



В. В. БОГОМОЛОВ

ПІДХОДИ ДО ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗМІЩЕННЯ ПОЖЕЖНИХ ВЕЖ ЛІСОГОСПОДАРСЬКОГО ПІДПРИЄМСТВА

Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького

У зв'язку з підвищенням рівня пожежної небезпеки в лісах України виникла нагальна потреба в розширенні мережі камер телеспостереження за пожежами. Додаткові телекамери встановлюють із метою підвищення точності визначення координат пожежі, що, зі свого боку, зменшує час мобілізації сил і засобів для її гасіння. Викладено чисельний метод розрахунку видимості камер телеспостереження за пожежами на засадах сферичної геодезії та з використанням відомих алгоритмів опрацювання даних. Надано обґрунтування величини максимальної дальності телеспостереження та висоти підняття диму. Запропоновано підхід до вибору підмножини пожежних веж із загальної множини за умови максимуму видимої площі у найбільш пожежонебезпечних частинах лісових масивів. Показано підхід до виявлення найперспективніших місць для встановлення нових веж або для вибору наявних висотних споруд на цифровій моделі місцевості. Наведені підходи застосовано для двох лісогосподарських підприємств східної України, в результаті чого надано рекомендації щодо розміщення додаткових систем телеспостереження.

Ключові слова: пожежно-спостережна вежа, система телеспостереження, зона видимості, цифрова модель рельєфу.

Вступ. Останнім часом температура повітря на Землі збільшилася на 0,8°C у порівнянні з доіндустріальним періодом (Shvidenko et al. 2018). На тлі потепління клімату в Україні підвищилися кількість і площа пожеж. Так, за період 1981–2010 рр. кількість пожеж на території країни збільшилась у 2,6 рази (Balabukh and Zibtsev 2016). Особливо небезпечним для деяких регіонів України виявився квітень поточного року. За даними, опублікованими на Урядовому порталі (State Forest Resources Agency 2020), з початку року тільки до 13 квітня на території підприємств Державного агентства лісових ресурсів України ліквідовано 772 лісові пожежі на площі 1 505 га.

Серед традиційних заходів мінімізації збитків від пожеж найдієвішим є організація ефективного спостереження за пожежами з використанням пожежно-спостережних веж із метою їхнього раннього виявлення. Існуючі вежі часто оснащують системами телеспостереження. Так, тільки за період 2014–2018 рр. в Київському обласному та по м. Києву управлінні лісового та мисливського господарства облаштовано системами телеспостереження 26 пожежних веж. У зв'язку з підвищенням рівня пожежної небезпеки виникає потреба у встановленні нових веж. Відомі також випадки встановлення систем телеспостереження на вежі операторів стільникового зв'язку та інші висотні споруди. Зокрема, тільки в Луганській області для встановлення трьох телесистем задіяно вежі операторів мобільного зв'язку (Luhansk Regional State Administration 2018). Одну з камер телеспостереження ДП «Вовчанське ЛГ» також встановлено на такій вежі (State Forest Resources Agency 2014).

З необхідністю доповнення мережі пожежних веж стикались і в інших країнах світу. Так, у Баябатському районі провінції Сіноп Туреччини проаналізовано наявну мережу пожежно-спостережних веж і запропоновано новий варіант їхнього розміщення з вилученням неефективних і залученням нових веж (Kucuk et al. 2017). Видимість розраховували за умови висоти підняття диму 90 м. У результаті новий варіант мережі пожежних веж дає змогу збільшити площу спостереження на 8 %.

Метою досліджень був пошук підходів для оцінювання ефективності мережі пожежних веж підприємств лісового господарства, облаштованих системами телеспостереження, та надання рекомендацій щодо її розширення.

Матеріали й методи. Для виконання аналізу наявних мереж пожежних веж і планування їхнього розширення автором було спеціальне програмне забезпечення мовою програмування C# FireWatch, в основі якого лежить обчислювальний апарат сферичної

геодезії (Seeber 2003) та деякі відомі алгоритми оперування даними (Knuth 2011). Вихідною інформацією для виконання розрахунків були цифрові моделі рельєфу (ЦМР), дані лісовпорядкування ВО «Укрдержліспроект» (таксаційні та картографічні) та дані щодо розміщення наявних пожежних веж.

Ефективність мережі пожежних веж оцінювали за допомогою чисельного значення їхнього покриття. Під покриттям вежі розуміли певну площу або набір комірок ЦМР, які видно з вершини вежі без перешкод. Відповідно 2-разове або 3-разове покриття – це площа, яку видно одночасно з двох або трьох веж. На площі з одноразовим покриттям є можливість визначення місця займання тільки з однієї вежі і, як наслідок, – визначити лише напрям до пожежі, без точних її координат. На площі з дворазовим покриттям з'являється можливість визначити координати місця загоряння за винятком тих випадків, коли загоряння сталось у створі між вежами. Площа триразового покриття гарантує точне визначення координат місця загоряння без винятку. За збільшення кількості камер, які можуть фіксувати пожежу, зменшується ймовірність слідкування за розвитком пожежі проти сонця або в умовах атмосферного задимлення.

Дані лісовпорядкування

Для оцінювання ефективності мережі пожежних веж дуже важливо встановити ту частину території лісгосподарського підприємства, яка є найпріоритетнішою для спостереження. Особливо таке обмеження території нагляду є актуальним в умовах недостатнього фінансування та неможливості охоплення наглядом усієї території підприємства. Насамперед потрібно забезпечити спостереженням території з першим і другим класами пожежної небезпеки. Це зумовлюється тим, що виникнення пожеж на таких лісових ділянках можливе впродовж усього пожежонебезпечного періоду.

Для встановлення меж території спостереження та визначення класів пожежної небезпеки використано таксаційні дані та цифрові картографічні дані лісовпорядкування для ДП «Кролевецьке ЛМГ» за 2016 р. та ДП «Ізюмське ЛГ» за 2010 р. Розрахунок класів пожежної небезпеки проводили на основі алгоритму, викладеного у роботі (Polupan et al. 2011). Розрахунки класів пожежної небезпеки свідчать, що загалом ділянки з першим і другим класами пожежної небезпеки становлять 65 та 53 % від площ ДП «Ізюмське ЛГ» та ДП «Кролевецьке ЛМГ» відповідно (табл. 1, 2).

Таблиця 1

Розподіл площ за класами пожежної небезпеки у ДП «Ізюмське ЛГ»

Код	Назва	Площі за класами пожежної небезпеки, га					Середній-зважений клас пожежної небезпеки	Загалом, га
		1	2	3	4	5		
1	Артемівське	1 147,2	2 728,8	755,1	940,2	539,7	2,5	6 111,0
2	Завгороднівське	1 597,4	1 297,4	353,0	1 511,3	821,9	2,8	5 581,0
3	Ізюмське	2 484,1	2 658,7	338,4	383,8	495,0	2,0	6 360,0
4	Червонооскільське	3 735,5	1 204,3	978,7	356,1	401,5	1,9	6 676,1
5	Піщанське	2 144,3	2 566,4	951,5	470,9	834,9	2,3	6 968,0
6	Петрівське	1 698,6	1 022,7	234,1	1 057,3	694,2	2,6	4 706,9
7	Придонецьке	1 921,7	2 852,7	798,0	1 488,5	826,1	2,5	7 887,0
8	Студенецьке	2 547,9	2 080,2	849,8	375,1	489,0	2,1	6 342,0
9	Барвінківське	673,0	121,3	1 197,1	85,5	327,1	2,7	2 404,0
Загалом		17 949,7	16 532,5	6 455,7	6 668,7	5 429,4	2,3	53 036,0

З іншого боку, в кожному з цих підприємств є по одному лісництву з незначною площею лісів першого та другого класів пожежної природної небезпеки. Це Барвінківське і Ярославське лісництва, в яких площі першого і другого класів становлять 33 і 4 % від площ лісництв відповідно. Ці лісництва надалі були виключені з розрахунку. Решту ділянок із першим і другим класами пожежної небезпеки поєднували у збірні полігони.

Розподіл площ за класами пожежної небезпеки у ДП «Кролевецьке ЛМГ»

Код	Назва	Площі за класами пожежної небезпеки, га					Середній-зважений клас пожежної небезпеки	Загалом, га
		1	2	3	4	5		
1	Хрещатицьке	2 464,7	875,6	1 004,1	701,4	192,7	2,1	5 238,5
2	Гружчанське	745,9	1 807,7	963,6	693,8	161,8	2,5	4 372,8
3	Дубовицьке	1 829,2	1 950,5	573,0	85,1	86,2	1,8	4 524,0
4	Кролевецьке	270,1	1 211,2	1 837,8	194,1	75,8	2,6	3 589,0
5	Ярославецьке	44,0	83,2	3 266,6	95,9	100,3	3,0	3 590,0
Загалом		5 353,9	5 928,2	7 645,1	1 770,3	616,8	2,4	21 314,3

За умови розрахунку видимості пожежної вежі на основі ЦМР, створеної по поверхні лісових насаджень, виникає необхідність врахування висоти деревостану. На рисунку 1 бачимо профіль рельєфу, що проведено через протипожежні розриви за даними ЦМР ALOS. У разі виникнення пожежі всередині розриву дим має піднятися на висоту 19 м, як це видно з профілю, перш ніж його помітить спостерігач. Саме такою є висота насаджень у виділі 12 кварталу 524 і за даними таксації.

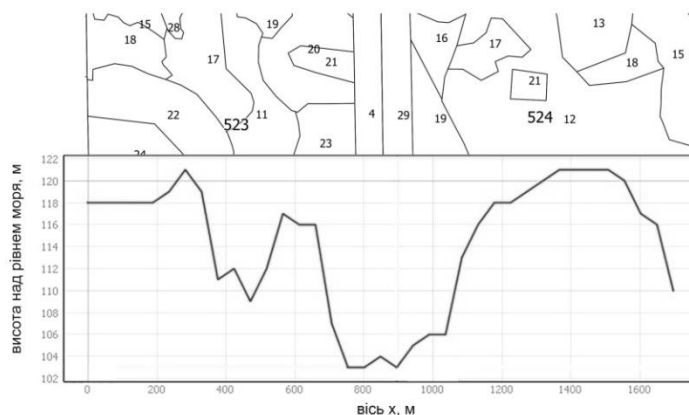


Рис. 1 – Профіль рельєфу, що проведено у кварталах 523, 524 Піщанського лісництва за ЦМР супутника ALOS

Висота деревостану переважної більшості соснових насаджень ДП «Ізюмське ЛГ» (57 %) становить 17–25 м (рис. 2). У ДП «Кролевецьке ЛМГ» 67 % соснових насаджень мають деревостан висотою 19–30 м. Ці результати розподілу висот дають можливість для подальших розрахунків покриття вежі встановити висоту підняття диму 21 м для ДП «Ізюмське ЛГ» і 25 м для ДП «Кролевецьке ЛМГ».



Рис. 2 – Частотний розподіл висот (вісь абсцис) соснових насаджень у ДП «Ізюмське ЛГ»

ЦМР дає відповідь на те, якою є абсолютна позначка поверхні Землі в точці із заданими координатами. Фактично ЦМР – це двовимірна матриця з певною кількістю рядків і стовбців, яка відповідає частині земної поверхні. Кожна комірка такої матриці має однакову ширину і довжину з власними координатами центру й значенням висоти.

Використовували два типи ЦМР:

- побудовані на основі топографічної карти;
- готові ЦМР, які є результатом виконання глобальних міжнародних програм.

ЦМР першого типу будують за даними позначок висот за допомогою таких програмних засобів, як Surfer (Golden Software 2017). Вона вирізняється відсутністю лісового покриву. У наявності є вихідні дані в цифровому вигляді (горизонталі та позначки висот) у масштабі 1 : 200 000. У цьому дослідженні таким чином побудовано ЦМР території ДП «Ізюмське ЛГ» (рис. 3).

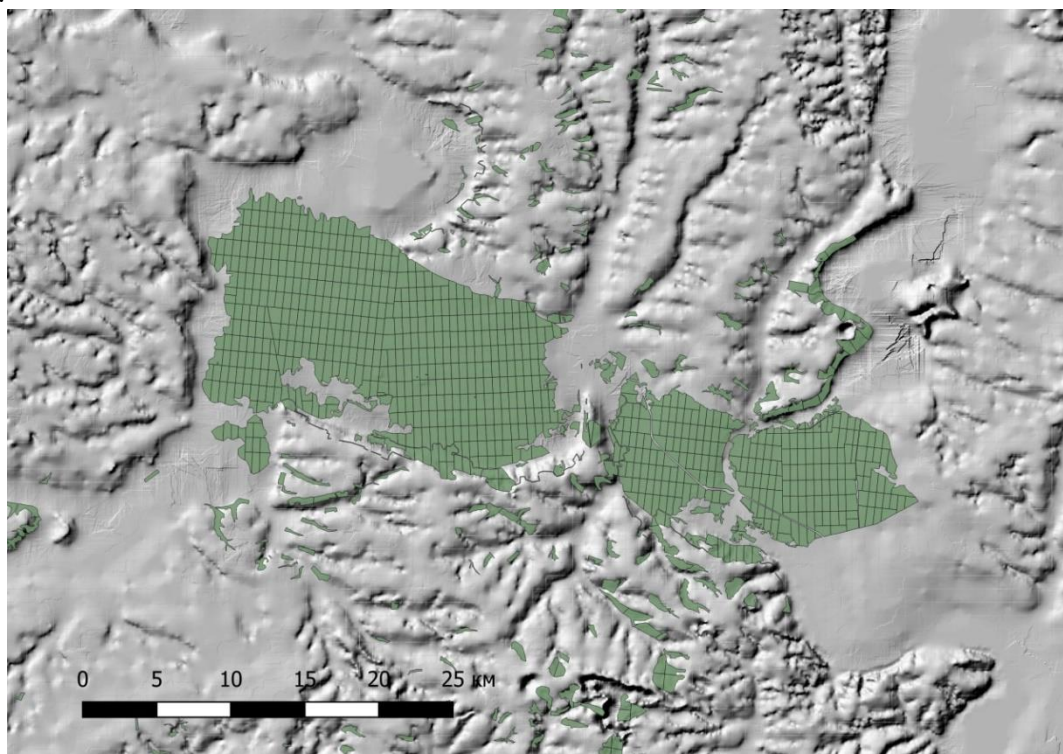


Рис. 3 – ЦМР ДП «Ізюмське ЛГ», побудована на основі топокарти масштабу 1 : 200 000

ЦМР другого типу створювали в рамках міжнародної програми SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) за допомогою радіометра ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) та супутника ALOS (Advanced Land Observation Satellite). Ці дані застосовують для вирішення, зокрема, завдань з охорони навколишнього середовища (Courty et al. 2019). Дані цих супутників можуть бути завантажені на безоплатній основі у вигляді файлів формату GeoTIFF практично для будь-якої частини земної поверхні.

У цьому дослідженні використано два фрагменти ЦМР супутника ALOS на території обох лісогосподарських підприємств.

Встановлення покриття однієї вежі.

Площа території, яку буде видно з однієї вежі, визначається насамперед її висотою. За умовно плаского рельєфу дальність спостереження d може бути розрахована за формулою визначення відстані до видимого горизонту (1):

$$d = \sqrt{(R + h)^2 - R^2}, \quad (1)$$

де R – радіус Землі – 6 371 000 м, h – висота вежі, м.

Так, за висоти вежі 35 м ця відстань становитиме 21 118 м.

В умовах перетнутої місцевості частина території може бути невидимою для спостерігача навіть на відстані, яка менша, ніж відстань до горизонту. Тобто потрібно врахувати й кривизну форми Землі, і рельєф її поверхні.

Припустимо, що ми маємо для кожної комірки ЦМР геодезичні координати L, B, H (довготу, широту та висоту). Далі виконаємо перехід до прямокутних просторових координат за формулами (2–4):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N + H) \cdot \cos B \cdot \cos L \\ (N + H) \cdot \cos B \cdot \sin L \\ (N \cdot (1 - e^2) + H) \cdot \sin B \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 B}}, \quad (3)$$

$$e = \frac{a^2 - b^2}{a^2}, \quad (4)$$

де a – велика піввісь, а b – мала піввісь земного еліпсоїда.

З прямокутних просторових координат переходимо до нормальної земної системи координат (рис. 4), яку, зокрема, використовують для навігації повітряних об'єктів радіолокаційними станціями (Bogachev et al. 2018). У закордонній літературі ця система координат згадується як local ellipsoidal system (Seeber 2003).

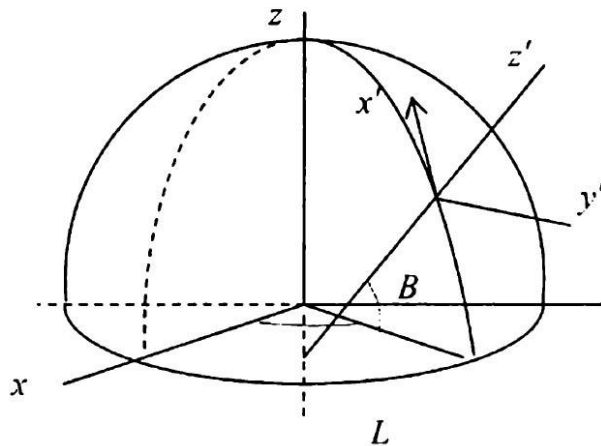


Рис. 4 – Нормальна земна система координат на поверхні еліпсоїду

Початок системи знаходиться у деякій точці на висоті H від поверхні еліпсоїда. Вісь z' розташована на продовженні нормалі до поверхні еліпсоїда в цій точці та орієнтована в бік підвищення висот. Вісь x' спрямована в бік збільшення довгот, а вісь y' співпадає з дотичною до меридіана в цій точці та спрямована в бік осі обертання еліпсоїду.

Для переходу від прямокутної просторової до нормальної земної системи використовують такі перетворення. Припустимо, що точка спостереження (у контексті теми статті це – вершина вежі) представлена координатами $\{X_0, Y_0, Z_0\}$, а точка, яку спостерігають, – $\{X_1, Y_1, Z_1\}$. Тоді перетворення координат обчислюють за формулою:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin L_0 & \cos L_0 & 0 \\ -\sin B_0 \cdot \cos L_0 & -\sin B_0 \cdot \sin L_0 & \cos B_0 \\ \cos B_0 \cdot \cos L_0 & \cos B_0 \cdot \sin L_0 & \sin B_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 - X_0 \\ Y_1 - Y_0 \\ Z_1 - Z_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

На рис. 5 проілюстровано тривимірну модель рельєфу в нормальній земній системі координат із профілем завдовжки 60 км, що проходить через початок координат на вершині пожежної вежі заввишки 35 м.

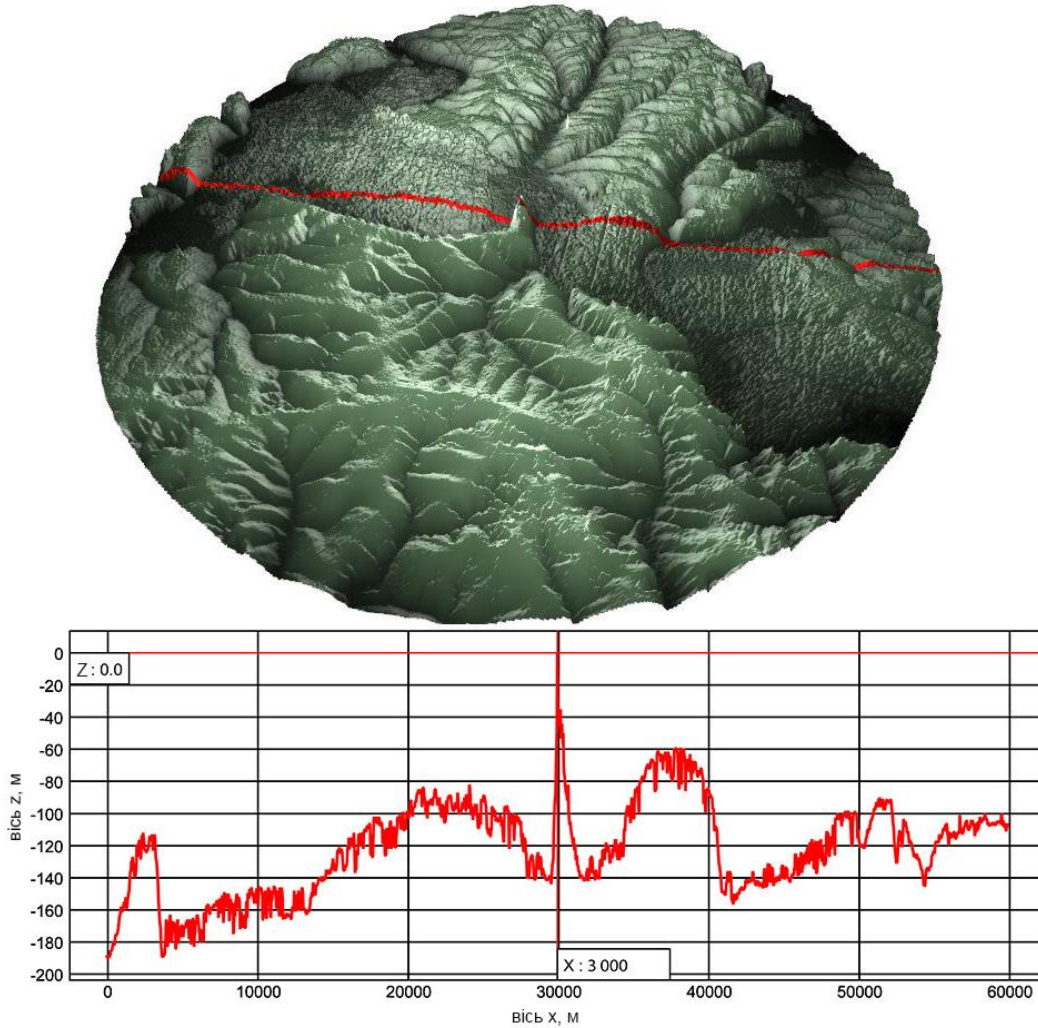


Рис. 5 – Зображення рельєфу в нормальній земній системі координат із профілем, що проходить через вершину вежі

Далі переходимо до визначення видимості комірок ЦМР у нормальній земній системі координат із початку координат, тобто з вершини вежі. Для кожної комірки з'єднуємо її центр $P(x,y,z)$ із вершиною вежі $T(0,0,0)$ (рис. 6). Далі вздовж відрізка CP відшукуємо послідовно комірки згідно з алгоритмом Брезенхейма (Rogers 1989). Якщо висота комірки в точці $B_2(x_2,y_2,z_2)$ виявляється вищою за допустиму ($z_2 > z_1$), то тестування зупиняють, а комірку з центром $P(x,y,z)$ фіксують як невидиму для прямого спостереження з точки T . Якщо не знайдено жодної комірки, де виконується умова $z_2 > z_1$, то комірка $P(x,y,z)$ вважатиметься видимою.

Порогове значення z_1 розраховують таким чином: $z_1 = -TA$, $z = -TC$. Трикутники TAB і TCP подібні. У подібних трикутників відношення однакових сторін зберігаються, тобто $\frac{TA}{TC} = \frac{AB_1}{CP}$, звідси $TA = \frac{TC \cdot AB_1}{CP}$. Кінцева формула обчислення порогового значення (6):

$$z_1 = z * \frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (6)$$

Додатково враховують коефіцієнт рефракції атмосфери k_r (Brunner 1984) за формулою (7):

$$z_{act} = z_1 + \frac{CP^2}{D_E} * k_r, \quad (7)$$

де D_E – це діаметр Землі – 12 742 000 м, а CP – відстань від вежі до комірки, м (рис. 6).

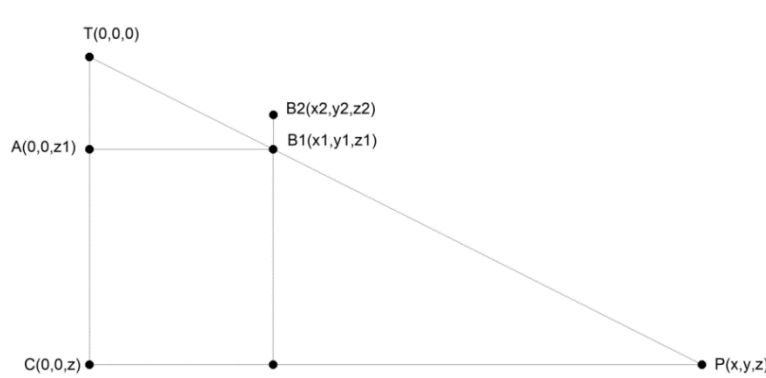


Рис. 6 – Креслення для розрахунку висоти допустимої перешкоди z_1

Для прикладу проведено розрахунок покриття вежі заввишки 35 м на горі Кременець (рис. 7).

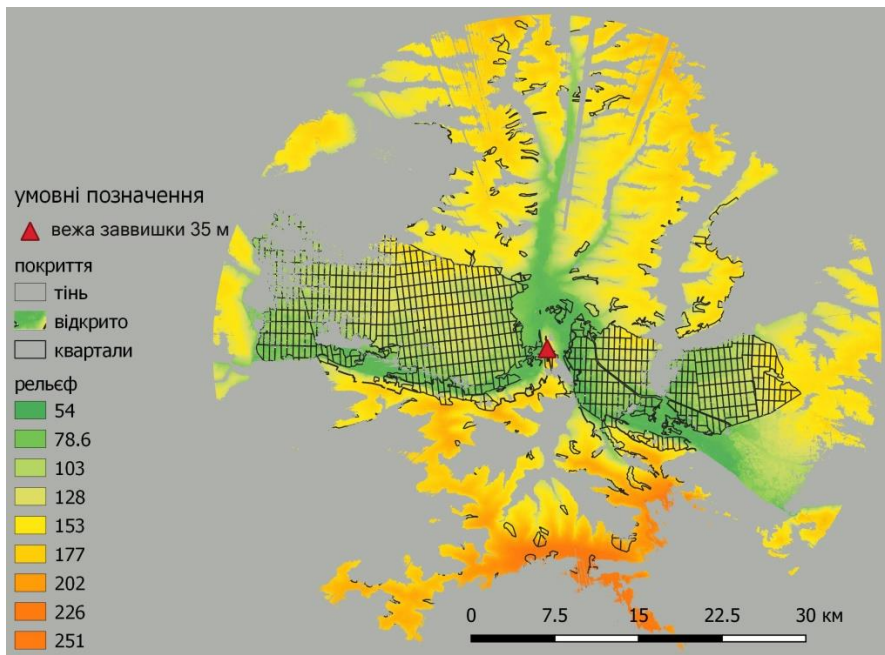


Рис. 7 – Покриття вежі заввишки 35 м на горі Кременець у м. Ізюм

Максимальна дальність спостереження

Дальність спостереження обмежується такими факторами:

- дальність горизонту;
- рефракція атмосфери;
- рельєф поверхні;
- технічні особливості системи телеспостереження;
- атмосферні явища (туман, задимлення).

Вище зазначено, що дальність горизонту з висоти 35 м за умов плаского рельєфу становить 21 км, але ця відстань може перевищувати 30 км, якщо вежу встановлено в оптимальному для спостереження місці (див. рис. 7).

Завдяки рефракції атмосфери об'єкти, які знаходяться на певній відстані від точки спостереження, можуть як підвищуватися, так і знижуватися відносно розрахункової висоти. Згідно з формулою (7) за стандартного коефіцієнта рефракції 0,13 на відстані 10 км поправка становитиме 1 м. Тобто висота об'єкта спостереження буде на 1 м вищою за істинну. Коефіцієнт рефракції може значно змінюватися влітку протягом дня. Так, дослідження впливу рефракції на точність геодезичних вимірювань у приземному шарі повітря, які проводили влітку 2008 р. в Німеччині неподалік від Гамбургу (Hirt et al. 2010), показали коливання коефіцієнта рефракції від -4 до 16 в сонячні літні дні. За критичної рефракції, коли радіус кривизни світлового променя дорівнює радіусу Землі, коефіцієнт рефракції становить 1,0, а поправка на висоту об'єкта на відстані 10 км – 7,8 м. За негативних коефіцієнтів рефракції, які існують вранці, об'єкти спостерігаються на висоті, нижчій за істинну. Відповідно горизонт наближається, і площа спостереження з вежі зменшується.

Існують також певні технічні особливості експлуатації системи телеспостереження, які впливають на максимальну дальність виявлення об'єктів певного розміру. Так, у 1984 р. визначено, що за допомогою телевізійних установок ПТУ-59 виявлення шлейфу диму заввишки 15 м можливе з відстані 13,4 км (Orlov 1986). Зараз оптичні можливості систем телеспостереження значно поліпшились. Наприклад, доволі поширеними є об'єктиви, які мають максимальну фокусну відстань 130 мм і роздільну здатність 1920×1080 (Full HD). За таких параметрів вертикальний кут огляду становить 1,3°, що на відстані 20 км охоплюватиме поле зору заввишки 454 м, а один піксель відповідатиме $454/1080 = 0,42$ м. У вищезгаданій статті вказано, що для розрізнення об'єкта необхідно 5 пікселів, зокрема диму. Це означає, що за максимальної фокусної відстані 130 мм на відстані 20 км можна розрізнити дим заввишки 2 м. Водночас для підвищення частоти огляду території телеспостереження ведеться за вертикальних кутів огляду близько 30°, що зменшує максимальну дальність спостереження проти можливої.

Димка або туман також зменшують дальність телеспостереження.

Досвід телеспостереження за пожежами на півночі Київської області свідчить, що середня відстань між 21 пожежними вежами у 13 км (рис. 8) забезпечує оперативне реагування на пожежі.

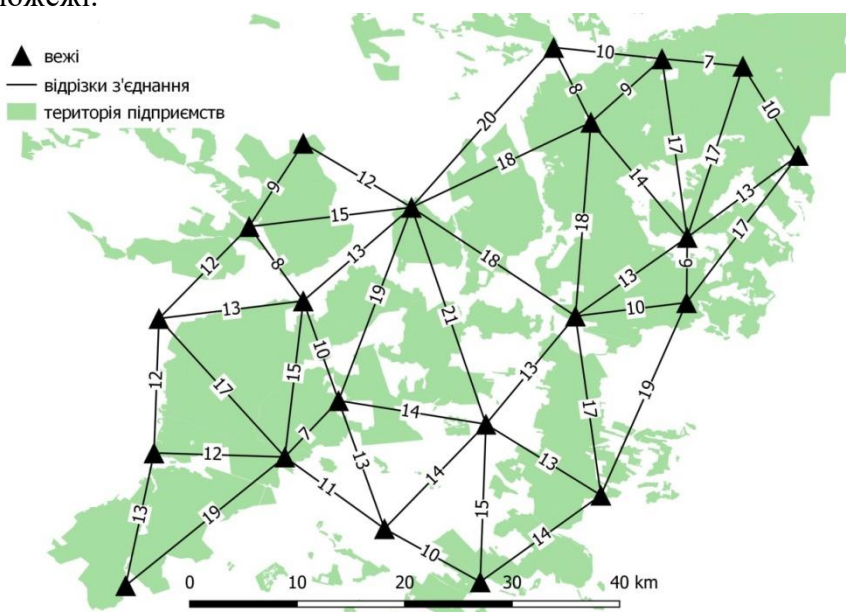


Рис. 8 – Відстані між пожежними вежами на півночі Київської області

Для подальших розрахунків покриття веж використовуватимемо значення 13 км як максимальну дальність спостереження за пожежами з використанням телесистем.

Розрахунок покриття мережі пожежних веж

Після розрахунку покриття k веж ми будемо мати k множин комірок, які видно з відповідної вежі. Припустимо, що ми маємо мережу, яка складається з двох веж. Тоді A_1 і A_2 – це множини комірок покриття відповідно з першої та другої веж. Об'єднання $C_1 = A_1 \cup A_2$ цих множин дасть нам одноразове покриття мережі з двох веж, тому що комірки множини C_1 будуть видимі принаймні з однієї з двох веж. Перетин множин $C_3 = A_1 \cap A_2$ дасть нам дворазове покриття, тому що комірки множини повинні належати і першій, і другій множині, тобто будуть видимі з двох веж.

Розрахунок покриття множини веж полягатиме у визначенні для кожної комірки переліку веж, з яких цю комірку видно. Встановимо для кожної вежі унікальний номер і визначимо матрицю з кількістю стовбців і рядків, як у ЦМР, та ініціалізовану двійковими

0000 0000

нульовими значеннями $M = 0000 \ 0000$. Далі виконаємо тест видимості для кожної

0000 0000

комірки кожної вежі. Якщо окремий тест дає позитивний результат, то відповідний номеру вежі знак елемента матриці встановлюється в одиницю. Наприклад, якщо комірку із стовпчиком i та рядком j видно з вежі номер 2, то в одиницю буде встановлено другий знак з правого боку, що буде записано як $M_i^j = 0010$. Якщо цю ж саму комірку буде видно також із вежі номер 4, то матимемо $M_i^j = 1010$. Бітові операції над цими двійковими числами дають змогу визначати два необхідних параметри:

- зі скількох веж видно цю комірку;
- чи видно цю комірку з певної підмножини веж.

Для розрахунку площі n -разового покриття потрібно знайти суму площ комірок, для яких кількість веж є більшою чи дорівнює n . На рисунку 9 наведено приклад зображення одноразового та дворазового покриття двох наявних веж ДП «Кролевецьке ЛМГ».

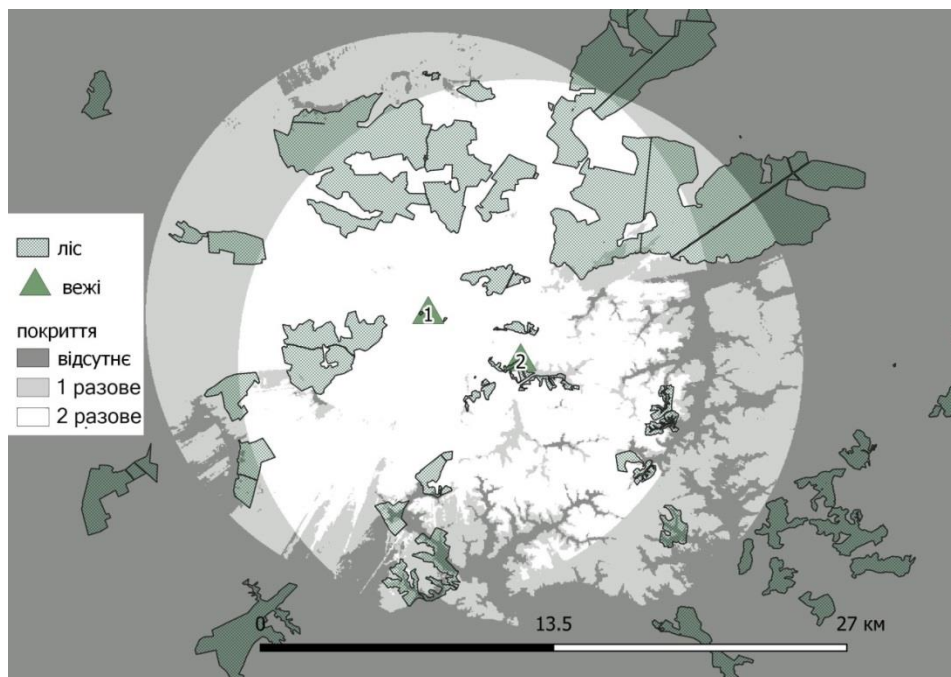


Рис. 9 – Покриття двох наявних веж ДП «Кролевецьке ЛМГ»

Визначення перспективних місць для спостереження за пожежами на рельєфі місцевості. До недавнього часу практика вибору позиції нової вежі з огляду на рельєф

обмежувалася вивченням топографічних карт та візуальним оглядом потенційної точки на місцевості. За допомогою безкоштовного додатка Google Earth проводять розрахунки профілю рельєфу між двома точками. Це дає змогу отримати уявлення про перспективність встановлення пожежної вежі у тій чи іншій точці. Крім того, за допомогою таких програмних засобів, як QGIS (Сусковіч 2016) і ArcGIS, можна побудувати покриття однієї або декількох веж. Цей підхід, однак, не дає можливості визначити найперспективніші місця для встановлення веж.

Особливості рельєфу в гірській місцевості Карпат і Криму, у долинах великих річок або в яружно-балочних мережах не дають змоги візуально з топографічної карти визначити місця з найбільшим покриттям веж. Особливо важко зробити такий вибір, коли йдеться про нагляд за пожежами на певній території.

Автором пропонується такий підхід до визначення найбільш придатних для спостереження локацій:

- у межах прямокутника, який охоплює територію потенційного спостереження, будемо ЦМР на розрідженій сітці (комірка зі стороною 1 000 м);
- у центрі кожної комірки встановлюємо вежу з однаковою висотою;
- для кожної вежі розраховуємо і записуємо площу покриття;
- для кожної вежі розраховуємо і записуємо частку площі покриття від усієї площі спостереження у відсотках.

Таким чином отримуємо сітку, в якій кожна комірка має значення частки площі покриття від загальної площі спостереження. Можна також вивести ізолінії цієї величини (рис. 10).

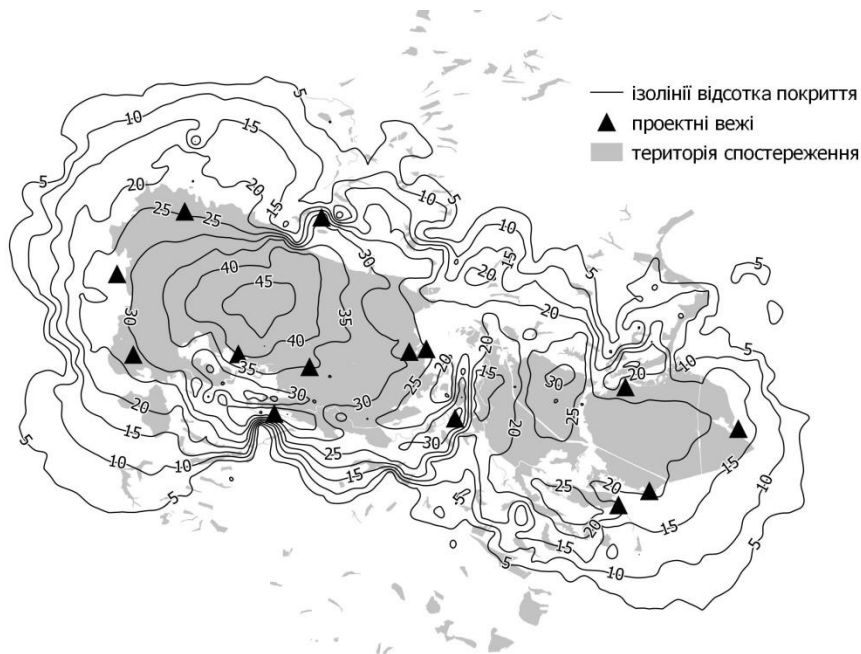


Рис. 10 – Карта перспективних місць встановлення пожежних веж на території ДП «Ізюмське ЛГ»

На рисунку, зокрема, видно, що місця, де буде забезпечено покриття більше ніж 30 %, знаходяться часто за межами території підприємства.

Оптимальне розміщення веж. Встановлено, що площину можна покрити без проміжків тільки трьома видами правильних багатокутників (Weisstein 2020): правильними шестикутниками, квадратами і правильними трикутниками (рис. 11). При цьому кожна вершина буде спільною для 3, 4 і 6 багатокутників відповідно. Якщо ми маємо намір забезпечити всю територію нагляду трикратним покриттям веж, то вибір відносного розташування веж у вершинах правильних трикутників буде очевидним.

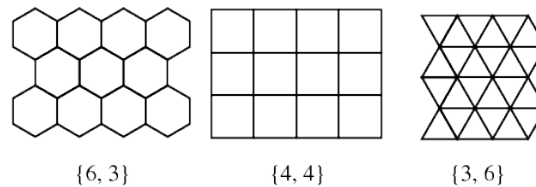


Рис. 11 – Замощення площини правильними багатокутниками

З розвитком мобільного зв'язку пошук оптимального розміщення веж є нагальним питанням. Так, у роботі (Gautam et al. 2006) представлено алгоритм оптимального розміщення n кіл однакового радіуса в певному полігоні з вимогою покриття цього полігону хоча би однією точкою кожного кола. У разі застосування подібних алгоритмів виявиться, що більшість веж потрібно розміщувати серед лісу без електричного струму, доріг і охорони. Виконання всіх цих передумов призведе до значних фінансових витрат. Воно можливе або на території, яка межує з конторами лісництв, або в межах населених пунктів. Крім того, доцільно розглядати можливість монтажу системи телеспостереження на вежі оператора стільникового зв'язку.

Вважатимемо, що в межах полігону, який обмежується певною ізолінією відсотка покриття площі території нагляду, ми встановили n потенційних місць розміщення систем телеспостереження. Припустимо, що нам потрібно з цих m веж вибрати такі k , які б давали максимальне n -кратне покриття. Комбінації веж з m по k генеруються з використанням лексикографічного алгоритму (Knuth 2011). Для кожної такої комбінації знаходимо мінімальну відстань між вежами D_{min} . Якщо ця відстань є меншою за порогове значення, то комбінацію пропускаємо. Інакше розраховуємо n -разове покриття. У результаті матимемо площі $C_n^m = \frac{m!}{k!(m-k)!}$ комбінацій підмножин веж за винятком тих, які не пройшли тест на мінімальну відстань. З набору комбінацій обиратимемо саме ту, для якої визначено максимальну площу.

Результати та обговорення. Розрахунки покриття проведено за двома вказаними об'єктами для зміни таких параметрів:

- кратність покриття (1-, 2-, 3-разове);
- кількість веж, що планується використати для спостереження;
- мінімальна відстань між вежами D_{min} .

ДП «Ізюмське лісове господарство»

Розрахунки покриття пожежних веж проводили на основі ЦМР супутника ALOS із розміром комірки 30 м у межах полігонів, що відповідають частині площі підприємства з переважанням ділянок першого і другого класів пожежної небезпеки. Фактично це площа всього підприємства за виключенням площі Барвінківського лісництва 50 632 га. Перспективні вежі встановлено на території контор лісництв або в межах населених пунктів, які знаходяться у сприятливих місцях на поверхні території підприємства.

Загалом прораховано 417 варіантів покриття з 5, 6, 7, 8, 9 і 10 веж із обмеженнями мінімальної відстані між вежами від 6 до 13 км (табл. 3). Аналіз найбільших значень покриття серед множини їхніх варіантів (табл. 4) дає можливість зробити висновки щодо розміщення пожежних веж:

- навіть у разі вибору для телеспостереження п'яти веж 1, 2, 3, 4 і 5 забезпечується можливість спостереження за 89 % території з однієї вежі і 55 % з двох;
- додання чотирьох веж 6, 7, 9, 10 підвищує дворазове покриття в 1,5 разу (до 83 %), а триразове – у 17 разів (до 61 %);
- залучення до розрахунку покриття десятої вежі № 11 дає незначний ефект (на 0,1 % для одноразового, 1 % для дворазового і 12 % для триразового покриття), тому вважатимемо підмножину 9 веж 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10 найдоцільнішою для цієї території нагляду (рис. 12).

Таблиця 3

Параметри перспективних пожежних веж ДП «Ізюмське ЛГ»

№ з/п	Прив'язка	Висота, м	Абсолютна позначка основи, м	Площа покриття, га	Частка від площі нагляду, %
1	Кременець	35	154	18 023,7	35,6
2	Заводи	48	143	21 454,5	42,4
3	Левківка	48	126	7 200,3	14,2
4	Протопопівка	48	70	14 489,6	28,6
5	Яремівка	48	111	13 603	26,9
6	Оскіл	48	84	11 525	22,8
7	Кримки	48	148	9 653,3	19,1
8	Співаківка	48	88	19 575,2	38,7
9	Завгороднівське	48	0	14 623,7	28,9
10	Піщане	48	96	15 043,9	29,7
11	Петрівське	48	73	12 643,8	25,0
12	Придонецьке	48	90	16962,5	33,5
13	Студенецьке	48	73	11 557,2	22,8
14	Ізюм	48	83	12 444,6	24,6

Таблиця 4

Результати розрахунків покриття веж ДП «Ізюмське ЛГ»

Кількість веж	D _{min} , км	Кількість варіантів	Площа покриття, га			Частка від площі підприємства, %		
			1-разове	2-разове	3-разове	1-разове	2-разове	3-разове
5	13	4	45 194	27 754	1 824	89	55	4
6	11	15	45 466	36 234	8 302	90	72	16
7	10	4	45 964	38 637	11 769	91	76	23
8	9	4	46 045	39 233	20 542	91	77	41
9	6	100	46 312	41 957	30 906	91	83	61
10	6	12	46 360	42 880	34 543	92	85	68

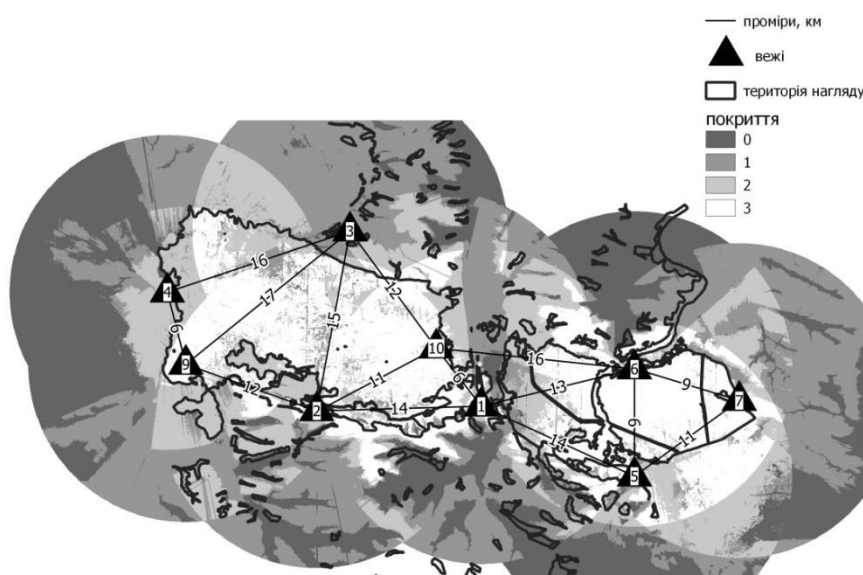


Рис. 12 – Графічне зображення покриття ДП «Ізюмське ЛГ» мережею з 9 веж

ДП «Кролевецьке лісомисливське господарство»

Розрахунки покриття перспективної пожежної мережі проводили на основі ЦМР супутника ALOS із розміром комірки 30 м у межах найбільш пожежонебезпечних ділянок. Площа спостереження за пожежами охоплює територію підприємства за виключенням

Ярославецького лісництва і становить 17 724 га. Вежі пропонується встановлювати на території контор лісництв або використовувати наявні вежі операторів мобільного зв'язку (таблиця 5).

Таблиця 5

Параметри перспективних пожежних веж ДП «Кролевецьке ЛМГ»

№ п/п	Прив'язка	Висота, м	Абсолютна позначка основи, м	Площа покриття, га	Відсоток від площі нагляду
1	Кролевецьке ЛГ	40,0	148	8 956,4	50,5
2	Гружчанська	40,0	199	9 559,4	53,9
3	Дубовицьке лісництво	48,0	168	7 999,6	45,1
4	Хрещатинське лісництво	48,0	152	9 540,9	53,8
5	Гружчанське лісництво	48,0	158	11 642,6	65,7
6	Воронцове вежа	40,0	168	8 539,5	48,2
7	Ярославецьке Київстар	40,0	202	3 491,4	19,7
8	Алтинівка Київстар	40,0	177	3 108,4	17,5
9	Мутино Київстар	40,0	156	965,1	5,4
10	Обтове Київстар	40,0	132	5 343,3	30,1

Наразі спостереження за пожежами ведуть за допомогою систем телеспостереження, встановлених на першій і другій вежах. Це забезпечує одноразове покриття 10 982 га (62 %) і дворазове 7 533 га (43 %) (див. рис. 9).

Динаміка зміни площі покриття при додаванні кількості веж (табл. 6) свідчить, що:

- доволі високого одноразового (94 %) і дворазового (54 %) покриття можливо досягти в разі встановлення телесистем на 5 веж 2, 6, 7, 8, 10 (рис. 13);
- суттєвого підвищення триразового покриття (до 73 %) можливо досягти тільки в разі додавання телесистем ще на чотири вежі;
- незначне зростання триразового покриття в разі додавання кількості веж зумовлюється значною роз'єднаністю лісових урочищ.

Таблиця 6

Результати розрахунків покриття веж ДП «Кролевецьке ЛМГ»

Кількість веж	D_{min} , км	Кількість варіантів	Площа покриття, га			Частка від площі нагляду, %		
			1-разове	2-разове	3-разове	1-разове	2-разове	3-разове
3	13	45	13 999	7 389	2 054	79	42	12
4	13	30	15 130	8 841	2 962	85	50	17
5	13	9	16 610	9 600	3 832	94	54	22
6	13	1	16 966	9 719	4 322	96	55	24
7	10	1	17 176	13 209	8 105	97	75	46
8	9	1	17 261	14 362	10 437	97	81	59
9	7	1	17 272	14 595	12 759	97	82	72
9	7	1	17 229	14 493	12 885	97	82	73
10	7	1	17 273	14 724	13 555	97	83	76

Висновки. З метою забезпечення раннього виявлення лісових пожеж із використанням оптимально розміщених пожежних веж обґрунтовано: – математичний апарат для розрахунку покриття однієї вежі; – значення параметрів розрахунку – максимальної дальності спостереження та висоти підняття диму.

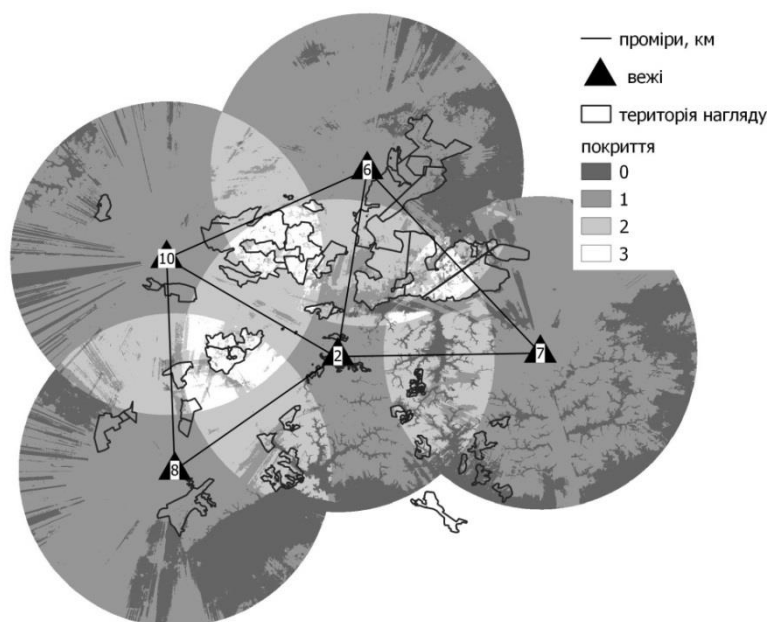


Рис. 13 – Графічне зображення покриття ДП «Кролевецьке ЛМГ» мережею з 9 веж

Розроблено підходи: – до розрахунку перспективних місць установаження веж в умовах перетнутої місцевості; – до вибору тієї підмножини з наявної множини веж, для якої площа покриття є найбільшою.

Ефективність застосування зазначених підходів підтверджено на прикладі двох лісогосподарських підприємств. Дані розрахунків покриття веж, наведених у публікації, можна вважати рекомендаціями щодо розгортання двох систем телеспостереження.

ПОСИЛАННЯ – REFERENCES

Balabukh, V. O. and Zibtsev, S. V. 2016. Impact of climate change on the quantity and area of forest fires in the north part of the Black Sea region of Ukraine. *Hydrometeorological Journal*, 18: 60–71 (In Ukrainian with English summary).

Bogachev, A., Merkulov, V. I., Chernov, V. S., Zagrebelnyi, I. R. 2018. Mathematical models of relative movement of air objects for observation procedures in aviation airborne radars. Part 2. Mathematical models in antenna, beam and spherical coordinate systems. [Electronic resource]. *Zhurnal Radioelektroniki – Journal of Radio Electronics*, 2. Available from: <http://jre.cplire.ru/jre/feb18/6/text.pdf> (last accessed date 25.05.2020) (in Russian). DOI 10.30898/1684-1719.2018.2.8

Brunner, F. K. 1984. *Geodetic refraction: Effects of electromagnetic wave propagation through the atmosphere.* Springer, Berlin (in English).

Courty, L.G., Soriano-Monzalvo, J. C., Pedrozo-Acuña, A. 2019. Evaluation of open-access global digital elevation models (AW3D30, SRTM, and ASTER) for flood modelling purposes. *J Flood Risk Management*, 12 (Suppl. 1): e12550. <https://doi.org/10.1111/jfr3.1255014> of 14 COURTY ET AL

Cuckovic, Z. 2016. Advanced viewshed analysis: a Quantum GIS plug-in for the analysis of visual landscapes. *Journal of Open Source Software*, 1(4): 32, doi:10.21105/joss.00032 2

Gautam, K. Das, Sandip, Das, Subhas, C. Nand, Bhabani, P. Sinha. 2006. Efficient algorithm for placing a given number of base stations to cover a convex region. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 66(11): 1353–1358. <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2006.05.004>

Golden Software Surfer. 2017. Full User's Guide. Golden Software, LLC.

Hirt, C., Guillaume, S., Wisbar, A., Bürki, B., Sternberg, H. 2010. Monitoring of the refraction coefficient in the lower atmosphere using a controlled setup of simultaneous reciprocal vertical angle measurements, *J. Geophys. Res.*, 115: D21102. doi:10.1029/2010JD014067

Knuth, D. E. 2011. *The Art of computer programming: Combinatorial algorithms, Part 1.* New Jersey, Addison-Wesley Professional, 883 p.

Kucuk, O., Topaloglu, O., Altunel, A., Cetin, M. 2017. Visibility analysis of fire lookout towers in the Boyabat State Forest Enterprise in Turkey. *Environmental Monitoring and Assess*, 189: 329. DOI: 10.1007/s10661-017-6008-1

Luhansk Regional State Administration. 2018. A set of measures on prevention and liquidation of forest fires is involved in the Region, briefing. [Electronic resource]. Available from:

http://loga.gov.ua/oda/press/news/v_oblasti_zadiyaniy_kompleks_zahodiv_z_poperedzhennya_ta_likvidaciyi_lisovih_p_ozhezh (last accessed date 10.05.2020) (in Ukrainian).

Orlov, O. K. 1986. Forest fire detection using television installations. In: Wildfires and their control. Proceedings of scientific works. Leningrad, LenNIILKH, p. 92–95 (in Russian).

Polupan, A. V., Bogomolov, V. V., Ostapchik, O. V., Borisenko, O. I. 2017. Methods of division of forest land plots into fire hazard classes during fire-fighting arrangement with the use of GIS. In: Modern information technologies for management of ecological security, nature, activities in emergency situations. Proceedings of Int. Conf. Kyiv, p. 168–170 (in Ukrainian).

Rogers, D. F. 1989. Procedural elements for computer graphics. Moscow, Mir, 512 p. (in Russian).

Seeber, G. 2003. Satellite Geodesy. Berlin, New York, Walter de Gruyter, 589 p.

Shvidenko, A., Buksha, I., Krakovska, S. 2018. Vulnerability of Ukraine's forests to climate change. Kyiv, Nika-Centre, 128 p. (in Ukrainian with English summary).

State Forest Resources Agency of Ukraine. 2014. Kharkiv Regional Department of Forestry and Hunting have intensified their efforts to control forest fires. [Electronic resource]. Available from: http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art_id=122060&cat_id=32888 (last accessed date 10.05.2020) (in Ukrainian).

State Forest Resources Agency of Ukraine. 2020. During the weekend foresters responded 60 times to suppress forest fires. [Electronic resource]. Available from: <https://www.kmu.gov.ua/news/derzhlisagentstvo-za-vihidni-lisivniki-60-raziv-viyizhdzhali-na-gasinnya-lisovih-pozhezh> (last accessed date 10.05.2020) (in Ukrainian).

Weisstein, E. W. 2020. Regular Tessellation. [Electronic resource]. From MathWorld – A Wolfram Web Resource. Available from: <https://mathworld.wolfram.com/RegularTessellation.html> (last accessed date 10.05.2020).

Bogomolov V. V.

APPROACHES TO OPTIMIZING THE LOOKOUT TOWERS PLACEMENT IN A FOREST ENTERPRISE

Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G. M. Vysotsky

Due to an increased level of fire danger in Ukrainian forests, there is an urgent task to expand a network of television fire surveillance cameras. Additional cameras are installed in order to increase the accuracy of determining the coordinates of the fire, which in turn reduces the time of mobilizing forces and means to extinguish it. A numerical method for calculating the visibility of fire surveillance cameras has been proposed. It was designed based on spheroidal geodesy and by using well-known data processing algorithms. Both the maximum range of television surveillance and the smoke height have been grounded. An approach to selecting a subset of lookout towers from the total set is proposed on conditions that the most fire hazardous parts of the forest are the maximum visible areas. An approach is shown to identifying the most promising places to install new towers or select existing high-rise buildings on a digital terrain model. The above approaches were applied in two forestry enterprises in eastern Ukraine. As a result the recommendations on the placement of additional television surveillance systems were given.

Key words: fire lookout tower, television surveillance system, visibility area, digital terrain model.

Богомолов В. В.

ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОЖАРНЫХ ВЫШЕК ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Украинский научно-исследовательский институт лесного хозяйства и агролесомелиорации им. Г. Н. Высоцкого

В связи с повышением уровня пожарной опасности в лесах Украины возникла насущная необходимость в расширении сети камер теленаблюдения за пожарами. Дополнительные телекамеры устанавливаются с целью повышения точности определения координат пожара, что в свою очередь уменьшает время мобилизации сил и средств для его тушения. Приведен численный метод расчета видимости камер теленаблюдения за пожарами, основанный на математических выкладках сфероидической геодезии и с использованием известных алгоритмов обработки данных. Представлено обоснование величины максимальной дальности теленаблюдения и высоты подъема дыма. Предложен подход к выбору подмножества пожарных вышек из общего множества при условии максимума видимой площади в наиболее пожароопасных частях лесных массивов. Показан подход к выявлению наиболее перспективных мест для установки новых вышек или для выбора имеющихся высотных сооружений на цифровой модели местности. Приведенные подходы применены для двух лесохозяйственных предприятий восточной Украины, в результате чего даны рекомендации по размещению дополнительных систем теленаблюдения.

Ключевые слова: пожарно-наблюдательная вышка, система теленаблюдения, зона видимости, цифровая модель рельефа.

E-mail: nit@uriffm.org.ua

Одержано редколегією 01.06.2020