

# ЕКОЛОГІЯ

УДК 565.7:574.3:004.94

<sup>1</sup>І. М. ГРОД, <sup>1</sup>Л. О. ШЕВЧИК, <sup>2</sup>Н. Я. КРАВЕЦЬ

<sup>1</sup>Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка  
вул. М. Кривоноса, 2, Тернопіль, 46027

<sup>2</sup>ДВНЗ «Тернопільський державний медичний університет імені І. Я. Горбачевського МОЗ України»  
вул. Ю. Словацького, 2, Тернопіль, 46000

## **СПРОБА ПРОГНОЗУВАННЯ ДИНАМІКИ ЧИСЕЛЬНОСТІ ПОПУЛЯЦІЙ АНТОФІЛЬНИХ КОМАХ МЕТОДОМ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

---

Розглянуто алгоритм побудови моделі на основі методу прогнозування Бокса-Дженкінса. Приведено опис критеріїв, що використовуються для створення оптимальної моделі і перевірки її коректної роботи. Значна увага приділяється реалізації алгоритму часових рядів засобами програмування. Для перевірки роботи було використано короткочасний прогноз чисельності антофільних комах суходільних лук Західного Поділля. Для кожної комбінації параметрів використовують функцію SARIMAX з модуля Statsmodels, яка підбирає сезонну модель ARIMA та оцінює її загальну якість.

*Ключові слова:* комахи-антофіли, ентомофільні рослини, популяція, часові ряди, ARIMA- модель, прогнозування, SARIMAX – функція

Екологічна взаємодія рослин і тварин є основою біологічного різноманіття. Значне багатство форм подібної взаємодії у природі чинить відчутний вплив на формування динаміки популяцій і еволюцію видів. Ще на зорі формування еволюційних ідей Ч. Дарвіна, описані ним взаємні адаптації рослин і комах-запилювачів, лягли в основу еволюційної теорії.

У 1964 році, після виходу публікації Paul R. Ehrlich і Peter H. Raven – "Butter flies and Plants: A Study in Coevolution" [27], взаємодія між рослинами і комахами-запилювачами розкривається з точки зору коєволюції. Пошук таких взаємодій поширився на дослідження різних рядів комах, яких було названо антофільними (комахи-запилювачі). Різні аспекти взаємин антофільних комах з ентомофільними рослинами розглядаються в роботах: Е. Грінфельда [3], Е.Тіхменевої [18], К. Феррі Пейла [20], Г. Длуського [5-7], Д. Грицкевича [4], L. Comba [23], S. Corbet [24], В. Мутіна [11], S.Yurtsever [38], В. Хвиря [21], Н. Кравець [9, 10], В. Бровдія [1]. Сучасні дослідження зводяться до вивчення процесів запилення рослин комахами - антофілами, з точки зору фіксації частоти відвідування квітів запилювачами, репродуктивного потенціалу, особливостей функціонування генеративної складової рослин та інше.

Вивчення структури угруповань, де різноманітність видів антофільних комах – важлива складова прогнозу багатства ентомофільних рослин і, навпаки, багатство рослин відповідає за різноманітність комах. Подібна залежність обумовлюється реакцією обох учасників процесу на зовнішні чинники, біотичні, абіотичні та антропогенні навантаження. Вони ж пояснюють значення антофілії, для забезпечення насінневого відтворення рослин. Необхідність врахування

всіх цих факторів обумовлює актуальність питання моніторингу на кожному конкретному етапі моделювання з метою прогнозування стану популяції як рослин, так і комах.

У програмах екологічного моніторингу важливе місце відводиться розробці методів моделювання динаміки популяцій, а також вивченню можливостей оцінювання стану екосистем, угруповань і популяцій за особливостями варіювання чисельності [30]. Аналіз результатів довготривалих спостережень є одним з основних завдань екологічного моніторингу. Найбільш доступною інтегральною характеристикою популяцій є чисельність, з якою тісно пов'язано багато інших параметрів. Тому традиційно в теоретичній і практичній екології питанням вивчення динаміки чисельності приділяється першочергове значення. Проте багато аспектів оцінки та аналізу чисельності популяцій дотепер залишаються дискусійними [31, 32, 33].

Саме тому за умови постійного моніторингу за станом розвитку і динамікою змін та контролю за нормою вилучення особин популяції, а також за умови правильно здійсненого прогнозу популяція може існувати необмежено довго і зберігати свою продуктивність.

Для спроби прогнозування динаміки чисельності популяції антофільних комах було обрано запропоновану Вох-Дженкіс (1976) авторегресійну інтегровану систему зсуву (ARIMA), яка є одним з найбільш класичних методів аналізу часових рядів [2, 13, 26, 28, 35]. Представлена у вигляді порядку зміненого середнього (МА) у поєднанні з порядком авторегресії (AR), модель активно використовується в епідеміології для прогнозування захворювань, а саме лихоманки Денге у Тайланді [34, 36, 37], геморагічної лихоманки [29, 30], а також для прогнозування поведінки мозку - штучних нейронних мереж [22]. Проте, наскільки нам відомо, не використовувалася для прогнозування динаміки антофільних комах.

Метою роботи є побудова та дослідження модифікованої моделі, що відноситься до класу авторегресійних моделей, та вивчення ефекту стабілізації складу популяції в рамках цієї моделі.

### Матеріал і методи досліджень

Матеріалом для дослідження антофільних комах послужили власні збори і спостереження протягом вегетаційних періодів 2000–2017 років на суходільних луках Західного Поділля. Стаціонарними дослідженнями були охоплені околиці м. Тернополя, села Плоске Кременецького р-ну, Сільце Підгаєцького р-ну, Лосяч Борщівського р-ну Тернопільської області, лучні біотопи заповідника «Медобори». Збір, фіксацію та етикетування матеріалу здійснювали за загальноприйнятими в ентомології методами [19]. Спостереження за комахами та їх індивідуальний (ручний) збір на квітах проводили безпосередньо в природних умовах з використанням ентомологічного сачка. Зібрано близько 7,5 тис. особин імаго. Для визначення комах використовували таблиці та статті ентомологів [8, 12, 14, 15, 16, 17, 25].

Для дослідження використано модель ARIMA (модель Бокса-Дженкінса), яка є інтегрованою композицією метода авторегресії (AR) і моделі ковзаючого середнього (МА):

$$Y_t = \varphi_0 + \varphi_1 Y_{t-1} + \varphi_2 Y_{t-2} + \dots + \varphi_p Y_{t-p} + \varepsilon_t - \omega_1 \varepsilon_{t-1} - \omega_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \omega_q \varepsilon_{t-q}$$

де,  $Y_t$  позначає кількість особин популяції в момент  $t$ ,  $Y_{t-1}$  – кількість особин популяції в момент  $t-1$ ,  $Y_{t-p}$  – число особин в момент  $t-p$ ;  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$  – авторегресивні параметри (порядку  $p$ );  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_p$  – ковзаюче середнє значення параметрів (порядку  $q$ ), при визначенні часової серії випадкових даних, або «білий шум» у момент часу  $t$ ,  $\omega_{t-1}$  виражає білий шумовий процес в момент  $t-1$ ,  $\varphi_0$  – константа. «Білий шум» – величина, що відповідає випадковій вибірці з нормальним розподілом, середнім рівним «0» і дисперсією – постійною в кожний період часу. «Білий шум»,  $\omega_{t-1}, \dots, \omega_{t-q}$  вважаються статистично незалежним [2].

Бокс і Дженкінс запропонували виділити клас нестационарних рядів, які через обчислення послідовних різниць можна привести до стаціонарного виду ARMA. Якщо ряд після обчислення  $d$  послідовних різниць зводиться до стаціонарного, то для прогнозування його рівнів можна застосувати комбіновану модель авторегресії і змінного середнього, яка

позначається ARIMA (p, d, q), де p – порядок авторегресії (AR), який дозволяє додати попередні значення часового ряду; d – порядок інтегрування (порядок відмінностей вихідного часового ряду), який додає в модель поняття різниць часових рядів (визначає кількість минулих часових точок, які потрібно викреслити з поточного значення); q – порядок змінного середнього (MA), який дозволяє встановити помилку моделі. Для врахування сезонності використовується сезонна ARIMA (p, d, q) (P, D, Q) s. Тут (p, d, q) – несезонні параметри, описані вище, а (P, D, Q) аналогічні параметри, що застосовуються до сезонної складової часового ряду. Параметр s визначає періодичність тимчасового ряду [35].

При побудові ARIMA (p, d, q) – моделі необхідно прагнути до мінімізації числа її параметрів. Параметри моделі оцінюються на основі коефіцієнтів автокореляції вихідного процесу. Зі збільшенням числа параметрів в моделі для визначення їх значень необхідно використовувати в якості вихідних даних більше число вибірових коефіцієнтів автокореляції, а це погіршить ситуацію, бо тоді точність їх оцінки буде падати.

Задача полягає у визначенні загального виду моделі із класу моделей ARMA з найменшим числом параметрів в порівнянні з іншими можливими варіантами. Цей процес супроводжується процедурами оцінки параметрів альтернативних варіантів моделей і вибору найкращого із них на основі критеріїв якості, які оцінюються за допомогою функції SARIMAX.

Методологія Бокса-Дженкінса підбору моделі для конкретного ряду дослідження складається із чотирьох етапів: ідентифікація моделі, оцінювання, тестування та використання моделі для прогнозування, для програмування використовували Python 3

### Результати досліджень та їх обговорення

Для реалізації моделі ARIMA були взяті дані кількості особин популяції комах антофілів зареєстрованих на ентомофільних рослинах лучних біотопів Західного Поділля. Загалом було зареєстровано 23443 особини комах за період часу з 2000 р по 2017 (табл. 1). За період часу з 2001 по 2007 роки спостерігається значне зменшення кількості зареєстрованих особин на ентомофільних рослинах (з 1520 до 1190 особин). Проте з 2008 року по 2012 рік спостерігається стабілізація кількості антофілів, з незначним зниженням показника у 2011 (1496 особин) та 2012 роках (1432 особин).

Таблиця 1

Динаміка чисельності комах - антофілів досліджуваної популяції (вхідні дані)

Часова позначка (рік)	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Кількість особин популяції (одиниць)	1520	1230	1407	1325	1156	1204	1190	1230	1507	1512	1496	1432	1305	1245	1127	994	1003

В роботі ми спробували спрогнозувати чисельність популяції в умовах нерівномірного розподілу видів і ресурсів, а також провести чисельне дослідження можливих сценаріїв існування виду у заданому інтервалі часу (2000 – 2017 рр.). Для побудови математичної моделі використали вхідні дані наведені у таблиці 1.

Для кожної комбінації параметрів ARIMA (p, d, q) (P, D, Q)s використовуємо функцію SARIMAX з модуля Statsmodels системи програмування, який може підібрати нову сезонну модель ARIMA і оцінити її загальну якість. Після оптимізації гіперпараметрів отримано оптимальну модель ARIMA(0, 1, 1)x(0, 1, 1, 1), яка може здійснювати прогнозування майбутніх даних.

Для прогнозування даних шляхом побудови моделі часових рядів, перш за все необхідно порівняти прогнозовані значення з реальними, що забезпечить точність прогнозів (рис. 1).

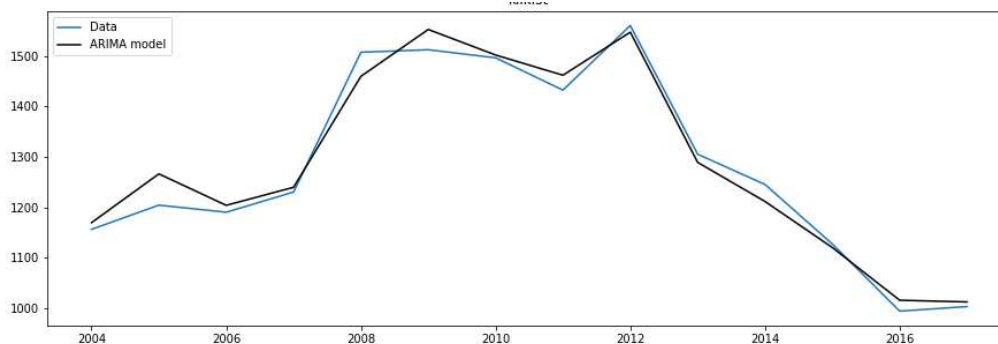


Рис. 1. Співставлення реальних даних з отриманими прогнозами

Співставлення реальних даних з отриманими прогнозами показали, що побудована модель демонструє достатньо схожий результат. Проте в ній не враховані погодні чинники такі як температура, вологість, кількість опадів. У майбутніх дослідженнях плануємо розглянути більш складні методи прогнозування, зокрема гібридні або з кількома моделями, які будуть враховувати ці параметри і забезпечать більш точні прогнози у довгостроковій перспективі.

### Висновки

Обраний нами підхід комп'ютерного моделювання, спрямований на застосування моделей часових рядів ARIMA для прогнозування чисельності, можливий як перша спроба у використанні цієї моделі для дослідження динаміки популяції комах - антофілів. Побудована на основі архівних даних модель може стати важливим інструментом моніторингу та прогнозування біорізноманіття, як комах так і рослин на територіях зі схожими абіотичними і біотичними факторами.

1. Бровдій В.М. Еволюційне вчення: підручник / В.М. Бровдій. — К.: ВЦ „Академія”, 2013. — 336 с.
2. Бокс Дж., Дженкінс Г.М. Аналіз часових рядів, прогноз і управління / Бокс Дж., Дженкінс Г.М. — М.: Мир, 1974. — 406 с.
3. Гринфельд Э. К. Происхождение антофилии у насекомых / Э. К. Гринфельд. — Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1962. — 186 с.
4. Грицкевич Денис Иванович. Экология мух-журчалок (Diptera Syrphidae) Нижнего Приамурья : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. биол. наук / Грицкевич, Денис Иванович. — Ленинград, 1998. — 19 с.
5. Длуский Г. М. Структура коадаптивного комплекса лесных энтомофильных растений с широким кругом опылителей / Г. М. Длуский, Н. В. Лаврова, К. П. Глазунова // Журнал общей биологии. — 2002. — Т. 63. — № 2. — С. 122—136.
6. Длуский Г. М. Механизм конкуренции за опылителей у купыря (*Anthriscussylvestris*) и сныти (*Aegopodium podagraria*) (Ariaceae) / Г. М. Длуский // Журнал общей биологии. — 1998. — Т. 59. — № 1. — С. 24—42.
7. Длуский Г. М. Механизмы ограничения круга опылителей у вересковых (Ericaceae) / Г. М. Длуский, К. П. Глазунова, К. С. Перфильева // Журнал общей биологии. — 2005. — Т. 66. — № 3. — С. 224—238.
8. Ключко З. Ф. Совки України. / Зоя Ключко. — Київ: Видавництво Раєвського, 2006. — 248с.
9. Кравець Н. Я. Місце твердокрилих у процесі перехресного запилення квіткових рослин // Тези доповідей конференції молодих дослідників-зоологів (Київ, 20-21 квіт. 2010 р. ) / Кравець Н. Я.; Інститут зоології. — К., 2010. — С. 66
10. Кравець Н.Я. До вивчення екології антофільних комах Західного Поділля / Н.Я. Кравець // Наукові записки. Серія: Біологія. — 2007. — №1 (31). — С. 59—63.
11. Мутин В.А. Мухи-журчалки (Diptera: Syrphidae) в антофільних комплексах Южного Приморья / В кн.: Систематика и эколого-фаунист. Обзор отдельных отрядов насекомых Дальнего Востока. Владивосток, 1983в. — С. 100—109.
12. Некрутенко Ю. Денні метелики України. / Юрій Некрутенко, Вадим Чиколовець — Київ: Видавництво Раєвського, 2005. — 232 с.

13. Нормативні системи в прогнозуванні розвитку / Л.І.Муратова [і ін.] // Управління системами [Електронний ресурс]: [ Веб сторінка]. — Електронні дані. — 2009, №20. URL: <http://uecs.mcnp.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=145>
14. Определитель насекомых. Европейской части СССР: в пяти томах.. [под. общ. ред. Г. Я. Бей — Биенко] — М. — Л.: Наука, 1978. — (Определитель насекомых. Европейской части СССР). Т.3 Перепончатокрылые ч. 1. / Г. С. Медведев. — 1978. — 584 с.
15. Осичнюк Г. З. Бджолині (Apoidea) правобережного степу України. / Г. З. Осичнюк. — Київ : Вид - во АНУ РСР, 1959. — 390с.
16. Плавильщиков Н. Н. Определитель насекомых. Краткий определитель обычных насекомых европейской части СССР 3 - изд. / Н. Н. Плавильщиков — М.: Гос. учеб.- пед. Изд-во Мин-во. просвещения РСФСР, 1957. — 548 с.
17. Плющ И. Г. Дневные бабочки (Hesperioidea и Papilionoidea, Lepidoptera ) Восточной Европы. / И. Г. Плющ, Д. В. Моргун, К. Е. Довгайло, Н. И. Рубин, И. А. Солодовников — CD определитель, база данных и пакет программ “Lysandra”. — Минск, 2005.
18. Тихменев Е.А. Экология опыления некоторых арктических осоковых (Cyperaceae) /Тихменев Е.А. // Бот. журн. — 1979. —Т. 64, № 2. —С. 247—250.
19. Фасулати К. К. Полевое изучение наземных беспозвоночных / К. К. Фасулати. — М.: Высшая школа, 1961. — 304 с.
20. Фегри К. Основы экологии опыления / Фегри К., Ван дер Пэйл. — Л.; М.: Мир. — 1982. — 379 с.
21. Хвир В.И. Насекомые — посетители соцветий бодяка полевого (Cirsiumarvense (L.) Scop.) в условиях запада центрального района Беларуси / В. И. Хвир // Вестник БГУ. — 2005. — Серия 2. , № 2. — С. 69—72.
22. Collantes-Duarte J., Rivas-Echeverriat F. Time Series Forecas tingusing ARIMA, Neural Networksand Neo Fuzzy Neurons / Collantes-Duarte J., Rivas-Echeverriat F. // WSEAS International Conferenceon Neural Networks and Applications, Switzerland, 2002 [Електронний ресурс]: [ Веб сторінка]. — Електронні дані. — Режим доступу до журн.: 6 р. URL: [www.wseas.us/e-library/conferences/switzerland2002/papers/464.pdf](http://www.wseas.us/e-library/conferences/switzerland2002/papers/464.pdf)
23. Comba L. Flowers, nectar and insect visits; evaluating British plant species for pollinator-friendly Gardens / Comba L., Corbet S. A., Hunt L. et al. // Annals of Botany. — 1999. — Vol. 83, № 4. — P. 369-383.
24. Corber S. A. Butterfly nectaring flowers: butterfly morphology and flower form // Entomologia experimentalis et applicata. — 2000. — Vol. 96, № 3. — P. 289—298.
25. Dąbrowski J., S. Ślimakówki - Cochliidiidae, Kraśniki - Zygaenidae. Klucze do oznaczania owadów Polski / J. S. Dąbrowski, S. Ślimakówki. — Warszawa, 1965. — Cz. XXVII, z. 14 — 15. — 46 s.
26. Day-Ahead Electricity Price Forecasting Usingthe Wavelet Transformand ARIMA Models / A.J. Conejo [atal.] / A.J. Conejo [atal.] // IEEE transaction on power systems. — 2005 — Vol. 20, No. 2. — P. 1035 — 1042.
27. Ehrlich R., Raven Paul & H., Peter. Butterflies and Plants: A Study in Coevolution./ R. Ehrlich, Paul & H. Raven, Peter. // Evolution. —1964. — 18. — P. 586-608. 10.2307/2406212.
28. Extrapolation // The free encyclopedia «Wikipedia» [Електронний ресурс]: [ Веб сторінка]. — Електронні дані. — Режим доступу до журн. URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Extrapolation>
29. Fazidah A, Siregar Forecasting dengue hemorrhagic fever cases using ARIMA model: a case study in Asahan district/ Fazidah A Siregar, Tri Makmur and S Saprin // 4th International Conference on Operational Research (InteriOR). Series: Materials Science and Engineering 300 (2018) 012032 — doi:10.1088/1757-899X/300/1/012032
30. Geisser P.H. Topics in route-regression analysis / P.H. Geisser, J.R. Sauer // Survey designs and statistical methods for the estimation of avian populations trends. - Washington: U.S. Fish and Wildlife service. — 1990. — P. 85—97.
31. Hurvich, C. M. & Tsai, C. L. Regression and time series model selection in small samples./ Hurvich, C. M. & Tsai, C. L. // Biometrika. — 1989. — 76. — P.297—307.
32. James F.C. Methodological issues in the estimation of trends in bird populati ons with an example: the pine warbler / F.C. James, C.E. Mc Culloch. / Distribution, monitoring and ecological aspects of birds . — Voorburg: Heerlen and Sovon, 1994. — 75 p.
33. Kendall M.G. Time series (3rd Ed.) / M.G. Kendall, J.K. Ord.- London: Griffin, 1990. P. 42—46.
34. Mekparyup J. and Saithanu K. , A Seasonal ARIMA Model For Forecasting The Dengue Hemorrhagic Fever Patients In Rayong, Thailand / J. Mekparyup and K. Saithanu // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. — 2015. — Volume 11, (2). — P. 175—181
35. Morariu N. A neuralnetworkmodelfortimeseriesforecasting / Morariu N., Iancu E., Vlad S. // Romanian Journal of EconomicForecasting. — 2009. — No. 4. — P. 213—223.
36. Norizan M. Short Term Load Forecasting Using Double Seasonal ARIMA Model/ Norizan M., Maizah Hura A., Zuhaimy I. // Regional Conferenceon Statistical Sciences, Malaysia, Kelantan. — 2010. — P. 57 — 73.

37. *Siriwan Wongkoon* Development of temporal modeling for prediction of dengue infection in Northeastern Thailand / *Siriwan Wongkoon*, *Mullica Jaroensutasinee*, *Krisanadej Jaroensutasinee* // *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*. — 2012. — Vol. 5, (3). — P. 249—252
38. *Yurtsever S.* What colour of flowers do Lepidoptera prefer for foraging? / *Yurtsever S.*, *Okyar Z.*, *Guler N.* // *Biologia* — 2010. — Vol. 65, № 6. — P. 1049—1056.

*I. M. Grod, L. O. Shevchik, N. Ya. Kravets*

Volodymyr Hnatiuk Ternopil National Pedagogical University, Ukraine

Horbachevsky Ternopil State Medical University, Ukraine

#### THE USE OF COMPUTER MODELING FOR THE PREDICTION OF THE DYNAMICS OF INSECT-ANTHOPHILIAN POPULATIONS

The paper describes the algorithm for constructing ARIMA based on the Box-Jenkins prediction method. The analysis of long-term observation series is one of the main tasks of environmental monitoring. In environmental monitoring programs, an important place is given to the development of methods for modeling population dynamics, as well as exploring the possibilities to assess the state of ecosystems, communities and populations according to the peculiarities of variation in abundance. The most accessible integral characteristic of populations is abundance species, with which many other parameters are closely related.

To test the model, a short-term prediction of the number of anthophilous insects in the dry meadows of West Podillia was used. For each combination of parameters, the SARIMAX function from the statsmodels module is used, which selects the seasonal ARIMA model and assesses its overall quality. In this paper, we tried to predict the population size under conditions of uneven distribution of species and resources, as well as conduct a numerical study of possible scenarios for the existence of a species in a given time interval (2000 - 2017 years).

A description of the criteria used to create the optimal model and verify its correct operation. Considerable attention is paid to the implementation of the time series algorithm using the Python 3 programming language. Seasonal ARIMA (p, d, q) (P, D, Q) s is used to take into account seasonality. Here (p, d, q) are the non-seasonal parameters described above, and (P, D, Q) are similar parameters applied to the seasonal component of the time series. The parameter s determines the frequency of the time series.

The main thing in the selection of time series data in the seasonal ARIMA model is to find the ARIMA value (p, d, q) (P, D, Q) s, which select the best parameter.

The ARIMA model based on archival data can be an important tool for monitoring and predicting biodiversity of both insects and plants in areas with similar abiotic and biotic factors.

*Key words: anthophilous insects, entomophilous plants, population, time series, ARIMA model, prediction, SARIMAX function*

Рекомендує до друку

В. В. Грубінко

Надійшла 04.10.2018