

УДК 006.91

Н.В. ГЛУХОВА, канд. техн. наук, доц., ДВНЗ "Національний гірничий університет", Дніпропетровськ

МЕТРОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ НАПІВТОНОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Розглянуто існуючі проблеми розробки метрологічного забезпечення при використанні методів вимірювань, що засновані на ресстрації та спектральному аналізі зображень. Розроблено методику оцінки точності відтворення просторової частоти у процедурі спектрального аналізу цифрових напівтонових зображень, отриманих шляхом сканування. Лл.: 1. Бібліогр.: 23 назв.

Ключові слова: метрологічне забезпечення, спектральний аналіз, просторова частота, цифрові напівтонові зображення.

Постановка проблеми. Завдяки можливостям сучасних комп'ютерних технологій розширюється спектр завдань, які вирішуються у рамках метрології. Спостерігається загальна тенденція підвищення візуалізації при вирішенні метрологічних задач. Паралельно з цим виникає необхідність відповідної перебудови та удосконалення існуючих алгоритмів обробки даних. Однією з головних цілей виступає необхідність параметризації сигналів та зображень: обґрунтований вибір та оцінка кількісних значень саме тих параметрів, які для досліджуваного об'єкту або процесу виступають у якості "паспортних", тобто таких, що забезпечують встановлення специфічних ознак об'єкту вимірювань.

Аналіз літератури. Галузі науки, у яких набуло широкого розповсюдження використання у якості вимірювальної інформації зображень, включають фізику, хімію, біологію, медицину. Отримання та подальший аналіз зображень дозволяє використовувати потужний потенціал з метою вилучення великої кількості параметрів або характеристик досліджуваного об'єкту [1].

В багатьох галузях комп'ютерний аналіз зображень виявляється ефективною альтернативою застарілим способам технічної та медичної діагностики, у яких рішення приймалися людиною. При візуальному аналізі людині-експерту необхідно було розв'язувати низку складних завдань, пов'язаних з інтуїтивними та неоднозначними поняттями, наприклад, границя, довжина, орієнтація об'єкту [2].

У роботі [3] підкреслюються переваги застосування візуалізації в метрологічній практиці – це можливість поєднання доступу до кількісної та якісної інформації одночасно, що забезпечує максимально повне

представлення про об'єкт вимірювань. Однак, як зазначає автор цієї статті, на сьогоднішній день відсутні роботи, присвячені професіональним вивченням проблем метрологічного забезпечення у сфері візуалізації та цифрової обробки зображень.

Окремих питань стоїть обчислення компонентів невизначеності оцінки геометричних розмірів та розрахунків методичних складових невизначеності для широко розповсюджених методів обробки зображень, наприклад, фільтрації. Згідно з даними, наведеними у роботі [4], відносна методична похибка методу низькочастотної фільтрації не перевищує 10%, відносна похибка визначення положення реального максимуму інтенсивності світлової плями – 7%, при використанні методу низькочастотної фільтрації можливо забезпечення виділення фрагментів зображення з відносною методичною похибкою на рівні 6%.

У патенті [5] запропонований спосіб діагностики, заснований на фіксації та співставленні структур газорозрядного випромінювання навколо еталонного та досліджуваного об'єктів в електромагнітному полі. Як підкреслює заявник, новизною розробки є використання небіологічного еталонного об'єкту з метою оцінки метрологічних характеристик приладу. При цьому процедура вимірювання полягає у багатократній фіксації структури газорозрядного випромінювання навколо еталонного об'єкту з небіологічного матеріалу. Надалі оцінюється відносне відхилення значень в ряду виміряних кількісних геометричних параметрів. Якщо відносне відхилення не перевищує порогу 10%, то результати вважаються задовільними.

Таким чином, наявні окремі результати оцінки метрологічних характеристик при аналізі зображень, але відсутнє формування загального підходу до синтезу метрологічного забезпечення обробки вимірювальної інформації візуального характеру.

Метою статті є розробка метрологічного забезпечення спектрального аналізу зображень газорозрядного випромінювання, зокрема дослідження точності відтворення параметру просторова частота при аналого-цифровому перетворенні зображень.

Основна частина. При використанні зображень у якості вимірювальної інформації необхідно оцінити метрологічні характеристики на декількох етапах, зокрема, при отриманні, збереженні, обробці та перетворенні зображень. Безпосередньо сам процес реєстрації зображень вимагає оцінки невизначеності вимірювань, яка на даному етапі обумовлюється роздільною здатністю використаної апаратури. З метрологічної точки зору до необхідної кількості пікселів висувається

вимога, аналогічна умові до кроку дискретизації сигналу: якщо кількості пікселів достатньо, щоб задовольнити критеріям Найквісту, то отримане у результаті аналого-цифрового перетворення зображення вважається задовільним представленням реального об'єкту спостереження [6].

Розглянемо конкретний приклад, який наявно демонструє проблеми синтезу метрологічного забезпечення методу вимірювань, заснованому на реєстрації та аналізі зображень. Метод реєстрації газорозрядного випромінювання об'єктів, що виникає у результаті зовнішнього впливу у вигляді імпульсного електромагнітного поля, знайшов застосування у різних галузях – від медичної діагностики до неруйнівного контролю [7 – 10]. Незважаючи на велику кількість та різноманіття досліджуваних об'єктів при застосуванні методу, його розповсюдження суттєво гальмується відсутністю стандартизованих методик формування та обробки результатів вимірювань у вигляді візуальних даних.

У рамках даної роботи розглядається модифікація методу, що полягає у реєстрації зображень газорозрядного випромінювання на фотоматеріалі в моноімпульсному режимі, з подальшою оцифровкою зображення з використанням сканеру з високою роздільною здатністю. Стандартному аналізу роздільної здатності сканерів та оцінці виникаючих похибок присвячено ряд робіт [12 – 15]. Розглянуті методи розрахунку похибок аналого-цифрового перетворення зображень виявляються корисними у тому разі, коли параметризація вимірювальних даних у вигляді зображень передбачає оцінку геометричних характеристик об'єктів.

У рамках даної роботи спробуємо підійти до синтезу метрологічного забезпечення методів аналізу оцифрованих зображень дещо з іншого боку. Розроблений підхід було обумовлено колом завдань, які вирішувалися методом реєстрації газорозрядного випромінювання крапель рідини з метою дослідження властивостей води та водних розчинів [16 – 20]. Усі методи, запропоновані у вказаних роботах, ґрунтуються на спектральному аналізі зображень.

З точки зору цифрової обробки даних спектральний аналіз може бути застосований як до сигналів, що змінюються у часі, так і до функцій просторових параметрів. У тому випадку, коли ми маємо справу з необхідністю розробки метрологічного забезпечення при аналізі вимірювальної інформації у вигляді зображень, виявляються додаткові проблеми з відсутністю стандартизованих методик вирішення такого класу задач.

Зокрема, фактично усі параметри зображення необхідно розглядати як функції такого параметру як координата. Спроба використання підходів частотного аналізу зображень призводить до необхідності

введення параметру просторова частота. Просторова частота є аналогом частоти при зміні сигналу у часі, але є функцією координати. В оптиці просторова частота використовується для оцінки якості оптичних приладів або систем передачі інформації про об'єкт. Розмірністю просторової частоти є м^{-1} . Фізичний сенс параметру "просторова частота" можна пояснити з використанням гармонійної періодичної решітки (рис. 1, а), що аналітично описується наступним чином

$$I(x_{\Theta}) = A \cos\left(2\pi \frac{x_{\Theta} - z}{T}\right),$$

де x_{Θ} – просторова координата; Θ – кут орієнтації зображення; A – амплітуда; z – здвиг; T – період.

Для випадку дифракційної решітки, яка є класичним випадком одновимірного пропускаючого оптичного об'єкту, аналітично функція пропускання описується наступним чином [21]

$$\tau(\xi) = \tau_0 + \tau \cdot \cos \frac{2\pi}{T} \xi,$$

де τ – амплітуда зміни пропускання; ξ – координата у площині об'єкту; τ_0 – середнє амплітудне пропускання.

Якщо узагальнити викладені відомості для двовимірного випадку, то об'єкт слід розглядати як результат накладання синусоїдних решіток з довільною орієнтацією.

Розподіл полю $u(x, y)$ для двовимірного випадку за перерізом світлового пучку можна записати аналітично з використанням Фур'є-образу $F(f_x, f_y)$ цього розподілу [22]:

$$u(x, y) = \iint F(f_x, f_y) \exp[2\pi i(f_x x + f_y y)] df_x df_y,$$

$$F(f_x, f_y) = \iint u(x, y) \exp[-2\pi i(f_x x + f_y y)] dx dy,$$

де f_x – просторова частота за віссю абсцис, f_y – просторова частота за віссю ординат. Оскільки "класичний" спектральний аналіз на базі перетворення Фур'є характеризується низкою обмежень, зокрема "розмазування" спектру за частотною віссю у разі сплесків сигналу, то для аналізу зображень газорозрядного випромінювання було застосовано математичний апарат вейвлет-перетворення [18, 20].

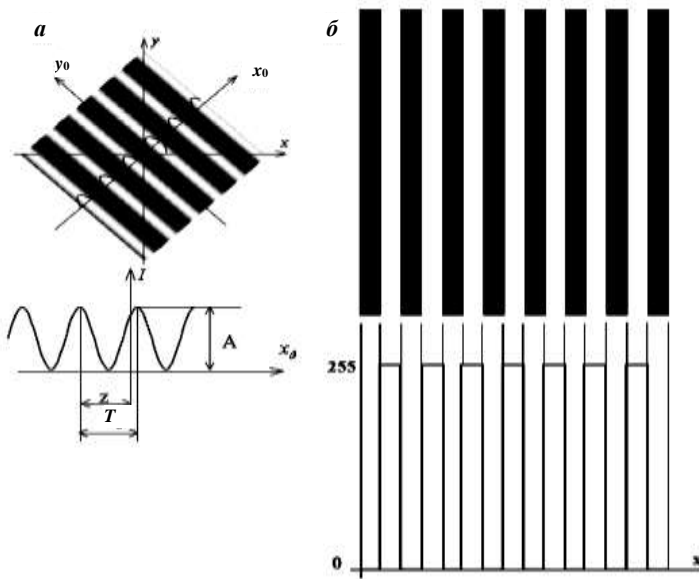


Рис. Періодичні решітки: *a* – гармонійна, *б* – дискретна

Результати та їх обговорення. З метою оцінки характеристик точності вимірювань при розробці метрологічного забезпечення аналізу візуальної інформації зазвичай використовують дискретні форми періодичних решіток (рис. *б*). Процедуру оцінки точності процедури аналого-цифрового перетворення з використанням сканеру планшетного типу розглянемо на конкретному прикладі. У якості тестового об'єкту було використано зображення вертикальної та горизонтальної решітки з шагом 1 мм та товщиною чорних смуг 0,1 мм. Для комп'ютерного аналізу розроблено прикладне програмне забезпечення для виводу на екран зображення тест-об'єкту, профілю яскравості пікселів та детектор гармонік.

Визначення гармонійного складу тест-об'єктів здійснювалося на основі аналізу одновимірного сигналу за профілем яскравості пікселів. У даному випадку профіль будувався як центральний перетин зображення в обраному користувачем напрямку.

Сканування здійснювалося при роздільній здатності сканеру 600 dpi, що відповідає величині 600 ліній / 1 дюйм. Відомо, що 1 дюйм = 25,4 мм.

Таким чином, переходячи до мм: $600/25,4 = 23,6$ ліній/мм, що відповідає просторовій частоті $f_x = \frac{1}{23,6} = 0,0423728 \text{ мм}^{-1} = 42,3728 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$.

Оскільки для тест-об'єктів шаг сітки дорівнював 1 мм, то обчислене число і є дійсним значенням просторової частоти.

Обчислюємо відхилення значень просторових частот, знайдених експериментальним шляхом, у відносній формі від дійсного значення:

а) для горизонтальних смуг

$$\delta_{\%}^h = \frac{f_x^h - f_0}{f_0} \cdot 100\% = \frac{42,2941 \cdot 10^{-3} - 42,3728 \cdot 10^{-3}}{42,3728 \cdot 10^{-3}} \cdot 100\% = -0,18573\%;$$

б) для вертикальних смуг

$$\delta_{\%}^v = \frac{f_x^v - f_0}{f_0} \cdot 100\% = \frac{42,2463 \cdot 10^{-3} - 42,3728 \cdot 10^{-3}}{42,3728 \cdot 10^{-3}} \cdot 100\% = -0,29854\%.$$

Можна зробити висновок, про високу точність відтворення параметру "просторова частота". При роздільній здатності сканеру не менш, ніж 600 dpi, невизначеність вимірювального аналого-цифрового перетворення не перевищує 0,3%.

Висновки. На сучасному етапі розвитку інформаційно-вимірювальних технологій візуалізація перетворилася на невід'ємну складову частину метрологічної практики, що забезпечує найбільш повне джерело якісної та кількісної інформації про об'єкт дослідження. Комп'ютеризовані та інтелектуальні засоби вимірювань ґрунтуються на основі візуальної інформації. Актуальною задачею виявляється розробка метрологічного забезпечення методів вимірювань, заснованих на реєстрації та отриманні інформації візуального характеру.

У роботі наведено конкретні приклади застосування параметру "просторова частота" при вилученні вимірювальної інформації з зображень, кількісно оцінено метрологічні характеристики аналого-цифрового перетворення тест-об'єктів з використанням сканеру. Встановлено, що точність відтворення та визначення просторової частоти цифрових зображень з використанням детектору гармонік достатньо висока.

Список літератури: 1. *Mora-González M.* Image Processing for Optical Metrology / *M. Mora-González, J. Muñoz-Maciel, F.J. Casillas, F.G. Peña-Lecona, R. Chiu-Zarate.* – Rijeka, Croatia, 2011. – 564 p. 2. *Никитаев В.Г.* Автоматизированные системы обработки изображений для метрографического контроля компонентов твэлов ядерных реакторов: автореф. дисс. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 01.04.01 / *В.Г. Никитаев.* – М., 1999. –

48 с. **3.** *Кондратов В.Т.* Визуализация в метрологии: уровни, направления, цели, задачи, методы и программное обеспечение / *В.Т. Кондратов* // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.* – 2011. – № 1. – С. 7-21. **4.** *Білінський Й.Й.* Методи обробки зображень в комп'ютеризованих оптико-електронних системах / *Й.Й. Білінський.* – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 272 с. **5.** Патент на изобретение 2377951 России МПК А 61 В 5/05. Способ определения состояния биологического объекта и устройства для его реализации / *К.Г. Коротков, Р.Р. Юсубов.* – Заявл. 04.01.2008. Опубли. 10.01.2010. – Бюл. № 1. **6.** *Oppenheim A.V.* Signals and Systems, 2nd ed. / *A.V. Oppenheim, A.S. Willsky, S.H. Nawab.* – New Jersey, USA: Prentice Hall Inc. –1997. – 582 p. **7.** *Коротков К.Г.* Основы ГРВ биоэлектродиагностики / *К.Г. Коротков.* – СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2001. – 360 с. **8.** *Романий С.Ф.* Неразрушающий контроль материалов по методу Кирлиана / *С.Ф. Романий, З.Д. Черный.* – Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1991. – 144 с. **9.** *Ignatov I.* Origin of Life and Living Matter in Hot Mineral Water / *I. Ignatov, O.V. Mosin* // *Advances in Physics Theories and Applications.* – 2015. – Vol. 39. – P. 1-22. **10.** *Skarja M.* Indirect instrumental detection of ultraweak, presumably electromagnetic radiation from organism / *M. Skarja, M. Berden, I. Jerman* // *Electro and Magnitobiology.* – 1997. – Vol. 16. – №. 3. – P. 249-258. **11.** *Бондарев В.* Кирлиан-фотография цифровая и традиционная. Некоторые специфические моменты [Электронный ресурс] / *В. Бондарев.* Режим доступа: <http://www.vadimbo.narod.ru/GDV.htm>. **12.** *Атавин Е.Г.* Анализ метрологических характеристик сканера / *Е.Г. Атавин* // *Вестник Омского ун-та,* 2002. – № 2. – С. 35-40. **13.** *Дамдинова Т.Ц.* Способы формирования цифровых изображений и анализ их погрешностей / *Т.Ц. Дамдинова* // *Вопросы кибербезопасности.* – 2014. – № 5 (8). – С. 43-46. **14.** *Polo M.* Estimating the Uncertainty of Terrestrial Laser Scanner Measurements / *M. Polo, A.M. Felicisim, A.G. Villanueva, J. Martinez-del-Pozo* // *Geoscience and Remote Sensing,* 2014. – №.50. – Issue 11. – P. 4804-4808. **15.** *J. de Vicente.* Uncertainty in ellipse fitting using a flatbed scanner: development and experimental verification / *J. de Vicente, A.M. Sánchez-Perez, M. Berzal, P. Maresca, E. Gómez* // *Measurement Science and Technology.* – 2013. – Vol. 25. – №.1. – P. 79-85. **16.** *Глухова Н.В.* Автоматизация обработки изображений излучения жидкофазных объектов с использованием методологии фликкер-шумовой спектроскопии / *Н.В. Глухова, В.И. Корсун, Л.А. Песоцкая* // *Метрологія та прилади.* – 2013. – № 2 (40). – С. 59-63. **17.** *Глухова Н.В.* Розробка методу експрес-оцінки біологічних властивостей води / *Н.В. Глухова* // *Східно-європейський журнал передових технологій.* – 2014. – № 6/5 (72). – С. 18-25. **18.** *Глухова Н.В.* Методи реєстрації та вейвлет-аналізу зображень газорозрядного випромінювання / *Н.В. Глухова, Л.А. Пісоцька* // *Системи обробки інформації.* – 2015. – № 1 (126). – С. 16-19. **19.** *Глухова Н.В.* Метод визначення ступеня когерентності води з використанням методології фліккер-шумової спектроскопії / *Н.В. Глухова, Л.А. Песоцкая* // *Системи обробки інформації.* – 2015. – № 5 (130). – С. 167-171. **20.** *Глухова Н.В.* Применение вейвлет-пакетов для обработки изображений газоразрядного излучения / *Н.В. Глухова* // *International Scientific and Practical Conference World Science: Modern Scientific Achievements and Their Practical Application.* – Issue N. 2. – UAE. – Dubai. – 20-22 October 2014. – P. 21-24. **21.** Энциклопедия физики и техники. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://femto.com.ua/articles/part_2/3141.html. **22.** *Дуда Р.* Распознавание образов и анализ сцен / *Р. Дуда, П. Харп.* – М.: Мир, 1976. – 509 с.

Bibliography (transliterated): **1.** *Mora-González M.* Image Processing for Optical Metrology / *M. Mora-González, J. Muñoz-Maciel, F. J. Casillas, F.G. Peña-Lecona, R. Chiu-Zarate.* – Rijeka, Croatia, 2011. – 564 p. **2.** *Nikitaev V.G.* Avtomatizirovannye sistemy obrabotki izobrazhenij dlja metallograficheskogo kontrolja komponentov tvjeloj jadernyh reaktorov: avtoref. diss. na soiskanie nauchn. stepeni dokt. tehn. nauk: spec. 01.04.01 / *V.G. Nikitaev.* – М.: 1999. – 48 p. **3.** *Kondratov V.T.* Vizualizacija v metrologii: urovni, napravlenija, celi, zadachi, metody i programmnoe obespechenie / *V.T. Kondratov* // *Vimirijsval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah.* – 2011. – № 1.– P. 7-21. **4.** *Bilins'kij J.J.* Metody obrobki zobrazhen' v

комп'ютеризованих оптико-електронних системах / J.J. Bilins'kij. – Vinnicja: VNTU, 2010. – 272 p.

5. Patent na izobrenie 2377951 Rosii MPK A 61 V 5/05. Sposob opredelenija sostojanija biologicheskogo ob'ekta i ustrojstvo dlja ego realizacii / K.G. Korotkov, R.R. Jusubov. – Zajavl. 04.01.2008. Opubl. 10.01.2010. – Bjul. No 1. 6. *Oppenheim A.V.* Signal and Systems, 2nd ed. / A.V. Oppenheim, A.S. Willsky, S.H. Nawab – New Jersey, USA: Prentice Hall Inc., 1997, 582 p.

7. *Korotkov K.G.* Osnovy GRV bioelektrografii / K.G. Korotkov. – SPb.: SPbGITMO (TU), 2001. – 360 p. 8. *Romanij S.F.* Nerazruchajushhij kontrol' materialov po metodu Kirliana / S.F. Romanij, Z.D. Chernyj. – Dnepropetrovsk: izd-vo DGU, 1991. – 144 p. 9. *Ignatov I.* Origin of Life and Living Matter in Hot Mineral Water / I. Ignatov, O.V. Mosin // Advances in Physics Theories and Applications, 2015. – Vol. 39. – P. 1-22. 10. *Skarja M.* Indirect instrumental detection of ultraweak, presumably electromagnetic radiation from organism / M. Skarja, M. Berden, I. Jerman // Electro and Magnitobiology, 1997. – Vol. 16. – №. 3. – P. 249-258. 11. *Bondarev V.* Kirlian-fotografija cifrovaja i tradicionnaja. Nekotorye specificheskije momenty / V. Bondarev. Available at: <http://www.vadimbo.narod.ru/GDV.htm>. 12. *Atavin E.G.* Analiz metrologicheskikh harakteristik skanera / E.G. Atavin // Vestnik Omskogo un-ta, 2002. – № 2. – P. 35-40. 13. *Damdinova T.C.* Sposoby formirovanija cifrovych izobrazhenij i analiz ih pogreshnostej / T.C. Damdinova // Voprosy kiberbezopasnosti, 2014. – № 5 (8). – P. 43-46. 14. *Polo M.* Estimating the Uncertainty of Terrestrial Laser Scanner Measurements / M. Polo, A.M. Felicisim, A.G. Villanueva, J. Martinez-del-Pozo // Geoscience and Remote Sensing, 2014. – №.50. – Issue 11. – P. 4804-4808. 15. *J. de Vicente.* Uncertainty in ellipse fitting using a flatbed scanner: development and experimental verification / J. de Vicente, A. M. Sánchez-Perez, M. Berzal, P. Maresca, E. Gómez. // Measurement Science and Technology, 2013. – Vol. 25. – №. 1. – P. 79-85. 16. *Glukhova N.V.* Avtomatizacija obrabotki izobrazhenij izlucheniya zhidkofaznyh ob'ektov s ispol'zovaniem metodologii flikker-shumovoj spektroskopii / N.V. Glukhova, V.I. Korsun, L.A. Pesockaja // Metrologija ta pryklady. – № 2 (40). – 2013. – P. 59-63. 17. *Glukhova N.V.* Rozrobka metodu ekspres-ocinky biologichnyh vlastivostej vody / N.V. Glukhova // Shidno-evropejs'kij zhurnal peredovyh tehnologij. – № 6/5 (72). – 2014. – P. 18-25. 18. *Glukhova N.V.* Metody reyestraciyi ta vejvlet-analizu zobrazhen" hazorozryadnogo vyprominyuvannya / N.V. Glukhova, L.A. Pesockaja // Systemy obrobky informaciyi. – № 1 (126). – 2015. – P. 16-19. 19. *Glukhova N.V.* Metod vyznachennya stupenya koherentnosti vody z vykorystannyam metodolohiyi flikker-shumovoyi spektroskopiyi / N.V. Glukhova, L.A. Pesockaja // Systemy obrobky informaciyi. – № 5 (130). – 2015. – P. 167-171. 20. *Glukhova N.V.* Primenenie vejvlet-paketov dlja obrabotki izobrazhenij gazorazrjadnogo izlucheniya / N.V. Glukhova // International Scientific and Practical Conference World Science: Modern Scientific Achievements and Their Practical Application. – 2014. – Issue 2. – UAE. – P. 21-24. 21. Jenciklopedija fiziki i tehniki. Available at: http://femto.com.ua/articles/part_2/3141.html. 22. *Duda R.* Raspoznavanie obrazov i analiz scen / R. Duda, P. Hart. – M.: MIR, 1976. – 509 p.

Надійшла (received) 30.06.2015

Статтю представив д-р техн. наук, проф. ДВНЗ "НГУ" Корсун В.І.

Glukhova Natalia, PhD Tech.
State Higher Educational Institution "National Mining University"
Str. K. Marx 19, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49027
tel./phone: (068) 409-32-08, e-mail: GINaVi@ukr.net
ORCID 0000-0003-0817-5465