

2. ЕКОЛОГІЯ ТА ДОВКІЛЛЯ



Науковий вісник НЛТУ України
Scientific Bulletin of UNFU

<https://nv.nltu.edu.ua>

<https://doi.org/10.15421/40290612>

Article received 21.06.2019 p.

Article accepted 27.06.2019 p.

УДК 630*26:629.3.015.6:625.163



ISSN 1994-7836 (print)
ISSN 2519-2477 (online)

@ ✉ Correspondence author

M. M. Paslavskiy
mykhaylo.paslavskiy@gmail.com

Т. Г. Бойко¹, М. В. Руда¹, І. Я. Казимира¹, М. М. Паславський², С. О. Соколов³, С. В. Петренко³

¹ Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

² Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

³ Луганський національний університет ім. Тараса Шевченка, м. Старобільськ, Україна

ЗНАЧЕННЯ ЕКОТОНІВ ЗАХИСНОГО ТИПУ У ЗМЕНШЕННІ АКУСТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ШЛЯХАХ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

За результатами аналізу вітчизняних та іноземних літературних джерел запропоновано один із найбільш інноваційних шляхів забезпечення стійкості антропогенно змінених екосистем – створення системи екотонів захисного типу, що дасть змогу забезпечити екологічну безпеку на шляхах залізничного транспорту, використовуючи виключно природні меланізми захисту довкілля. На дослідних ділянках описано таксономічну структуру лісових рослинних угруповань, фітоценологічну активність видів у лісових угрупованнях та розраховано зімкнутість, життєздатність деревостану, а також його проєктивне вкриття. Для визначення шумового ефекту проаналізовано шумопроникність лісових смуг і розсіювання звукових потоків від дії насаджень. На підставі досліджень і розрахунків визначено зону звукової тіні, яка залежить від розмірів перешкоди і довжини звукової хвилі. Акустичний ефект зниження рівня звуку визначають такі чинники, як ширина смуги, дендрологічний склад і конструкція насаджень. За результатами проведеного однофакторного дисперсійного аналізу підтверджено, що досліджувані ділянки колії Львівської залізниці достовірно різняться між собою за цими даними. Результати досліджень також були піддані кореляційному аналізу, розраховано коефіцієнти парної кореляції структурних показників екотонів захисного типу із зниженням акустичного навантаження на ділянках колії Львівської залізниці. Завдяки цьому достовірно встановлено взаємозв'язок з відстанню, горизонтальною зімкнутістю деревного пологую, відстанню між деревами, висотою штамба і щільністю крони. На основі цього розраховано рівняння множинної регресії для комплексної оцінки зниження акустичного навантаження та прогнозування зниження рівня шуму із заданими параметрами екотонів захисного типу.

Ключові слова: екотони захисного типу; лісові угруповання; зімкнутість; життєздатність; шумопроникність; розсіювання звукових потоків; акустичний ефект; коефіцієнт парної кореляції.

Вступ. Шум транспортних засобів є однією з найпоширеніших проблем навколишнього середовища в ЄС, що має негативні наслідки для суспільства (Goines & Nagler, 2007). Шумове забруднення впливає на якість життя людини і стоїть на другому місці після проблеми забруднення повітря (CE Delft, 2007). На сьогодні, за даними ВООЗ, близько 210 млн людей у ЄС регулярно потерпають від впливу транспортного шуму понад 55 децибел.

Здійснено чимало досліджень, в яких порушено питання зниження рівня акустичного навантаження на прилеглі території за допомогою зелених насаджень. У цих роботах вивчено дендрологічний склад, конструкції, схеми посадки і ширину захисної смуги (Berfina, 1986; Volkhovitina, 1977; Osin, 1961; Teygalkov, 1996). Зроблено спроби спрогнозувати рівень шуму за насадженнями (Berfina, 1986; Golosova, 1991), однак ці дані суперечливі. Не висвітлено також питання впливу прос-

Інформація про авторів:

Бойко Тарас Георгійович, д-р техн. наук, професор, кафедра приладів точної механіки. **Email:** tgbo@ukr.net;

<https://orcid.org/0000-0002-0487-3293>

Руда Марія Віталіївна, канд. техн. наук, викладач, кафедра екологічної безпеки та природоохоронної діяльності.

Email: marichkarmv@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-0590-4589>

Казимира Ірина Ярославівна, канд. техн. наук, доцент, кафедра екологічної безпеки та природоохоронної діяльності.

Email: iryna.y.kazymyra@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0003-1597-5647>

Паславський Михайло Михайлович, пров. інженер, кафедра екології. **Email:** mykhaylo.paslavskiy@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0003-1635-4340>

Соколов Сергій Олександрович, канд. с.-г. наук, доцент, кафедра садово-паркового господарства та екології.

Email: sergiysokolov1967@gmail.com

Петренко Сергій Віталійович, канд. біол. наук, доцент, завідувач кафедри садово-паркового господарства та екології.

Email: sergiysokolov1967@gmail.com

Цитування за ДСТУ: Бойко Т. Г., Руда М. В., Казимира І. Я., Паславський М. М., Соколов С. О., Петренко С. В. Значення екотонів захисного типу у зменшенні акустичного навантаження на шляхах залізничного транспорту. Науковий вісник НЛТУ України. 2019, т. 29, № 6, С. 58–66.

Citation APA: Bojko, T. Gh., Ruda, M. V., Kazymyra, et al. (2019). The role of protected type ecotones to reduce acoustic loading on the railways. *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(6), 58–66. <https://doi.org/10.15421/40290612>

торової-функціональної структури захисних насаджень на поширення шуму.

Питання проектування, оптимізації захисту залізничних шляхів від негативних впливів та охорони природи досліджено у наукових публікаціях О. К. Біруля, В. К. Жданюка, С. Г. Миховича, О. О. Догадайла, А. В. Гриценка, В. О. Юрченка, Я. А. Калужького та ін. Проте зазначені дослідження вчених лежать поза площиною обґрунтування захисного лісорозведення на шляхах залізничного транспорту для зниження акустичного навантаження на прилеглі агроценози та селітебні території. Разом з тим Європейська консультативна рада із залізничного транспорту (ERRAC) у 2002 р. поставила мету – до 2020 р. знизити рівень шуму в місцях його виникнення на 20 дБ(А) для вантажних вагонів і на 5 дБ(А) для високошвидкісних поїздів. Саме тому вивчення шумового режиму на шляхах залізничного транспорту є актуальним завданням. Також до сьогодні немає можливості спрогнозувати зниження рівня шуму за насадженнями з різними структурними компонентами на стадії реконструкції і проектування нових захисних лісових насаджень (ЗЛН).

Мета дослідження – оцінити структурні параметри екотонів захисного типу (ЕЗТ) у зменшенні рівня акустичного навантаження на прилеглі агроценози та селітебні території і вивести рівняння, що дають змогу розрахувати його зниження на шляхах залізничного транспорту.

Механізм функціонування ЕЗТ. Сукупність конструкції ЗЛН на залізничних шляхах функціонує як єдина система або лісомеліоративний комплекс, що виконує функції екологічного каркасу, де елементи та підсистеми взаємодіють, забезпечуючи синергійний ефект (Rudishin & Tcarik, 1982). У 1905 р. американський геоботанік і еколог Ф. Клеттсон запропонував біологам та екологам використовувати термін "екотон". Загалом це зафіксовано у наукових комісіях *SCOPE*, де екотон визначено як зону переходу між сусідніми екологічними системами. Аналітичний огляд природознавчих видань з цього питання представлено у працях Т. В. Бобри (Bobra, 2000, 2005), М. Д. Гродзинського (Hrodzynskiy, 2005), П. М. Дем'янчука (Demianchuk, 2011), та Г. І. Денисика (Dydukh, 1982; Копутко, 2009). Однак відсутні дослідження стосовно їх екологічних функцій (Mazing, 1966).

Створення системи ЕЗТ – один із найбільш інноваційних шляхів забезпечення стійкості антропогенно змінених екосистем, зокрема підвищення їх буферності за рахунок часткового відтворення лісових біогеоценозів (БГЦ), які є невід'ємною складовою частиною природних ландшафтів, а також уведення консорцій таких екотонів в інтразональні для них плакорні лісотипологічні умови, що дасть змогу забезпечити екологічну безпеку на шляхах залізничного транспорту (ШЗТ), використовуючи виключно природні механізми захисту навколишнього природного середовища (НПС) (Копутко, 2009; Kushynska, 2010).

Методика проведення дослідження. Вивчення параметрів ЗЛН відбувалося на пробних площах (ПП). Дерева описували за породами та життєздатністю (ЖЗ). Дані підрахунку дерев заносили у спеціальну відомість [17]. Вимірювання діаметрів дерев виконували мірною вилкою. Висоту насаджень визначали екліметром-висотоміром ЕВ-1.

Зімкнутість деревостану на ПП вимірювали лінійним способом. Рухаючись у двох взаємно перпендикулярних напрямках від дерева до дерева за ламаними лініями, вимірювали загальну протяжність ліній (L_1 і L_2) і сумарну протяжність просвітів на цих лініях (l_1 і l_2). При цьому, просвіти всередині крони не враховували. Ступінь зімкнутості деревостану (C_n) виражається у десятих долях одиниці, розраховували за формулою

$$C_n = \frac{(L_1 - l_1) \cdot (L_2 - l_2)}{L_1 \cdot L_2} \quad (1)$$

Якщо показник C_n 1,0–0,9, ступінь зімкнутості оцінюють як високий; значення 0,8–0,6 відповідають середньому ступеню зімкнутості; 0,5–0,3 – зімкнутість низка.

Життєздатність (ЖЗ) деревостану визначали візуально за станом стовбура і крони дерева. Для аналізу обрано шкалу В. А. Алексеєва (Alekseev & Kadyskina, 1977), що містить п'ять категорій. Оцінку ЖЗ деревостану проведено за формулою

$$L_v = \frac{100V_1 + 70V_2 + 40V_3 + 5V_4}{\Sigma V} \quad (2)$$

де: V_1, V_2, V_3, V_4 – запас деревини відповідно здорових, ослаблених, сильно ослаблених і засохлих дерев, m^3 ; 100, 70, 40, 5 – відносне ЖЗ %; ΣV – загальний запас деревини в деревостані, враховуючи запас сухостійних стовбурів, m^3 .

За показника L_v – 100–80 % ЖЗ деревостану оцінюють як здорове, за 7–50 % деревостан вважають ослабленим, за 49–20 % – сильно ослабленим, за 19 % і нижче – повністю зруйнованим (Kabanov, Trus & Tereshkin, 2004).

Таксономічна структура лісових рослинних угруповань ЕЗТ формується під впливом різних чинників і є найпростішою, але об'єктивною, їх характеристикою. Вона віддзеркалює особливості внутрішньої будови, специфічність фітоценозів і умови формування рослинного покриву (Shmidt, 1980). Однією зі складових компонентів, через яку виражають активність виду, є проективне покриття (Dydukh, 1982). У ЕЗТ насадження *Quercus robur* віком понад 50 років, відстань між рядами – 3 м, у ряду – 1 м. Середній діаметр дерев – 16 см, висота – 11 м, щільність – 1008 екз./га, насадження III бонітету. ґрунти – сірий лісовий. ПП трав \approx 5–10 %. Типологічна формула за О. Л. Бельгардом:

$$\frac{ПЧСГ}{Тін(в)III} 10Д.$$

Підлісок включає: *A. tataricum*, *Prunus stepposa* Kottov, *Caragana arborescens* Lam., *L. tatarica*, *G. triacanthos*, *Robinia pseudoacacia* L., *C. fallacina*, *Fraxinus excelsior* L. Щільність підліску 1,8–2,0 особин/100 m^2 .

Видовий склад рослинності на дослідних ділянках виявлено внаслідок оброблення 60 геоботанічних описів. Структурно-порівняльний аналіз флористичного складу ділянок здійснено із застосуванням класифікацій біоморф І. Г. Серебрякова (Serebriakov, 1964), К. Раункієра (Raunkiaer, 1934), лінійної системи життєвих форм В. М. Голубєва, систем екоморф та ценоморф О. Л. Бельгарда.

Фітоценотичну активність видів у лісових угрупованнях розраховували за розробками, запропонованими Я. П. Дідухом (Dydukh, 1982). Трапляння видів визначали за формулою

$$z = \frac{a \cdot 100}{b}, \quad (3)$$

де: z – трапляння видів; a – кількість разів зустрічі виду в описах; b – кількість описів. Згідно зі схемою Я. П. Дідуха, за ступенем постійності види поділено на 5 груп: 1 група містить види, що мають трапляння до 20 %, 2 – 21–40 %, 3 – 41–60 %, 4 – 61–80 % і 5 група – 81–100 %. У деревостанах *Q. robur* простежується тенденція до зменшення кількості видів, але збільшується представництво видів родини *Fabaceae*.

Основні показники великої кількості видів – проективне покриття. Для характеристики надгрунтового покриву використовували шкалу численності Друде: *soc* – дуже рясно, суцільно, частка покриття більш 90 %; *cop1-3* – вид рясний, за величиною кількісно виділяють 3 ступені, частка покриття відповідно: 30–45, 50–65 та 70–85 %; *sp* – вид звичайний, але суцільного покриву не утворює, частка покриття 10–20 %; *sol* – вид росте розсіяно, частка покриття 3–5 %; *un* – вид трапляється один раз, частка покриття 1 %.

Усі отримані дані внесено до таблиці для створення експериментальної бази (Onishhenko, Plakhotnik & Iarishkina, 2003; Tolmachev, 1970).

Для визначення потрібної висоти шумозахисного бар'єра проєктувальники користуються низкою методів, а саме: Маєкави (Engel et al., 1990), Редферна (Transports Terrestres, 1980), Реттінгера (Kamieniecki, 2008), VDI 2720 (1981) та ін. Визначення шумового ефекту передбачає визначення шумопроникності лісових смуг і розсіювання звукових потоків від дії насаджень. Дослідження проводили за допомогою шумоміра-аналізатора спектра, віброметра портативного ОКТАВА-110А. Похибка вимірювань шумоміра в нормальних умовах застосування для плоскої хвилі частотою 1000 Гц і рівнем 94 дБ, що поширюється в опорному напрямку (ортогональному площині мембрани мікрофонного капсуля) в умовах вільного акустичного поля, на характеристиці S не перевищує 0,7 дБА.

Шумомір встановлюють на відстані 1 м від землі із урахуванням рельєфу території. Ділянки для дослідження вибирали тільки рівнинні для запобігання зміні турбулентного режиму. Вимірювання проводили у ЕЗТ у безлистому стані у березні та жовтні та в облистяному стані у травні та серпні. Вимірювання виконували у хмарну погоду.

Заміри рівня звуку проводили на різних відстанях від колії. Було закладено такі пункти спостереження: 2 м від колії – 1 пункт; на відстані 5 м (перед лісосмугою) – 2 пункт; у смузі (на відстані 50 м від колії) – 3 пункт; у смузі (на відстані 100 м від колії) – 4 пункт; у смузі (на відстані 150 м) – 5 пункт та у смузі (на відстані 200 м від колії) – 6 пункт. На рис. 1 відображено схему розміщення шумоміра відносно ділянки колії та ЗЛН.

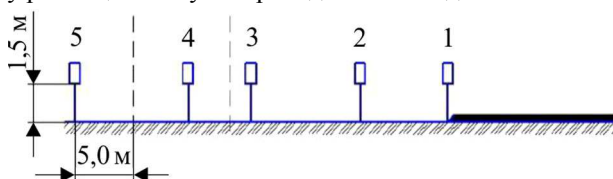


Рис. 1. Схема розміщення шумоміра відносно ділянки колії та ЗЛН: 1) 2 м від колії; 2) 5 м перед ЕЗТ; 3) у ЕЗТ на відстані 50 м від колії; 4) у ЕЗТ на відстані 100 м від колії; 5) за ЕЗТ на відстані 200 м від колії

Також проводили одночасні заміри двома шумомірами-аналізаторами спектра, віброметрами портативними ОКТАВА-110А на відстані 2 м від колії та 200 м від колії для визначення шумопоглинального ефекту ЕЗТ.

Для того, щоб проаналізувати отримані результати, використовували програму *110_UTIL-LIGHT*. Рівень шуму для кожного типу залізничного транспорту на ділянці колії Львів – Стрий визначали на 10-кілометровій зоні, де за нормальних умов швидкість поїздів є незмінною. Вивчали такі джерела акустичного забруднення: електропоїзди, вантажні та пасажирські поїзди. Для отримання об'єктивних результатів брали до уваги стан насаджень, тобто у безлистому та облистяному стані.

Аналіз процесу шумопоглинання за допомогою фітоценозів. Звук поширюється від джерела рівномірно в усі боки, якщо на його шляху немає ніяких перешкод, розмір яких досить великий. Звукові хвилі, як і всякі хвилі, здатні огинати перешкоди, "не помічати" їх, якщо їх розміри менші, ніж довжина хвилі. Довжина чутних у повітрі звукових хвиль коливається від 15 до 0,015 м. Якщо у перешкод на їх шляху менші розміри, наприклад поодинокі стовбури дерев, то хвилі їх просто оминають. Перешкода більших розмірів відбиває звукові хвилі згідно з тим же законом, що і світлові: кут падіння дорівнює куту відбиття.

Для лінійного джерела шуму зниження рівня акустичного навантаження з певної відстані визначають за формулою

$$L_2 = L_1 - 10 \lg \frac{r_2}{r_1}. \quad (4)$$

За умови подвоєння відстані, коли $r_2 = 2r_1$, зниження акустичного навантаження становитиме 3дБ.

Якщо звукова хвиля у відкритому просторі зустрічає досить велику перешкоду, то, за законами геометричної акустики, вона відбивається від перешкоди (кут падіння дорівнює куту відбиття), а за законами дифракції звукова хвиля буде огинати перешкоду, якщо довжина хвилі більша або співрозмірна з розміром перешкоди. Отже, можна зробити висновок, що за перешкодою взагалі не існує зони "звукової тіні". Насправді зона звукової тіні за перешкодою визначається розміром перешкоди і довжиною хвилі. На рис. 2 показано схему утворення звукової тіні за перешкодою при плоских звукових хвилях.

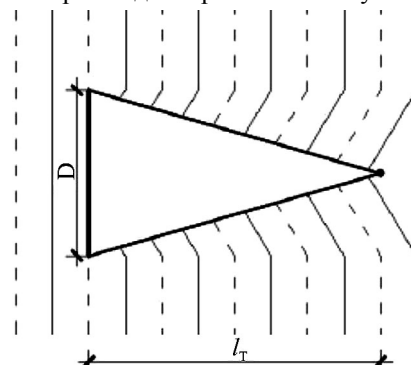


Рис. 2. Схема утворення звукової тіні за перешкодою при плоских звукових хвилях: D – ширина перешкоди; t_n – довжина зони звукової хвилі

Довжину зони звукової тіні t_T за ЕЗТ шириною D можна визначити за формулою

$$t_T = \frac{D^2}{4\lambda}, \quad (5)$$

де λ – довжина хвилі, м. Наприклад, $\lambda = 3,5$ м ($f = 100$ Гц) і $D = 10$ м, то $\ell_T = \frac{10^2}{4 \cdot 3,5} = 7,1$ м.

У вертикальному сиченні зниження рівня звукового тиску ΔL за ЕЗТ висотою H може бути розраховано за формулою

$$\Delta L = \frac{2}{\lambda} \left[R \left(\sqrt{1 + \left(\frac{H}{R} \right)^2} - 1 \right) + \ell_T \sqrt{1 + \left(\frac{H}{\ell_T} \right)^2} - 1 \right], \quad (6)$$

де R – відстань від джерела шуму до ЕЗТ, м. Ця формула дає гарний результат за умови $\ell_T > R > H$.

На рис. 3 показано залежність зниження рівня акустичного навантаження ΔL в дБ від висоти ЕЗТ H .

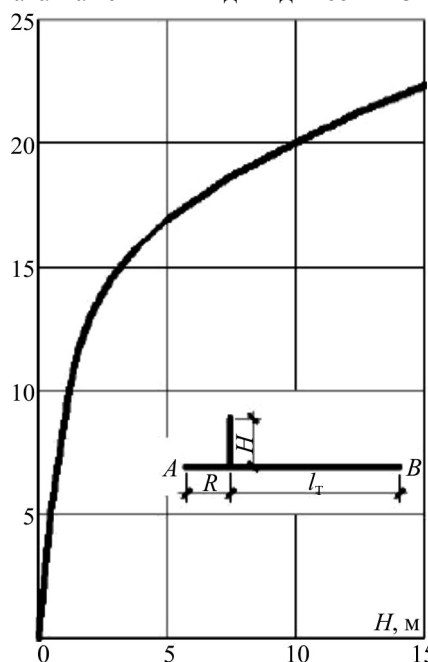


Рис. 3. Зниження рівня акустичного навантаження ΔL в дБ залежно від висоти ЕЗТ H : A – джерело; B – приймач звуку

Як видно з рис. 4, зниження звукового тиску може досягати 20 дБ і більше, що досить істотно. Однак, варто зазначити, що це зниження рівня звукового тиску є додатковим. Для оцінки повного зниження рівня звукового тиску в точці необхідно до ΔL приплюсувати зниження рівня звукового тиску від джерела A на відстані $(R + \ell_T)$, тобто якщо б не було ЕЗТ.

Визначення питомого поглинання звуку ЕЗТ на ділянках колії Львівської залізниці. ЕЗТ знижують рівень шуму на шляхах залізничного транспорту, послаблюючи звукові коливання в момент проходження їх крізь гілки, листя і хвою. Звук, потрапляючи у крону, переходить якби в інше середовище, що має значно більший, ніж повітря, акустичний опір, відбиває і розсіює до 74 % і поглинає до 26 % звукової енергії. Улітку насаджень знижують шум на 7–8 Дб, узимку – на 3–4 Дб (табл. 1).

Дослідження з вимірювання рівня шуму від електропоїздів проводили за умов одного джерела шуму, який рухався зі швидкістю 60 км/год. Дослідження показало, що є незначні відмінності у рівні шуму залежно від стану насаджень. Вимірювання рівня шуму від пасажирських потягів проводили за умов одного джерела шуму, який рухається зі швидкістю 90 км/год. Вимірювання рівня шуму від вантажних потягів проводили за умов одного джерела шуму, який рухався зі швидкістю 90 км/год. Результати наведено в табл. 2.

Табл. 1. Результати вимірювання акустичного забруднення ділянки колії Львів–Стрий

Пункт	Відстань від колії, м	Рівень шуму, дБА	
		Безлистяний стан	Облістяний стан
		Зима (січень)	Літо (липень)
Ліва сторона			
1	2	96,2	95,6
2	50	90,4	89,3
3	150	82,9	79,8
4	200	68,5	65,4
Права сторона			
1	2	97,4	95,1
2	50	91,3	88,0
3	150	83,4	78,6
4	200	69,1	65,7

Табл. 2. Результати вимірювання акустичного забруднення від електропоїздів

Пункт	Відстань від колії, м	Рівень шуму, дБА			
		Безлистяний стан		Облістяний стан	
		Березень	Жовтень	Травень	Серпень
Ліва сторона					
1	2	96,0	96,1	95,5	94,4
2	5	94,3	94,5	93,3	93,4
3	50	90,2	90,3	89,4	89,2
4	100	86,4	86,4	82,2	81,7
5	150	80,3	80,1	78,1	76,9
6	200	71,9	70,6	65,3	66,3
Права сторона					
1	2	95,8	95,6	95,2	95,1
2	5	94,2	94,6	93,3	92,9
3	50	90,3	89,9	88,9	88,6
4	100	85,3	86,9	82,5	82,5
5	150	80,4	79,9	77,6	76,8
6	200	70,8	70,4	67,3	65,7

Паралельне вимірювання рівня акустичного забруднення на ділянці колії Львів – Стрий підтверджує гіпотезу про те, що ЕЗТ виконує роль фільтра шумового забруднення, затримуючи та частково розсіюючи його. Проведені дослідження виявили загальну тенденцію до зниження рівня шуму від усіх дослідних джерел шуму на 20 дБА, що покращує комфорт на прилеглих до залізниці територіях. В облістяному стані КЕЗТ краще виконують роль розсіювача звукових потоків, ніж у безлистяному стані. Коливання рівня шуму залежно від стану насаджень становить 4–6 дБА, що є показником більшої шумопоглинальної ефективності насаджень в облістяному стані (рис. 4).

Ефективність зниження шуму зеленими смугами залежить від їхньої ширини і характеру розміщення (табл. 3).

Табл. 3. Зниження рівнів шуму смугами зелених насаджень

Смуга зелених насаджень	Ширина смуги, м	Зниження рівня шуму, дБА
Однорядна при шаховоподібній посадці дерев усередині смуги	10–15	4–5
Однорядна при шаховоподібній посадці дерев усередині смуги	16–20	5–8,1
Дворядна при відстанях між рядами 3–5 м	21–25	8–10
Дво- або трирядна при відстанях між рядами 3 м	26–30	10–12

Ефективність зниження рівня шуму ЕЗТ визначають на підставі розрахункових схем за формулою, яку запропонували Ф. Майстер і В. Рурберг:

$$L_{\text{эф}} = 10 \cdot \lg \left(\frac{r_1 + \sum_1^i B_1 + \sum_1^i A_1}{r_1} \right) + 1,5z + \beta \sum_1^i B, \quad (7)$$

де: r_1 – відстань від джерела шуму до початку шумозахисної смуги, м; A_i – ширина просівів між смугами зе-

лених насаджень, м; B_i – ширина смуг зелених насаджень, м; z – кількість смуг шумозахисних насаджень;

β – коефіцієнт питомого поглинання звукової енергії. Величину β приймають з табл.

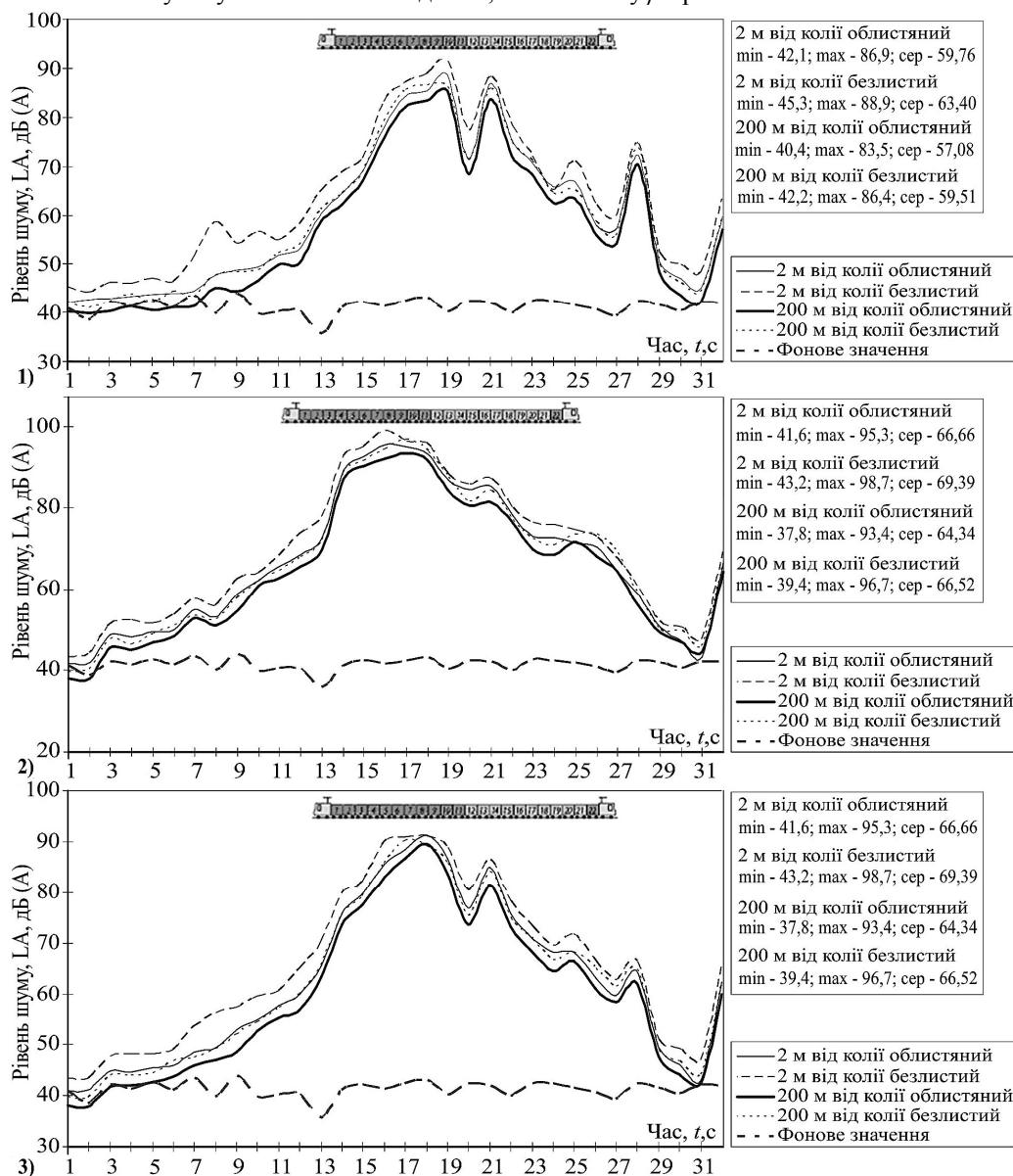


Рис. 4. Рівні акустичного шуму ділянки колії Львів – Стрий: 1) від вантажного потягу; 2) від електропотягу; 3) від пасажирського потягу

Згідно з розрахунковою схемою на рис. 4 і значенням питомого поглинання звуку зеленими насадженнями визначаємо розрахункові елементи. Відстань від джерела шуму до крони першої смуги ЕЗТ дорівнюватиме $r_1 = 0,5 + 1,75 = 2,25$ м, ширина екотонів в ЕЗТ – $B_1 = 0,5 + 1,5 + 3,5 + 2,5 = 8$ м, $B_2 = 2,5 + 3,5 + 3,5 + 1,3 + 0,5 = 11,3$ м, ширина просівів між смугами зелених насаджень $A_1 = 4,5 + 0,7 - 2,5 + 1,0 - 2,5 = 1,2$ м, $A_2 = 1,5 - 0,5 = 1,0$ м, кількість рядів в ЕЗТ $z = 2$ і коефіцієнт питомого поглинання звукової енергії $\beta = 0,15$. Тоді ефективність зниження шуму цієї КЕЗТ дорівнюватиме:

$$L_{ef} = 10 \cdot \lg \left(\frac{2,25 + 19,3 + 2,2}{2,25} \right) + 1,5 \cdot 2 + 0,15 \cdot 19,3 = 16,1 \text{ дБА}.$$

Звукові хвилі, які доходять до ЕЗТ, абсорбуються листям та гілками дерев. Найефективнішими для абсорбції шумового забруднення є ті рослини, які мають товсте листя на тонких гілках. Для отримання помітного шумозахисного ефекту насадження повинні бути густими і мати щільну зелену масу крон дерев і кущів. Акустичний ефект зниження рівня звуку визначають такі

чинники, як ширина смуги, дендрологічний склад і конструкція насаджень. Зелені насадження, сформовані у вигляді спеціальних шумозахисних смуг, можуть давати ефект зниження рівня шуму до 8 дБА. Високий ефект дає посадка завширшки 20 м, зокрема п'ять рядів хвойних дерев і два ряди чагарників. Проте ефективнішою є посадка декількох щільних смуг дерев на такій відстані одна від одної, щоб їх крони не змикалися. У такому випадку кожний ряд дерев із щільною живою огорожею знижує шум на 1–2 дБ, стаючи новою перпоною на шляху його пересування, екрануючи його. Міжрядні простори, вкриті трав'яною рослинністю, також беруть участь в абсорбції звукових хвиль.

Насадження дерев у смузі може бути рядовим або шаховим при відстані між деревами не більше 4 м, висоті дерев не менше 5–8 м, а кущів – 1,5–2,0 м. При цьому шахове насадження ефективніше для зниження шуму. Зелені насадження із хвойних порід ефективніші для шумозахисту порівняно з листяними і не залежать від пори року.

Опис ЕЗТ за структурними показниками. Як видно з рис. 5, рівень шуму, що створюється на шляхах залізничного транспорту, проникає вглиб ЕЗТ неоднаково. Для кожного досліджуваного об'єкта він свій. Тому говорити про те, що зниження шуму пов'язано тільки з відстанню не зовсім коректно.

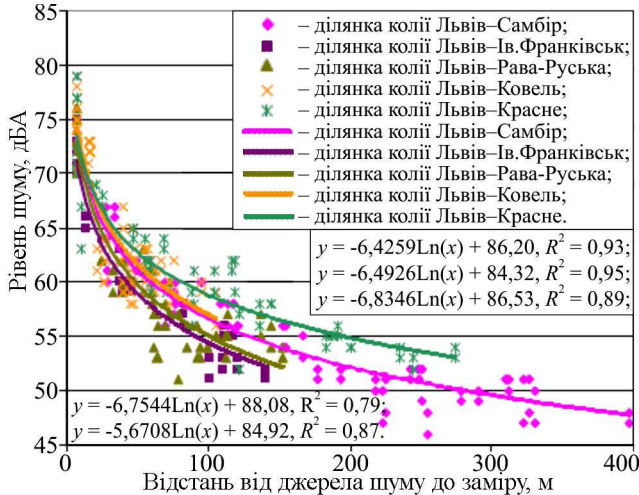


Рис. 5. Залежність рівня шуму від відстані

Для кожної точки фіксації рівня шуму на Львівській залізниці було закладено ПП і зроблено опис ЕЗТ за структурними показниками: зімкнутість деревостану, відстань між деревами, висота штамба, густина крони і

кущів (ділянка ПП у відсотках, займаної нею). Зімкнутість деревостану враховували до точки на цій ПП.

На ділянці колії Львів – Самбір (рис. 6,а) переважають ПП з напіввідкритим типом просторової структури (НТПС), що характеризуються зімкнутістю деревостану від 0,6 до 0,3. Деревя в ЕЗТ розташовані на відстані 3,0 м, висота штамба – 6,0–7,0 м і густина крони – від 60 до 40 %. На ділянці колії розташовані чагарники заввишки 0,5–0,7 м, що займає незначну частину ПП, менше 2 %. Під час опису структурних параметрів ЕЗТ їх не враховували, оскільки знаходяться нижче від висоти вимірювання шуму.

Ділянка колії Львів – Ів.-Франківськ (див. рис. 6, б) характеризується ПП зі закритим типом просторової структури (ЗТПС) і зімкнутістю деревостану від 0,98 до 0,72. Насадження ростуть з відстанню між ними 4,0 і 2,8 м, висотою штамба 5,0 і 8,0 м і густиною крони 60–70 %. Чагарники не траплялися на жодній ПП.

Для ділянки колії Львів – Рава-Руська (див. рис. 6, в) характерна наявність на території ПП чагарників, що закриває підкрановий простір. Зімкнутість деревостану невисока – 0,5–0,2, також трапляються насадження, які характеризуються дуже низькою зімкнутістю деревостану – до 0,14. За висотою штамба і густиною крони можна виділити дві групи: з відстанню 4,0–5,0 м, висотою штамба 2,0–3,0 м і густиною крони 80–70 %; з відстанню 2,5–3,5 м, висотою штамба 3,5–8,0 м і густиною крони 50–60 %.

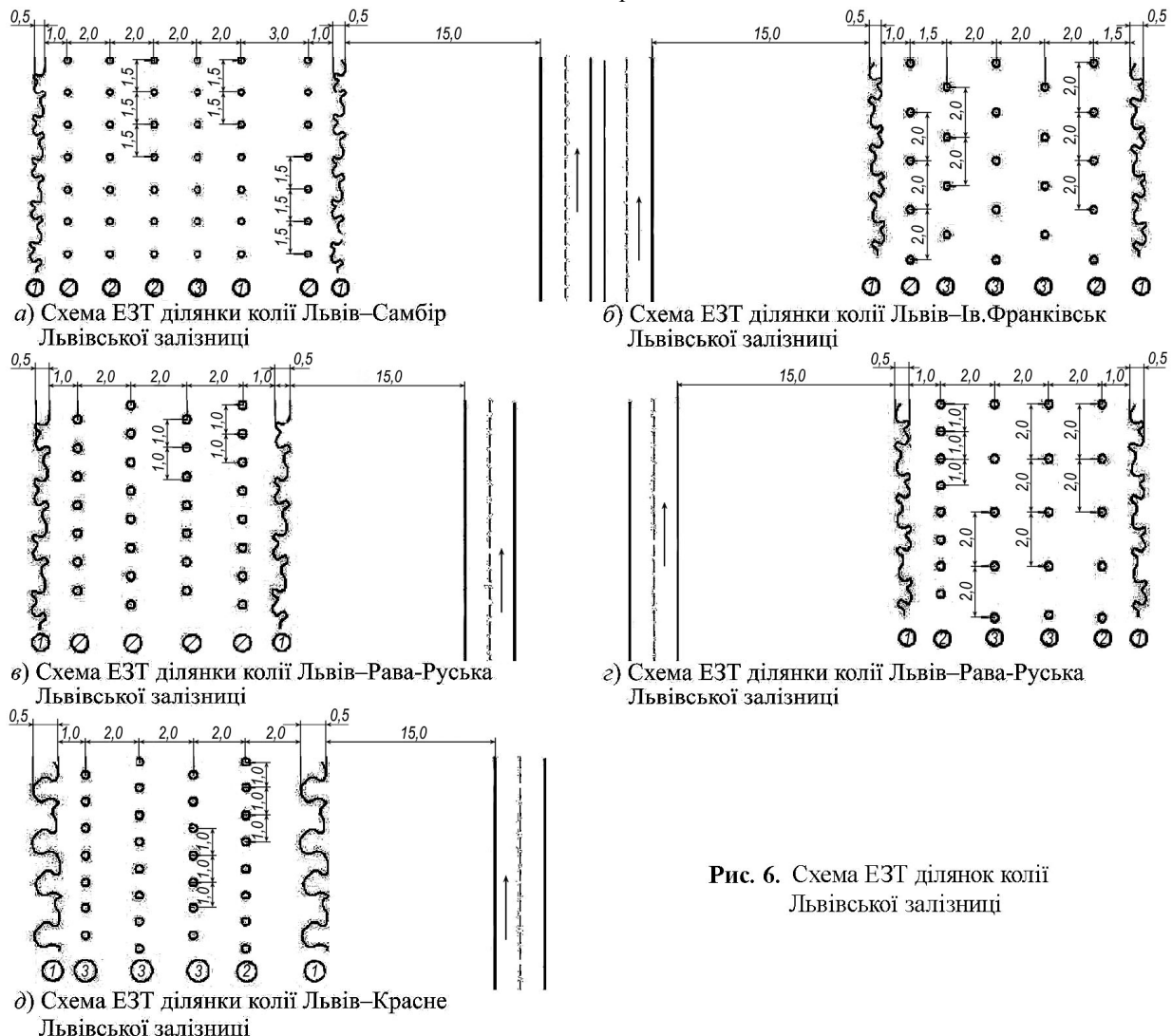


Рис. 6. Схема ЕЗТ ділянок колії Львівської залізниці

Табл. 4. Однофакторний дисперсійний аналіз за рівнем шуму і структурними параметрами ЕЗТ

Джерело варіації	Сума квадратів	Степені свободи	Дисперсія	$F_{роз}$	Ймовірність	F_{st}	Сила впливу чинника
Однофакторний дисперсійний аналіз за рівнем шуму							
Між групами	1057,5	5	211,5	4,19	99,86	2,28	12,80
Всередині груп	7212,1	143	50,4				
Загальна	8269,6	148					
Однофакторний дисперсійний аналіз за повнотою крони							
Між групами	4,37	5	0,87	51,20	99,98	2,28	68,07
Всередині груп	2,05	120	0,02				
Загальна	6,42	125					
Однофакторний дисперсійний аналіз за відстанню між деревами							
Між групами	57,83	5	11,57	31,27	99,98	2,29	56,58
Всередині груп	44,38	120	0,37				
Загальна	102,21	125					
Однофакторний дисперсійний аналіз за чагарниками							
Між групами	489,39	5	97,88	4,93	99,99	2,29	17,03
Всередині груп	2383,97	120	19,87				
Загальна	2873,36	125					
Однофакторний дисперсійний аналіз за висотою штамба							
Між групами	431,28	5	86,26	63,77	99,99	2,29	72,66
Всередині груп	162,32	120	1,35				
Загальна	593,59	125					
Однофакторний дисперсійний аналіз за зімкнутістю деревостану							
Між групами	12684,94	5	2536,99	20,68	99,99	2,29	46,29
Всередині груп	14719,03	120	122,66				
Загальна	27403,97	125					

На ділянці колії Львів – Ковель (див. рис. 6,з), аналогічно, як і для ділянки колії Львів – Рава-Руська, ПП мають невисоку зімкнутість деревостану від 0,58 до 0,24. Деревя ростуть в ЕЗП з відстанню 4,5 м, висота штамба 2,0–2,5 м і висока густина крони 80–90 %. На цій ділянці колії було визначено дві ПП, на яких є чагарники, що закривають підкрановий простір.

На ділянці колії Львів – Красне (рис. 6, д) ПП характеризуються ЗТПС і НТПС із зімкнутістю деревостану від 0,88 до 0,4. За висотою штамба і густиною крони можна виділити дві групи: з відстанню 4,0–4,5 м, висотою штамба 3,5–4,0 м і густиною крони 70 %; крок посадки 3,0–3,5 м, висота штамба 5,0–7,0 м і густиною крони 60–70 %. Ростуть на ділянці колії чагарники, так само як і на ділянці колії Львів – Самбір та мають висоту 0,5–0,9 м.

Для подальшого дослідження впливу структурних параметрів ЕЗП на рівень шуму було проведено лінеаризацію даних відстані.

Однофакторний дисперсійний аналіз за рівнем шуму і структурними параметрами ЕЗТ. У процесі аналізу та узагальнення отриманих результатів з'ясувалося, що із жодного досліджуваного показника на кожній ділянці колії Львівської залізниці не спостерігався чітко виражений зв'язок зі зниженням рівня шуму. За ними досить важко було дати з достатнім ступенем надійності оцінку зниження рівня шуму за структурними складовими ЕЗТ, тому вони окремо для кожної ділянки колії не могли бути рекомендовані в якості діагностичних ознак при доборі ЕЗТ для зниження акустичного навантаження на шляхах Львівської залізниці. Проведений однофакторний дисперсійний аналіз дав змогу підтвердити, що досліджувані ділянки колії Львівської залізниці достовірно різняться між собою за цими даними (табл. 4).

За результатами встановлено, що досліджені ділянки колії Львівської залізниці різняться за рівнем шуму. Для встановлення значень зниження шуму знаходиться різниця між шумом вздовж залізничних шляхів і точкою фіксації рівня шуму за ЕЗТ. Тому необхідна ком-

плексна оцінка зниження шуму на всіх досліджуваних ділянках-колії відповідно до вагомості кожного дослідженого показника.

Кореляційний аналіз структурних параметрів ЕЗТ. Результати дослідження були піддані кореляційному аналізу, розраховані коефіцієнти парної кореляції структурних показників ЕЗТ із зниженням акустичного навантаження на ділянках колій Львівської залізниці. Як видно з цього аналізу, достовірно встановлюється взаємозв'язок з відстанню, горизонтальною зімкнутістю деревного пологую, відстанню між деревами і висотою штамба, щільністю крони (табл. 5). При описі структурних параметрів на пробних площах наявність чагарнику встановлено тільки на відстані не більше 105,0 м. За виконання цієї умови чагарник достовірно пов'язаний зі зниженням шуму.

Табл. 5. Кореляційний аналіз структурних параметрів ЕЗП

Структурний компонент ЕЗП	Коефіцієнт кореляції	Помилка коефіцієнта кореляції	Критерії значущості, розрахунковий	Критерії значущості, табличний
Відстань, м	0,85	0,03	28	1,98
Зімкнутість деревостану	0,43	0,08	5,13	1,98
Відстань між деревами, м	-0,48	0,08	6	1,98
Чагарники (% від S)	0,06	-	-	-
Висота штамба, м	0,48	0,08	6	1,98
Чагарники (відстань 105,0 м)	0,37	0,11	3,36	2,13
Густина крони (%) на відстані до 200,0 м	0,23	0,10	2,1	2,00

Для розрахунку рівняння множинної регресії було відібрано найбільш інформативні, тобто для яких коефіцієнти парної кореляції зі зниженням акустичного навантаження виявилися достовірні (на рівні значущості 0,95).

На підставі цього для цієї сукупності структурних параметрів ЕЗТ розраховано рівняння множинної регресії для комплексної оцінки зниження акустичного навантаження. Єдиний показник, який не враховувався –

це висота штамба, оскільки він тісно пов'язаний з кроком посадки. Як показав кореляційний аналіз, вплив чагарників виявлено тільки при відстані 105,0 м, тому були розраховані коефіцієнти рівняння множинної регресії окремо і для чагарників. Внаслідок отримано два рівняння множинної регресії.

Рівняння для розрахунку зниження шуму має такий вигляд:

$$Y = 5,01X_1 - 2,84X_2 - 1,23X_3 + 0,07X_4 - 5,07, \quad (8)$$

де: Y – зниження рівня акустичного навантаження; X_1 – відстань від джерела шуму до точки фіксації рівня шуму; X_2 – зімкнутість деревостану; X_3 – відстань між деревами, м; X_4 – густина крони, %.

Це рівняння застосовується тільки для розрахунку зниження акустичного навантаження на шляхах залізничного транспорту на відстані не більше ніж на 200,0 м. Оцінки значень коефіцієнтів та їх достовірності наведено в табл. 6.

Табл. 6. Оцінка значень коефіцієнтів та їх достовірності для рівняння розрахунку зниження рівня акустичного навантаження на шляхах залізничного транспорту

Параметр	Коефіцієнт рівняння	Стандартна похибка	Критерій Ст'юдента	Сила впливу чинника, %
Вільний член	-5,07	1,943	-2,61	-
X_1	5,01	0,358	13,99	54,75
X_2	-2,84	0,487	-5,83	31,04
X_3	-1,23	0,264	-4,68	13,44
X_4	0,07	0,018	3,84	0,77
$R^2 = 0,96$ $F = 438,04$ $SE = 1,99$				

Проведені дослідження дали змогу виявити закономірності зниження шуму за рахунок не тільки відстані, але і структурних параметрів ЕЗТ. Найбільш значущі з них виявилися зімкнутістю деревного пологу, крок посадки, чагарник і щільність крони. Розв'язано рівняння множинної регресії, яке дасть змогу прогнозувати зниження рівня шуму із заданими параметрами ЕЗТ.

Висновки. На основі дослідженої системи просторової структури КЕЗТ виокремлено головний принцип створення та функціонування ЗЛН на шляхах залізничного транспорту.

Проведений кореляційний аналіз структурних параметрів ЕЗП із зниженням рівня шуму показав таке: для всіх досліджуваних об'єктів розрахований коефіцієнт кореляції вказує на тісний взаємозв'язок між відстанню від джерела шуму і зниженням шуму ($r = 0,79 \times 0,93$); на ділянках колій Львів – Самбір та Львів – Ковель отримані значення коефіцієнта кореляції ($r = 0,41 \times 0,4$) свідчать про середню залежність між горизонтальною зімкнутістю деревного пологу і зниженням шуму – чим більша зімкнутість деревостану, тим більше зниження шуму. Розрахований критерій значущості коефіцієнта кореляції дорівнює теоретичному, що вказує на істотний зв'язок між досліджуваними ознаками. На ділянках колій Львів – Ковель та Львів – Ів.-Франківськ кореляційна залежність між ознаками слабка ($r = -0,18 \times 0,13$). На ділянці колій Львів – Ів.-Франківськ отриманий $r = -0,61$, тобто чим менша горизонтальна зімкнутість деревного пологу, тим більше зниження шуму. Таке явище пов'язане з тим, що пробні площі, розташовані далі від джерела шуму, характеризуються меншою зімкнутістю пологу, ніж пробні площі, розташовані ближче до джерела шуму; на ділянках колій Львів – Самбір, Львів – Рава-Руська, Львів – Ковель, Львів – Ів.-Франківськ отримані ко-

ефіцієнти кореляції для відстані і зниження шуму ($r = -0,54 \times -0,46$) вказують на середній зв'язок між досліджуваними ознаками. Розраховані критерії значущості коефіцієнта кореляції більше теоретичні, що показує на істотний зв'язок між досліджуваними ознаками. Встановлено, чим менша відстань, тим більше зниження рівня шуму. На ділянці колій Львів – Ів.-Франківськ закладені пробні площі мають однакову відстань між деревами. На закладених пробних площах чагарник виявлено тільки на ділянках колій Львів – Ковель і Львів – Рава-Руська. На ділянці колій Львів – Ковель всього дві пробні площі, на яких траплялися чагарники, тому робити висновки про їх вплив важко. На ділянці колій Львів – Рава-Руська виявлено істотний вплив чагарників на зниження шуму ($r = 0,53$). На пробних площах з чагарниками показники зниження шуму значно вищі, ніж без нього; на всіх досліджуваних об'єктах встановлено зв'язок з висотою штамба і рівнем акустичного навантаження. На ділянках колій Львів – Самбір, Львів – Ковель та Львів – Рава-Руська з допомогою розрахованого коефіцієнта кореляції ($r = 0,6 \times 0,54$) встановлено, що зі збільшенням висоти штамба знижується рівень акустичного навантаження більше. На ділянках колій Львів – Ів.-Франківськ та Львів – Ковель за допомогою коефіцієнта кореляції ($r = -0,41 \times -0,54$) встановлено, що зі зменшенням висоти штамба рівень акустичного навантаження також зменшується; на пробних площах усіх ділянок колій Львівської залізниці, окрім Львів – Самбір та Львів – Ів.-Франківськ достовірно встановлено, що чим вища густина крони, тим більше зниження акустичного навантаження на прилеглі території ($r = -0,56 \times 0,47$). На ділянці колій Львів – Ів.-Франківськ значення показника коефіцієнта кореляції нижче від теоретичного, отже, зв'язок не простежується. На ділянці колій Львів – Самбір коефіцієнт кореляції ($r = -0,52$) вказує на те, що зі зменшенням густини крони зниження акустичного навантаження більше. Але, так само, як і для ділянок колій Львів – Рава-Руська при виявленні взаємозв'язку з висотою штамба і зниженням акустичного навантаження, для точок фіксації рівня шуму, розміщених далі від джерела шуму, пробні площі характеризуються низькою густиною крони. Але, якщо взяти точки фіксації рівня акустичного навантаження приблизно на одноквовій відстані від колій, то взаємозв'язок аналогічний іншим досліджуваним ділянкам колій Львівської залізниці.

За результатами проведеного дослідження виявлено закономірності зниження акустичного навантаження за рахунок не тільки відстані, але і структурних параметрів ЕЗП. Найбільш значущі з них виявилися: зімкнутість деревостану, крок посадки, наявність чагарників і щільність крони. Розв'язано рівняння множинної регресії, яке дасть змогу прогнозувати зниження рівня шуму із заданими параметрами ЕЗП на ділянках колій Львівської залізниці.

Перелік використаних джерел

- Alekseev, S. V., & Kadyskina, E. N. (1977). Mediko-biologicheskije aspekty profilaktiki shumovoi patologii. Zvukopogloshhaiushhie i zvukoizoliruiushhie konstrukcii v praktike borby s shumom, (pp. 4–7). Leningrad: Lenizdat. [In Russian].
- Berfina, G. P. (1986). Shumozashhitnye svoystva zelenykh nasazhdenii i ikh effektivnoe ispolzovanie v konstrukciiah pri magistralnykh posadok v gorodakh Nechernozemnoi zony. *Abstract of Candidate Dissertation for Agricultural Sciences*. Brjansk, 13 p. [In Russian].

- Bobra, T. V. (2000). Ekoton – obekt landshaftovedeniia XXI veka. *Zapiski obshchestva geokologov*, 3, 20–22. Simferopol. [In Russian].
- Bobra, T. V. (2005). K voprosu o poniatiiakh "granitca" – "ekoton" v geografii. *Problemy materialnoi kultury: geograficheskie nauki*, 3, 7–12. Simferopol. [In Russian].
- Bolkhovitina, M. M. (1977). Issledovanie vliianiia zelenykh nasazhdenii na snizhenie shuma gorodskikh territorii. *Abstract of Candidate Dissertation for Agricultural Sciences*. Leningrad, 148 p. [In Russian].
- CE Delft. (2007). *Traffic Noise Reduction in Europe: Health effects, social costs and technical and policy options to reduce road and rail traffic noise*. Retrieved from: www.transportenvironment.org/Publications/prep_hand_out/lid:495.
- Demianchuk, P. M. (2011). Doslidzhennia heohrafichnykh heoekotoniv yak ekoloho-heohrafichna y zahalno-heohrafichna problema. (Ser. Geography). *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho universytetu im. V. Hnatiuka*, 1, 16–21. [In Ukrainian].
- Dydukh, Ya. P. (1982). Problemy aktyvnosti vydiv rastenyi. *Botanical Journal*, 67(7), 925–935. [In Russian].
- Engel, Z., Sadowski, J., et al. (1990). *Révision des niveaux sonores – Guide du Bruit des Transports Terrestres*. Kraków: Wudawnistwo AGH.
- Goines, L., & Hagler, L. (2007). Noise Pollution: A Modern Plague. *Southern Medical Journal*, 100(3), 287–294.
- Golosova, E. V. (1991). Sredobrazuiushhaia rol gorodskikh nasazhdenii raznykh struktur (na primere tsentra g. Moskvy). *Abstract of Candidate Dissertation for Agricultural Sciences*. Moscow, 23 p. [In Russian].
- Hrodzynskiy, M. D. (2005). Piznannia landshaftu: mistse i prostir. (Vol. 2). Kiev: Kiev University, 503 p. [In Ukrainian].
- Kabanov, S. V., Trus, M. V., & Tereshkin, A. V. (2004). *Taksatciia probnykh ploshhadei. Obshhee polozhenie po zakladke probnykh ploshhadei: metod. ukaz. k diplomnomu proektirovaniu dlia studentov (26.04.00 – Lesnoe khoziaistvo)*. Saratov, 72 p. [In Russian].
- Kamieniecki, K. (2008). *Barometr zrownowazonego rozwoju*. Warszawa, 137 p.
- Kopytko, U. (2009). Konsorty Astrantia major L. v Chornohori (Ukrainski Karpaty). (Ser. Biology). *Bulletin of Lviv University*, 51, 89–92. [In Ukrainian].
- Kushynska, M. (2010). Konsortyvna struktura predstavnykiv rodu Gentiana L. u vysokohiri Ukrainskyx Karpat. (Ser. Biology). *Bulletin of Lviv University*, 52, 117–125. [In Ukrainian].
- Mazing, V. V. (1966). Konsortcii kak elementy funktsionalnoi struktury biogeotcnnozov. *Trudy MOIP*, 27, 117–126. [In Russian].
- Onishhenko, Iu. V., Plakhotnik, N. V., & Iarishkina, L. A. (2003). Ekologicheskaia situatciia na Pridneprovskoi zheleznoi doroge. *Railway transport of Ukraine*, 6, 36–38. [In Russian].
- Osin, V. A. (1961). Issledovanie vliianiia zelenykh nasazhdenii na snizhenie shuma v gorodakh. *Abstract of Candidate Dissertation for Technical Sciences*. Moscow, 20 p. [In Russian].
- Raunkiaer, C. H. (1934). *The life forms of plants and statistical plant geography, being the collected papers of C. Raunkiaer*. Oxford: Clarendon Press, 632 p.
- Rudishin, M. P., & Tcarik, I. V. (1982). Struktura individualnykh konsortcii shhavelia alpiiskogo. *Ecology*, 5, 15–22. [In Russian].
- Serebriakov, I. G. (1964). Zhiznennye formy vysshikh rastenii i ikh izuchenie. *Polevaia geobotanika*, 3, 146–205. Moscow – Lviv: Science. [In Russian].
- Shmidt, V. M. (1980). *Statisticheskie metody v sravnitelnoi floristike*. Leningrad: Publishing House of Leningrad State University, 175 p. [In Russian].
- Tcygalkov, V. V. (1996). Otcenka akusticheskikh svoistv zelenykh nasazhdenii v gorodskoi srede. *Abstract of Candidate Dissertation for Agricultural Sciences*. Brjansk, 277 p. [In Russian].
- Tolmachev, A. I. (1970). *Vvedenie v geografiu rastenii*. Leningrad: Publishing House of Leningrad State University, 244 p. [In Russian].
- Transports Terrestres. (1980). *Révision des niveaux sonores – Guide du Bruit des Transports Terrestres*. Nov.
- VDI-2720. (1981). Sshallsschutz dursh Absshirmung im Freien. VDI-Rishtlinien, Juni 1981.

T. Gh. Bojko¹, M. V. Ruda¹, I. Ya. Kazymyra¹, M. M. Paslavskiy², S. O. Sokolov³, S. V. Petrenko³

¹ Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

² Ukrainian National Forestry University, Lviv, Ukraine

³ Luhansk Taras Shevchenko National University, Starobilsk, Ukraine

THE ROLE OF PROTECTED TYPE ECOTONES TO REDUCE ACOUSTIC LOADING ON THE RAILWAYS

According to the results of the analysis of domestic and foreign literary sources, one of the most innovative ways of ensuring the stability of anthropogenically modified ecosystems is proposed, that is the creation of a system of protective type ecotones, which will allow providing ecological safety on the railways using exclusively natural environmental restoration mechanisms. On the experimental areas, we have described the taxonomic structure of forestry groups, phytocoenotic activity of species in forest grouping. We have also calculated the closeness, viability of the tree-stands, and also its projective shelter. To determine the noise effect, the noise-permeability of forest strips and the scattering of sound-currents from planting action have been analyzed. Based on research and calculations, a zone of sound shadow is determined to depend on the size of the obstacle and the length of the sound wave. The acoustic effect of reducing the sound level is determined by such factors as bandwidth, dendrological composition, and design of plantations. The one-factor dispersion analysis allowed confirming that the investigated sections of the tracks of Lviv Railways differ significantly from each other according to these data. The results of the research were also subject to correlation analysis. The coefficients of pair correlation of structural indices of protective type ecotones were calculated with reduction of acoustic load on sections of the tracks of Lviv Railways. Therefore, the interrelation with the distance, the horizontal closure of the tree canopy, the distance between the trees, the height of the shaft and the crown density are reliably established. On this basis, the multiplicity regression equation for complex estimation of acoustic load reduction and prediction of noise reduction with specified parameters of protective type ecotones are calculated.

Keywords: protective type ecotones; forest groupings; closeness; viability; noise-permeability; scattering of sound streams; acoustic effect; coefficient of pair correlation.