування алгоритму LZ77 по словнику та по найближчих опрацьованих пікселях	0.86	4.42	3.08
Додаткове використання різницевих колірних моделей з 49-и альтернативних без зміщень різниць	0.83	3.94	2.78
Додаткове використання різницевих колірних моделей з 49-и альтернативних з зміщеннями різниць на медіани	0.83	3.84	2.71
Додаткове використання різницевих колірних моделей з 49-и альтернативних з центруванням різниць	0.83	3.81	2.69





Актуальність та
мета
дослідження

Етапи стиснення
зображень без
втрат

Ієрархічні
предиктори

Модифікації
алгоритму LZ77

Модифікації
формату
DEFLATE

Вибір
різницевого
колірного
моделей

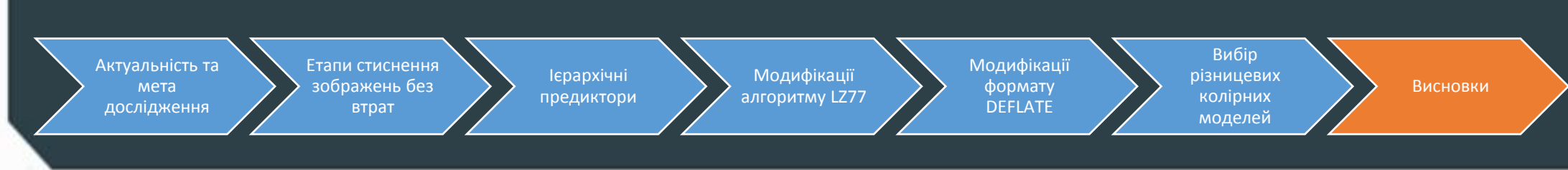
Висновки

Основні результати дослідження

В роботі розв'язана важлива наукова проблема розробки графічного формату прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат шляхом пристосування і оптимізація існуючих та створення нових методів кодування, які забезпечують прийнятні коефіцієнти стиснення та високу швидкість декодування. При цьому отримані такі основні наукові і практичні результати:

1. Розроблено дієву схему пошарового обходу пікселів зображень з двома проходами на кожному шарі, починаючи з другого, що дало змогу реалізувати прогресуюче ієрархічне стиснення зображень без втрат.
2. Вперше створено симетричні і асиметричні предиктори для застосування в процесі прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат та обгрунтовано механізм їх використання. Застосування комбінацій цих симетричних ієрархічних предикторів зменшує ентропію **синтезованих** зображень у середньому **на 4.04 bpb**, а **фотореалістичних** – на **3.06 bpb**.
3. Вперше класичний алгоритм словникового стиснення LZ77 з стандартним пошуком однакових послідовностей по словнику доповнено додатковим пошуком однакових послідовностей, починаючи з найближчих опрацьованих раніше пікселів з присвоюючи їм найменших зміщень з метою зменшення міжелементної надлишковості між однаковими фрагментами. Таке доповнення дає змогу зменшити КС **синтезованих** зображень в середньому **на 0.6 bpb** та **фотореалістичних** знімків – **на 0.06 bpb**.





Основні результати дослідження

4. Вперше розроблені методи та алгоритми формування різницевих колірних моделей з цілими коефіцієнтами та зміщеннями різниць компонентів для збільшення кодової за рахунок міжкомпонентної надлишковості як для цілих зображень, так і для їх окремих фрагментів перед ієрархічним стисненням без втрат. Застосування таких різницевих колірних моделей до цілих зображень в процесі прогресуючого ієрархічного стиснення без втрат дає змогу в середньому зменшити КС для **синтезованих зображень на 0.01 bpb**, а для **фотореалістичних знімків – на 0.6 bpb**.
5. Отримав подальший розвиток модифікований алгоритм словникового стиснення LZ77 шляхом ліквідації накладань заміни по словнику на заміни по найближчих раніше опрацьованих пікселях та проведення аналізу приростів додаткових бітів. Такі вдосконалення дають змогу зменшити КС **дискретно-тонових зображень максимум на 0.06 bpb** та **фотореалістичних знімків з однаковими віддаленими фрагментами – максимум на 0.08 bpb**.
6. Розроблено графічний формат HBF-LS з реалізацією прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат та проаналізовано ефективність його застосування для різних типів зображень.



Публікації результатів дослідження станом на 20.01.2026

I. Публікації, проіндексовані у Scopus, Web of Science

1. Bomba A. Ya., Shportko A. V., Postolatii V. A. Redistribution of the Compressed Data Between Modified DEFLATE-Blocks in the Image Compression Process Without Lossless. *Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2024)* : Proceedings of the 8th International Conference (Lviv, 12-13 april, 2024). ceur-ws.org Vol. II: Modeling, Optimization, and Controlling in Information and Technology Systems Workshop (MOCITSW). P. 145-156. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3668/paper11.pdf>. (Проіндексовано в Scopus).
2. Shportko A. V., Postolatii V. A. Development of Predictors to Increase the Efficiency of Progressive Hierarchic Context-Independent Compression of Images Without Losses. *Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2021)* : Proceedings of the 5th International Conference (Kharkiv, 22-23 april, 2021). ceur-ws.org. Vol. 2870. P. 1026-1038. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2870/paper77.pdf>. (Проіндексовано в Scopus).
3. Shportko A. V., Bomba A. Ya. Peculiarities of Adaptation of the LZ77 Dictionary Algorithm to Lossless Image Compression. *Computing*. 2025. № 24 (1). pp. 126-133. URL: <https://computingonline.net/computing/article/view/3883>. (Проіндексовано в Scopus).
4. Shportko A. V., Bomba A. Ya., Postolatii V. A. Programming the Formation of Difference Color Models for Lossless Image Compression. *Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2023)* : Proceedings of the 7th International Conference (Kharkiv, 20-21 april, 2023). ceur-ws.org. Vol. 3. P. 53-68. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-3403/paper5.pdf>. (Проіндексовано в Scopus).
5. Shportko A. V., Bomba A. Ya., Postolatii V. A. Rejection of the Inefficient Replacements while Forming the Schedule of the Modified Algorithm LZ77 in the Process of Progressive Hierarchical Compression of Images without Losses. *Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2022)* : Proceedings of the 6th International Conference (Glivice, Poland, 12-13 may, 2022). ceur-ws.org. Vol. 3171. P. 1594-1605. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-3171/paper113.pdf>. (Проіндексовано в Scopus).
6. Shportko A., Shportko V. The Acceleration of the Determination of the Median of Nested Subarrays Using Two Binary Pyramids. *Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2020)* : Proceedings of the 4th International Conference (Lviv, Ukraine, 23-24 april, 2020). ceur-ws.org. Vol. 2604. P. 1102-1116. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2604/paper72.pdf>. (Проіндексовано в Scopus).



Публікації результатів дослідження станом на 20.01.2026

7. Shportko O., Shportko L. The Use of a Fixed Height Binary Tree to Accelerate the Calculation of the Medians of Subarrays. *Computer Science and Information Technologies (CSIT 2020) : Proceedings of the XVth International Scientific and Technical Conference (Zbarazh, Ukraine, 23-26 september, 2020)*. Springer Cham. Vol. 2. P. 46-49. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9321921>. (Проіндексовано в WoS та в Scopus).

II. Публікації у фахових виданнях України категорії А

8. Шпортко О. В., Бомба А. Я. Застосування бінарного дерева пошуку з фіксованою висотою для прискорення обробки одновимірних масивів. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2025. № 1. С. 199–208. URL: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2025-1-18>.

III. Публікації у фахових виданнях України категорії Б

9. Бомба А. Я., Шпортко О. В., Шпортко Л. В. Особливості застосування арифметичного кодування в процесі прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка" (Серія: Інформаційні системи та мережі)*. 2014. № 783. С. 12-22.
10. Бомба А. Я., Шпортко О. В., Яйлимов Б. Я. Підвищення ефективності ентропійного виділення нечітких фрагментів об'єктів зображень за допомогою предикторів. *Відбір і обробка інформації*. 2013. № 38 (114). С. 97-102.
11. Шпортко О. В. Аналіз ефективності модифікацій алгоритмів графічного формату PNG. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка" (Серія: Інформаційні системи та мережі)*. 2014. № 783. С. 262-270.
12. Шпортко О. В. Оптимізація застосування модифікованого формату словникової компресії DEFLATE у процесі прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат. *Науковий вісник Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича (Серія: Комп'ютерні системи та компоненти)*. 2013. Т. 4. Вип. 4. С. 40-52.
13. Шпортко О. В. Використання предикторів в процесі прогресуючого ієрархічного контекстно-незалежного стиснення зображень без втрат. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка" (Серія: Комп'ютерні науки та інформаційні технології)*. 2013. № 771. С. 354-364.



Публікації результатів дослідження станом на 20.01.2026

14. Шпортько О. В., Сімашко В. Й. Застосування алгоритму переходу до коротших хеш-ланцюгів у процесі прогресуючого стиснення кольорових зображень без втрат. *Науковий вісник Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича (Серія: Комп'ютерні системи та компоненти)*. 2013. Т. 4. Вип. 3. С. 124-130.
15. Шпортько О. В., Малаш К. М. Застосування мемоізації в задачах мінімізації кількості знаків арифметичних операцій. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування (Серія: Технічні науки)*. Рівне: НУВГП, 2020. № 2 (90). С. 127-143.
16. Шпортько О. В., Бомба А. Я. Застосування різницевих кольірних моделей до фрагментів RGB-зображень перед прогресуючим ієрархічним стисненням без втрат. *Відбір і обробка інформації*. 2024. № 52 (128). С. 74-86. DOI: <https://doi.org/10.15407/vidbir2024.52.074>.
17. Шпортько О. В., Бомба А. Я., Янчук П. С., Шпортько В. О. Застосування різницевих кольірних моделей з цілими і напівцілими коефіцієнтами для стиснення зображень в модифікованому графічному форматі JPEG. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка" (Серія: Інформаційні системи та мережі)*. 2019. № 5. С. 14-25. URL: <https://doi.org/10.23939/sisn2019.01.014>.
18. Шпортько О. В., Шпортько Л. В., Бомба А. Я. Підвищення ефективності застосування словникових методів компресії для прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування (Серія: Технічні науки)*. Рівне: НУВГП, 2021. № 4 (96). С. 130-145.
19. Шпортько О. В., Шпортько Л. В., Бомба А. Я. Формування розкладу модифікованого алгоритму LZ77 у форматі DEFLATE з орієнтацією довжин однакових послідовностей на цілі пікселі. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування (Серія: Технічні науки)*. Рівне: НУВГП, 2022. № 1 (97). С. 244-260.
20. Shportko A. V., Shportko L. V. Acceleration of large integer arrays sorting using ranges of values and frequencies of elements. *Information Extraction and Processing*. 2019. № 47 (123). P. 73-79. URL: <https://doi.org/10.15407/vidbir2019.47.073>.





Дякуємо за увагу!



Національний університет
водного господарства
та природокористування

National University of Water
and Environmental
Engineering

