

ОСОБЛИВОСТІ ПРИХОДУ СОНЯЧНОЇ РАДІАЦІЇ НА СХИЛИ ПОРОДНИХ ВІДВАЛІВ ЯК ФАКТОРА ЛІСОРΟΣЛИНИХ УМОВ ЇХ ПОВЕРХНІ

Зубов Антон Олексійович

кандидат технічних наук, докторант
Інститут агроєкології і природокористування
Національної академії аграрних наук України,
м. Київ, Україна
ORCID: 0000-0002-1759-9481
azubov.work@gmail.com

Зубов Олексій Ремович

доктор сільськогосподарських наук, професор
ORCID: 0000-0002-0837-8257
zuboval195@gmail.com

Мета дослідження – визначення часових відмін елементів радіаційного балансу на схилах породних відвалів гірничодобувних підприємств залежно від їх експозиції та крутизни. Для досягнення цієї мети були вирішені завдання: встановити просторово-часові закономірності зміни інсоляції відвальних схилів як головного елемента прихідної частини їх радіаційного балансу; дати оцінку інсоляції схилів різної експозиції загалом за теплу пору року (вегетаційний період) та помісячно; зіставити інсоляцію схилів відвалів Донецького кам'яновугільного басейну та рівної місцевості в інших природно-кліматичних зонах Землі. Дослідження виконували на основі розробленої формули куту падіння сонячних променів на схили різної крутизни залежно від широти місцевості, дати та години дня, азимуту експозиції досліджуваної ділянки схилу. Відміною від подібних досліджень стало врахування послаблення прямої радіації при проходженні атмосфери за різного куту падіння сонячних променів на горизонтальну поверхню. На основі актинометричних вимірювань отримано формулу зниження прямої радіації відносно її максимального значення, яке має місце 22 червня опівдні. В результаті досліджень встановили, що добова інсоляція червневого дня, починаючи з азимуту експозиції схилу $A\alpha = 120^\circ$ і до 230° є вищою ніж на плато (горизонтальній поверхні) до 7,2% на півдні. В усі інші місяці схили теж можуть інсолюватися краще за плато, але в певних межах експозиції: квітень при $A\alpha$ від 97° до 262° , серпень – від 100° до 260° , травень – від 110° до 250° , липень – від 114° до 245° , вересень – при $A\alpha$ від 90° до 265° . Найбільші відмінності інсоляції від плато мають місце у вересні – до +47%. Встановили, що в середньому за квітень-вересень на схилах крутістю 35° на широті 48° з експозицією проміж ПнЗх і ПнСх ($A\alpha = 315-40^\circ$) надходження сонячної радіації аналогічне Заполяр'ю. На схилах з $A\alpha = 45-110^\circ$ і $A\alpha = 250-315^\circ$ інсолюваність нижче, ніж на широті центру Донбасу (48°). А на схилах експозицій з $A\alpha = 110-180^\circ$ і $180-250^\circ$ інсолюваність вища, досягаючи на експозиції Пд ($A\alpha = 180^\circ$) субтропічних значень. У червні та липні інсолюваність тут набуває значення, якого немає навіть на тропіку. Встановлені відміни інсоляції на схилах відвалів істотно відбиваються на умовах зростання на них різних видів рослинності. Тому використання авторської методики визначення особливостей інсоляції схилів дозволить більш вірно підбирати состав деревних порід при залісненні відвалів з урахуванням їх посухостійкості та світлолюбності.

Ключові слова: породний відвал, схил, радіаційний баланс, інсоляція.

DOI <https://doi.org/10.32845/agrobio.2022.2.12>

Вступ. Виконання найважливішої задачі агропромислового комплексу України, якою є забезпечення продовольчої безпеки держави та посилення її експортних можливостей, істотно ускладнюється внаслідок забруднення ґрунтів промисловими відходами. Площа ріллі, забрудненої важкими металами (ВМ) в державі складає 8% (Baliuk et al., 2017). Переважна частина забруднених земель є результатом дії понад 2000 гірничодобувних підприємств, великої маси їх відходів, вагоме місце серед яких займають породні відвали вугільних шахт.

За нашими новітніми даними в Україні налічується 1356 шахтних відвалів. На території Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну розташовані 55 відвалів (Pinder & Popovych, 2017), у Західному Донбасі (східній частині Дніпропетровської області) їх 11 (Petlovanyi & Medianyk, 2018). У Центральному Донбасі налічується

1301 породних відвалів вугільних шахт. Внаслідок катастрофічної водної ерозії та дефляції на відвалах, горіння частини з них, вони є джерелами забруднення повітря газами та пилом, а ґрунтів – важкими металами (Pinder & Popovych, 2017; Petlovanyi & Medianyk, 2018; Zubova et al., 2015; Zubov O., Zubova & Zubov A, 2019). І ця проблема є загальносвітовою (Rodríguez-Eugenio et al., (2018), характерною для США (Chugh & Behum, 2014); Росії (Alekseenko et al., 2018); Китаю (Yingyi et al., 2007); Індії (Pandey et al., 2014); Австралії та Германії (Zillig et al., 2015) та інших вугледобувних країн.

Найефективнішим напрямом оптимізації порушених земель є лісова рекультивация. Доведено, що деревні насадження на відвалах запобігають водній ерозії та дефляції (Zubova et al., 2015). Різним питанням рекультивации присвячені дослідження у багатьох країнах: у Польщі (Marcisz

et al., 2020), Чехії (Prusová et al., 2017, Zástěrová et al., 2015), США (Chugh & Behum 2014, Австралії та Германії (Zillig et al., 2015), в Індії (Gupta & Biswajit, 2015).

Незважаючи на вихідну стерильність породи (Logginov et al., 1972) та низькі лісорослинні якості (Baklanov, 1970, Kirichek, 2003), відвали вугільних шахт мають властивість поступового самозаростання (Korshikov & Zhukov; Vacek et al., 2018). Рослинність відвалів та природні флорокомплекси техногенних екосистем Донбасу вивчені в роботі (Zhukov, 2020).

Досвід рекультивациі та фітомеліорації породних відвалів у Львівсько-Волинському басейні розглядаються у роботі (Pinder & Porovuch, 2017). Перші результати робіт з озеленення у Донбасі описані в працях (Shalyt & Kostomarov, 1950), а їх методи в роботах (Baklanov, 1970, Logginov et al., 1972). Дослідження (Zubova, Zubov O. & Zubov A., 2019) підтверджують ефективність цих методів. Проте, як показав аналіз космічних знімків великої кількості відвалів Донбасу (Zubova et al., 2015), більше половини з них зовсім не заліснені, а особливістю заліснених є переважне розташування лісу на схилах північної половини їх бокової поверхні, що ми пов'язуємо з відмінностями лісорослинних умов на схилах різної експозиції, зумовленими різним припливом сонячної енергії.

Як зазначено в (Nevidimova, 2015; Simonov, 1958), нерівномірний розподіл сонячної енергії на природних схилах є основним джерелом рельєфоутворення, породжує багато екзогенних процесів.

Вплив висоти місцевості, експозиції та крутості схилу на тепловий та гідрологічний режими території, на особливості просторового розподілу рослин викладено у роботі (Sokolova, 2016). Виходячи з представленої класифікації форм рельєфу, відвали можна віднести до мезоформ, для яких висотні відмінності не виражені, а вирішальну роль для рослин відіграє експозиція схилів та пов'язані з нею відмінності в інсоляції.

Тому при оцінці лісорослинних умов схилів породних відвалів важливим є облік мінливості інсоляції на базі актинометричних досліджень.

Мета дослідження – визначення часових відмін елементів радіаційного балансу на крутих схилах породних відвалів залежно від їх експозиції.

Матеріали і методи досліджень. Як відомо, радіаційний баланс поверхні Землі визначають як різницю між надходженням та витратою променевої енергії за рівнянням (Morgunov, 2005):

$$B = S' + D + E_a - R_k - R_d - E_z, \text{ кВт/м}^2, \quad (1)$$

де S' та D – надходження прямої та розсіяної короткохвильової сонячної радіації на горизонтальну поверхню, E_z та E_a – довгохвильові випромінювання Землі та зустрічне випромінювання атмосфери, R_d – відбита частина E_a .

Частка розсіяної радіації D від сумарної ($S' + D$) за безхмарного неба становить 20–25%.

Методичні рекомендації з актинометричних розрахунків викладені у працях (Kondrat'ev et al., 1978; Sivkov, 1968). В них та в (Simonov & Kruzhalin, 1993; Badesku, 2008, Kumar et al., 1997, Lai et al., 2010) показані методи аналізу відмінності інсоляції схилів різних експозицій та крутості.

Оцінюючи вплив нахилу рельєфу на складові короткохвильового балансу радіації при безхмарному небі використовують методи (Kondrat'ev et al., 1978; Williams, Barry & Andrews, 1972). Вплив хмарності враховується з допомогою методики (Dong & Mace, 2003). Для довгохвильової частини балансу використовують (Pluss & Ohmura, 1997). Актинометричні дослідження мають як теоретичне, так і прикладне значення – у лісомеліорації (Sidorenko et al., 2020), у сонячній енергетиці (Aoun et al., 2019). Здійснюють як вимірювання за допомогою актинометричних приладів, так і математичне моделювання (Bailek et al., 2018; Bailek et al., 2020; Anis et al., 2019, (Muzathik et al., 2011; Olmo et al., 1999), яке є більш інформативним у глобальному масштабі.

Зважаючи на складність структури радіаційного балансу та застосування вищезгаданих методів для розрахунку його елементів у повному обсязі, для досягнення мети досліджень було поставлено завдання встановити просторово-часові закономірності зміни інсоляції відвальних схилів як головного елемента прибуткової частини радіаційного балансу їхньої поверхні. Від інсоляції (режиму освітленості) залежать як фотосинтез і, побічно, інші фізіологічні процеси в рослинах (Skliar, 2015), так і втрата вологи опадів, що випали, на випаровування і транспірацію. Виразимо її рівнянням:

$$S' = S \cdot \sin \varphi, \quad (2)$$

де S – пряма радіація, Вт/м², φ – кут падіння сонячних променів на освітлювану ними поверхню, град. (рис. 1).

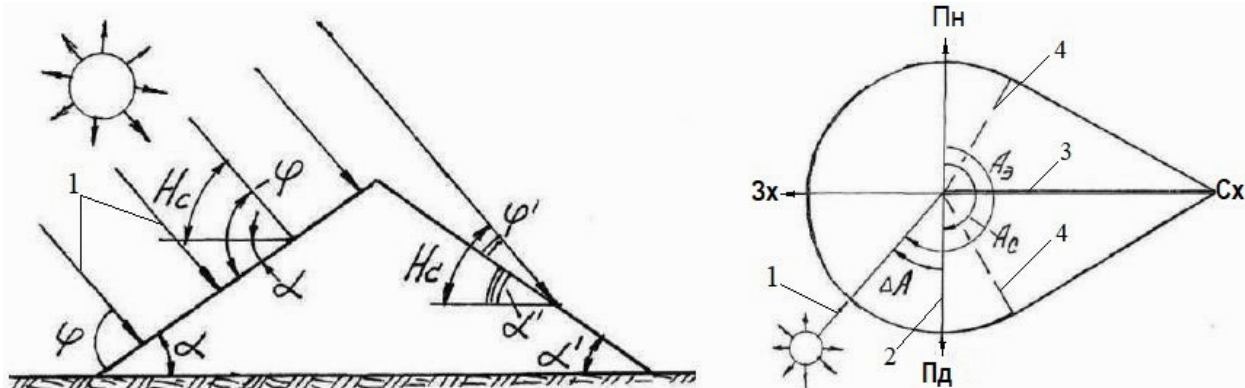


Рис. 1. Схема визначення кута падіння сонячних променів на укоси відвалу у фронтальній проекції (ліворуч) та в плані: 1 – напрямок променів; 2 – задана лінія схилу; 3 – ребро терикону; 4 – межі хвостової частини терикону

Для горизонтальної поверхні кут φ дорівнює т. зв. висоті сонця H_c , для похилої $\varphi = H_c \pm \alpha'$ (3), де α' – кут нахилу поверхні у напрямку до сонця ($+\alpha'$) або у зворотному напрямку ($-\alpha'$). Якщо напрямок на сонце збігається з напрямком падіння схилу, то $\alpha' = \alpha$, тобто куту падіння. Якщо напрямок на сонці відхиляється від напрямку падіння схилу, то $\alpha' < \alpha$.

Для обчислення α' нами запропоновано формулу: $\alpha' = \arctg(\operatorname{tg}\alpha \cdot \cos\Delta A)$ (4), де ΔA – кут між напрямком на сонце та напрямком найбільшого падіння схилу: $\Delta A = A_c - A_z$; де A_c – азимут напрямку на сонце, тобто горизонтальний кут між ним та північним напрямком меридіану за годинниковою стрілкою; A_z – азимут найбільшого падіння схилу (експозиції).

Вихідні дані розрахунку – висоту H_c та азимут A_c сонця отримували за допомогою on-line калькулятора для точки з координатами 48° пн. ш. та 39° сх. д., що знаходиться у центрі Донецького басейну.

Для уточнення послаблюючої ролі атмосфери за різної висоти сонця використовували приймальну частину піранометра універсального М-80 у поєднанні з мультиметром (рис. 2).

Вимірювання прямої радіації робили, спрямовуючи прилад точно на сонячний диск при увімкненому мультиметру, знімали покази у мілівольтах (мВ). Для відсічення розсіяної радіації використовували саморобний дифузор, але для виключення її можливого потрапляння знімали покази, також, спрямовуючи дифузор на ділянки неба поблизу сонця. Спостереження виконували в дні з чистим небом через кожні 30-60 хвилин, починаючи зі сходу сонця до його заходу в окремі місяці з лютого по жовтень 2021 р. За on-line калькулятором (URL: <https://planetcalc.ru/320/>) строго для координат точок спостереження, днів та часів вимірювань з хвилинами визначали висоту сонця.

Результати. Для ілюстрації зміни висоти та азимуту сонця щогодини та за місяцями вегетаційного періоду (на 15-те число) складено діаграми (рис. 3).

Вихідні дані отримані за допомогою on-line калькулятора для точки з координатами 48° пн. ш. та 39° с.д., що знаходиться у середині Донбасу.

Рівняння залежності висоти сонця H_c та азимуту сонця A_c від часу доби t мають вигляд:

$$H_c = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + A, \quad (5)$$



Рис. 2. Датчик піранометра окремо та сумісно з мультиметром

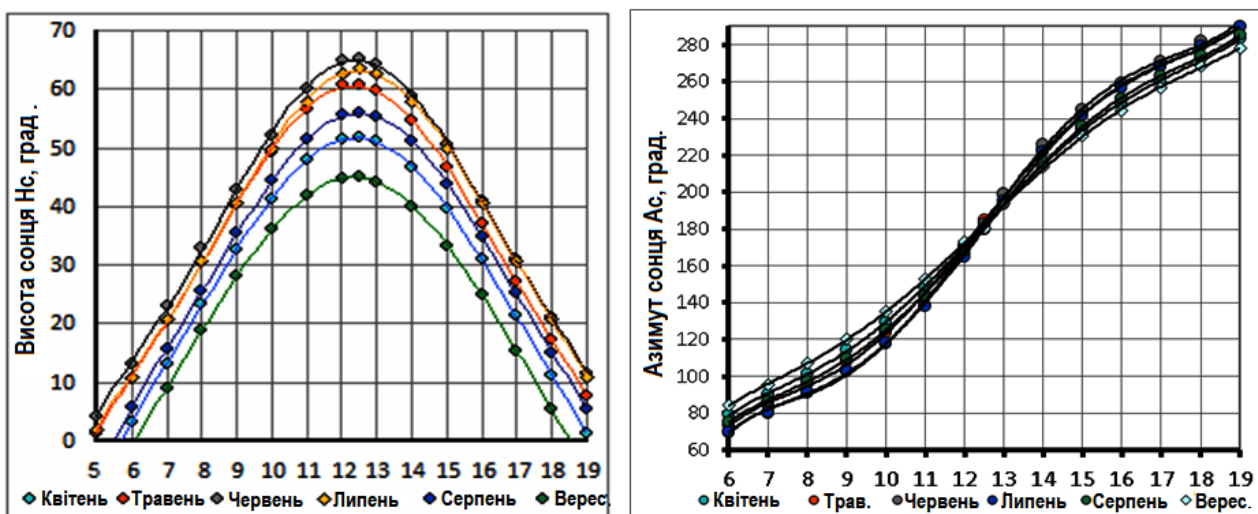


Рис. 3. Графіки висоти сонця та азимуту напрямку на нього протягом дня на 15 число місяців вегетаційного періоду року

$A_c = kt_6 + lt_5 + mt_4 + nt_3 + ot_2 + pt + B$, 6)
Значення коефіцієнтів при змінній t (час, година) та вільних членів рівнянь (5, 6) залежать від місяця та представлені в табл. 1, 2.

Для здійснення розрахунків складено табл. 3, у яку для кожної години від 6 до 19 (колонка 1) та кожного з основних варіантів експозиції схилів відвалу: Пн, Пн-Сх, Сх, Пд-Сх, Пд, Пд-Зх, Зх і Пн-Зх, що характеризуються азимутами: $A_e = 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270$ і 315° , внесені значення A_c (кол. 2) та H_c (кол. 4), визначені за допомогою on-line калькулятора.

Для прикладу обрано червень як місяць із найбільшою полуденною висотою сонця та тривалістю дня. Максимальне річне значення H_c має місце 22 червня – в день літнього сонцестояння, середньочервене полуденне значення посідає 10 червня.

Кути ΔA в інтервалі $-90 \dots 0 \dots +90^\circ$ відповідають зверненій до сонця половині бічної поверхні відвалу, тому значення α , одержувані для цього інтервалу мають знак "+". Кути ΔA в інтервалах $90 \dots 180^\circ$ та $180 \dots 270^\circ$

характерні для половини поверхні, зверненої у бік від сонця, тому значення α' з розрахунку набували знак "-". При підрахунку φ° виходили з того, що кут нахилу відкосів відвалів дорівнює 35° , отже $\text{tg}\alpha = 0,70$.

Визначивши значення ΔA (кол. 3), знаходимо їх косинуси (кол. 5) і розраховуємо α' (кол. 6) за формулою (4), а потім φ (кол. 7) за формулою (3).

Отримавши $\sin\varphi$ (кол. 9), за його відношенням до $\sin H_c$ (кол. 8) можна визначити відношення інсоляції (у той чи інший час на тій чи іншій експозиції) до інсоляції на горизонтальній поверхні землі або плоскій верхівці, позначене нами як KS' (кол. 10).

З'ясували, що KS' варіює від 0 до 3,5 і вище. До 800 схили експозицій Пн, ПнСх, Сх і ПдСх інсолюються краще за горизонтальну поверхню. З 800 з цього ряду вибуває експозиція Пн, але з'являється Пд. З 1100 вибуває ПнСх, але з'являється ПдЗх; з 1230 вибуває Сх, але з'являється Зх. Після 1400 вибуває ПдСх, але з'являється ПнЗх. Після 1700 року схил північної експозиції знову інсолюється краще за горизонтальну поверхню,

Таблиця 1

Елементи рівняння азимуту сонця

Місяць	a	b	c	d	E	f	A
Квітень	-0,00005	0,007	-0,3248	6,8071	-70,475	362,85	-662,8
Травень	-0,0002	0,0174	-0,7018	13,648	-135,88	675,33	-1253,7
Червень	-0,0001	0,0176	-0,7539	15,224	-155,49	785,44	-1487,4
Липень	-0,000002	0,0065	-0,4001	9,4308	-104,47	556,8	-1079,2
Серпень	-0,000008	0,0049	-0,2892	6,6806	-72,935	387,47	-730,4
Вересень	-0,00002	0,001	-0,1065	2,8418	-32,589	182,01	-318,8

Таблиця 2

Елементи рівняння висоти сонця

Місяць	k	l	m	n	o	p	B
Квітень	-0,0002	0,0177	-0,5202	7,6773	-60,42	252,5	-447,1
Травень	-0,0004	0,0266	-0,7871	11,743	-93,738	391,92	-673,23
Червень	-0,0004	0,0327	-0,9725	14,628	-117,84	494,3	-843,8
Липень	-0,0004	0,0297	-0,8867	13,375	-107,97	454,47	-781,5
Серпень	-0,0003	0,0206	-0,6102	9,1029	-72,47	304,09	-532,5
Вересень	-0,0002	0,0144	-0,4206	6,1323	-47,769	200,55	-367,3

Таблиця 3

Вихідні дані та результати розрахунку значень інсоляції

t, год.	$A_c,^\circ$	$\Delta A,^\circ$	$H_c,^\circ$	$\cos\Delta A$	α'	$\varphi,^\circ$	$\sin H_c$	$\sin\varphi$	KS'	KS	$S'\varphi$	$S'H_c$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$A_e = 0^\circ$ (північна експозиція)												
6	70	70	13	0,34	11,3	24,5	0,228	0,415	1,82	0,18	7,6	4,2
8	91	91	33	0,02	0,6	32,3	0,543	0,534	0,98	0,65	34,8	35,4
...
12,5	183	183	65	1,00	30,3	35	0,908	0,576	0,63	1,00	57,6	91,2
...
16	259	259	41	0,19	6,4	34,6	0,656	0,568	0,87	0,77	43,4	50,2
...
19	292	292	12	0,37	12,4	23,9	0,199	0,405	2,03	0,11	4,6	2,3
$A_e = 45^\circ$ (північно-східна експозиція)												
...

а південної – знову гірше. Однак робити висновок не про відносне, а про фактичне інсолювання схилів на підставі коефіцієнта KS' не коректно, оскільки в різні години дня сонячні промені проходять крізь атмосферу під різним кутом, а отже проходять у ній різний шлях, істотно послаблюючися при малих кутах до земної поверхні.

Дослідження з використанням піранометра (див. рис. 2) та дифузора, що відсікає розсіяну радіацію, дозволили встановити зв'язок (рис. 4, зліва) та отримати рівняння залежності прямої радіації S (у мілівольтах) від H_c :

$$S = 3,065 \cdot \ln(H_c) - 4,15 \quad (7).$$

Оскільки достовірно перевести мВ у Вт/м² було важко, обмежилися відносною оцінкою прямої радіації – коефіцієнтом KS (рис. 4, прав.) – відношенням показів мультиметра (мВ) при різній висоті сонця H_c до показів при її максимальному значенні – у 1230 у середньому за червень (65°).

Рівняння відносної прямої радіації має вигляд:

$$KS = 0,3544 \cdot \ln(H_c) - 0,48. \quad (8)$$

За допомогою (8) визначили відносне значення прямої радіації KS для висот, що мали місце в різні години дня (кол. 11).

За значеннями KS , використовуючи формулу $S'_{\phi} = 100 \cdot KS \cdot \sin \phi$, визначили значення інсоляції S'_{ϕ} у різні години червневого дня на різних експозиціях (кол. 12), а за формулою: $S'_{H_c} = 100 \cdot KS \cdot \sin H_c$ – значення інсоляції S'_{H_c} на плато (кол. 13). Обидва показники виражені у відсотках від максимального значення інсоляції на плато, яке має місце при максимальній середньочервневій висоті сонця $H_c = 65^\circ$ на широті 48° у 1230. Результати представлені на рис. 5.

Як бачимо, графіки відносної інсоляції на плато симетричні в часі моменту 1230, досягаючи при цьому значення 100%. Симетричними є і графіки інсоляції на лініях схилу з азимутами 0° (північ) та 180° (південь), проте їх максимальні значення суттєво відрізняються, децю перевищуючи у першому випадку 58% і досягаючи у дру-

гому 109,1%. Має місце досягнення такого ж рівня при експозиції ПдСх та ПдЗх; ці графіки асиметричні щодо осі часу 1230, але симетричні один одному, так само, як і графіки Сх і Зх, ПнЗх і ПнСх. У 800 і 1700 значення відносної інсоляції на плато, північних і південних схилах стають однаковими (приблизно 44%).

У табл. 4 представлені погодинні значення інсоляції S' для плато і схилів всіх експозицій у % від полуденної червневої інсоляції на плато. Як бачимо, в окремі години інсоляція схилів від східної до південної і далі до західної експозиції може бути вищою, ніж опівдні на плато.

Середні денні червневі значення S' (табл. 4, передостанній рядок) закономірно збільшуються від 45,5% на півночі до 62,8% на півдні.

Прийнявши середню денну інсоляцію на плато (58,6%) за 100%, підраховали щодо її середні значення інсоляції за експозиціями схилів відвалу (нижній рядок). Як бачимо, на схилах експозицій Пд-Сх, Пд і Пд-Зх добова інсоляція перевищує 100%, тобто є вищою за плато.

За допомогою діаграм (рис. 6) точно встановлені межі бічної поверхні відвалу, що інсолюється краще, ніж плато. Це сектор між уздовжсхилувими лініями з азимутами $A_e = 120^\circ$ (ПдСхСх) і 230° (ПдЗхЗх) з максимумом у $107,2\%$ при $A_e = 180^\circ$ (південь). Інсоляція північної частини поверхні відвалу між румбами Пн-Зх і Пн-Сх є нижчою, ніж на плато більш ніж на 20%.

Наведені вище числові оцінки інсоляції схилів різної експозиції, отримані для найтеплішого місяця Північної півкулі Землі, дуже промовисто характеризують відмінності теплового режиму на схилах різної експозиції і, відповідно, їх лісорослинні умови. Однак для повнішої характеристики були поставлені такі завдання:

1. Дати оцінку інсоляції схилів різної експозиції загалом за теплу пору року (вегетаційний період) та помісячно.
2. Зіставити інсоляцію схилів відвалів Донецького басейну та рівної місцевості в інших природно-кліматичних зонах півкулі.

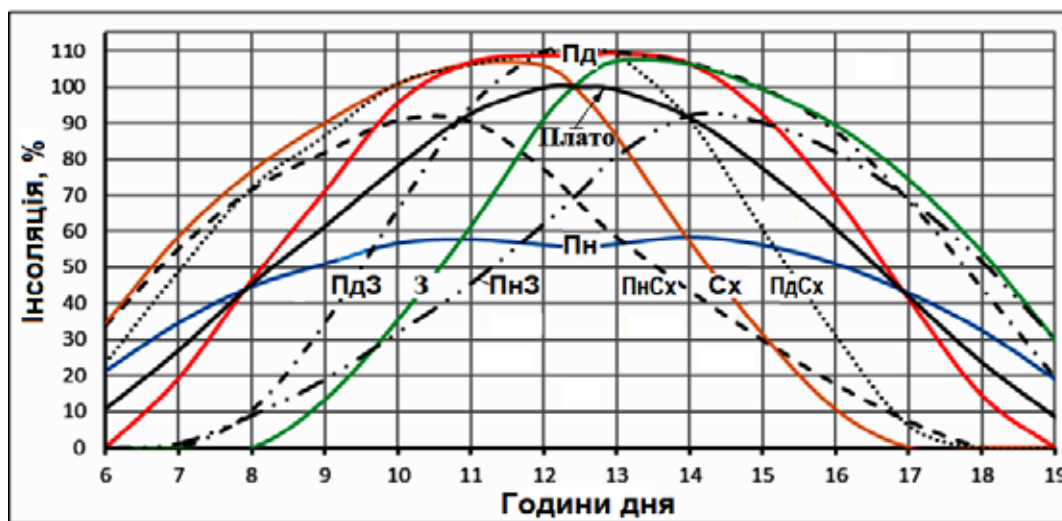


Рис. 5. Графіки відносної інсоляції схилів різної експозиції та плато усіченого або плоского відвалу у різні години червневого дня

Значення інсоляції (у %) на плато та схилах протягом червневого дня

Час, години	Експозиція схилу								Плато
	Пн	Пн-Сх	Сх	Пд-Сх	Пд	Пд-Зх	Зх	Пн-Зх	
6	21,2	33,8	34,3	23,4	0	0	0	0	10,8
7	34,5	55,1	58,4	48,9	19,2	0,0	0,0	1,2	27,0
8	44,6	71,5	77,5	72,1	46,3	10,2	0,0	9,0	45,4
9	50,2	80,6	87,9	86,5	70,9	34,3	13,3	18,9	61,3
10	56,6	90,8	100,7	101,0	95,4	65,9	35,4	31,9	80,0
11	57,7	90,6	106,4	106,3	106,7	94,6	61,4	45,5	92,6
12	56,2	77,3	105,8	109,5	108,6	109,7	91,2	62,0	99,8
12,5	55,5	67,5	98,3	110,1	108,3	110,0	101,6	71,0	100,0
13	56,4	58,4	86,2	108,9	109,1	109,4	107,3	80,8	99,2
14	58,3	43,5	57,0	90,8	106,3	106,5	106,4	92,1	91,5
15	56,1	29,8	31,3	60,4	92,2	99,6	99,4	90,1	77,4
16	50,9	17,5	10,5	31,0	69,3	87,5	89,5	81,9	60,7
17	42,8	7,3	0,0	6,1	41,1	68,2	74,4	68,8	41,9
18	32,4	0,1	0,0	0,0	14,5	44,1	54,4	51,6	23,7
19	18,9	0,0	0,0	0,0	0,0	19,4	30,0	29,9	8,6
В середньому за день	45,5	46,9	54,0	60,4	62,8	60,7	54,5	47,4	58,6
Відносно плато, %	77,6	80,0	92,2	103,0	107,2	103,6	93,0	80,9	100,0

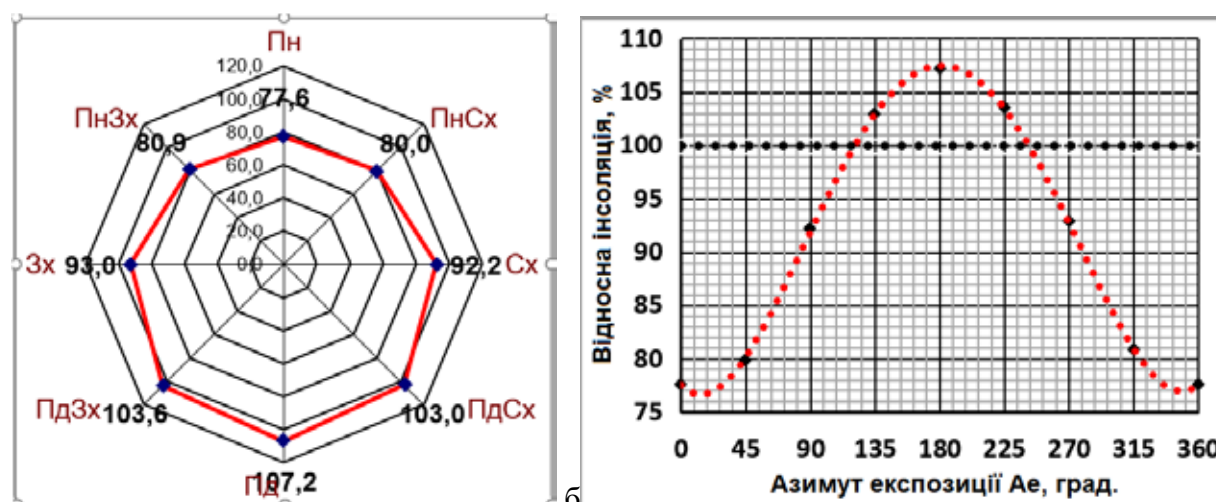


Рис. 6. Значення відносної денної інсоляції для відвальних схилів різних експозицій: а) пелюсткова діаграма; б) розгорнутий графік

Для вирішення першого завдання розраховали погодинні (з 600 до 1900) та середньомісячні (на 15 число) денні значення інсоляції з квітня по вересень на широті 48° (табл. 5).

Прийнявши середню денну інсоляцію щомісяця на плато за 100%, оцінили відмінності інсоляції схилів різних експозицій в інші місяці між собою та від рівної місцевості (рис. 7).

Як бачимо, у всі місяці схили можуть інсолюватися краще за плато, але в певних межах експозиції: квітень з Ае від 97° до 262°, серпень – від 100° до 260°, травень – від 110° до 250°, липень – від 114° до 245°, червень – від 120° до 245°, вересень – з Ае від 90° до 265°. Найменші відмінності інсоляції від плато мають місце у червні, найбільші – до 47% – у вересні.

Для вирішення другого завдання розрахунки, подібні до попередніх (для широти 48°), виконали для широт 23,5° (північний тропік), 30°, 40°, 60° та 70°, але тільки для рівної місцевості. Спочатку визначили значення висоти сонця на 10-те число червня та 15-те число інших місяців – для кожної години, починаючи з останніх негативних і закінчуючи першими негативними значеннями Нс. Розраховали погодинні значення інсоляції і середні денні (вони ж є середньомісячними) в інтервалі денного часу від 600 до 1900.

Відомо, що у загальному випадку максимальна висота сонця на задане число визначається рівнянням: $H_{с \max} = 90^\circ - \text{широта} + \text{сонячне схилення}$.

Сонячне схилення змінюється від $-23,5^\circ$ 23.XII до $+23,5^\circ$ 22.VI – у дні зимового та літнього сонцестояння. Найбільша

Значення інсоляції на схилах та плато у різні місяці

Місяці	Експозиція відвального схилу								
	Пд	ПдСх	Сх	ПдСх	Пд	ПдЗх	Зх	ПнЗх	Плато
Квітень	18,6	24,6	36,1	44,0	49,4	45,2	36,3	25,7	37,4
Травень	33,8	36,7	45	51,7	54,8	52,3	45,6	37,3	48,1
Червень	41,3	42,6	49,1	54,8	57,1	55,1	49,5	43,1	53,2
Липень	36,4	39	45,6	50,7	52,9	50,6	44,5	37,8	48,2
Серпень	24,5	30,2	40,6	48,6	53,2	48,6	40,5	30,1	42,4
Вересень	8,6	17,2	29,7	38,2	43,9	39,2	29,5	17,0	29,8
Середнє	27,2	31,7	41,0	48,0	51,9	48,5	41,0	31,8	43,18

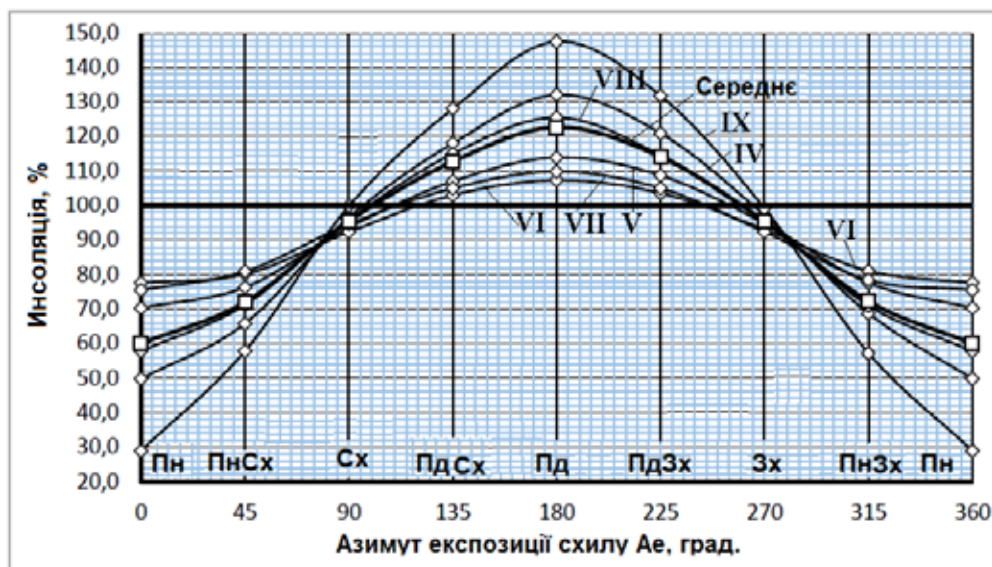


Рис. 7. Значення інсоляції на схилах різної експозиції у різні місяці та в середньому (у % від інсоляції на плато)

висота сонця влітку дорівнює 90° на широті $23,5^\circ$ (північний тропік). Максимальні (на 1230) та середні значення висоти сонця H_s з 600 по 1900 показані на рис. 8.

Варіювання інсоляції горизонтальної поверхні (плато) за місяцями та широтами Північної півкулі Землі дано на рис. 9 (ліворуч). Шляхом зіставлення даних табл. 5 із сімейством ліній на рис. 9 отримано графік (рис. 9 прав.), що показує, яким широтам півкулі (вертикальна вісь) відповідають за величиною інсоляції горизонтальної поверхні в середньому за квітень-вересень відвальні схили крутістю 35° на широті 48° залежно від їх експозиції (горизонтальна вісь). Для наочності лініями 1–3 виділено широти, що відповідають Північному тропіку ($23,5^\circ$ пн.ш.), центру Донбасу (48°) та Полярному колу ($66,5^\circ$).

Як бачимо, на схилах з експозицією на північ від ПнЗх і ПнСх ($A_e < 40^\circ$ і $A_e > 315^\circ$) надходження сонячної радіації аналогічне Заполяр'ю. На схилах ПнСхСх і Сх, Зх і ПнЗхЗх ($45^\circ < A_e < 110^\circ$ і $250^\circ < A_e < 315^\circ$) інсолюваність нижче, ніж на широті центру Донбасу. А на схилах експозицій ПдСх і ПдЗх ($110^\circ < A_e < 180^\circ$ і $180^\circ < A_e < 250^\circ$) інсолюваність вище, досягаючи на експозиції Пд субтропічних значень. У червні та липні інсолюваність тут набуває значення, якого немає на горизонтальних ділянках Землі навіть на тропіці.

Обговорення. На відміну від інших статей з якісною характеристикою лісорослинних умов на породних відвалах: вітчизняних (Shalyt & Kostomarov, 1950; Baklanov, 1970; Logginov et al., 1972; Zubova et al., 2015; Zubova et al., 2019; Korshikov & Zhukov; Zhukov, 2020; Pinder & Popovych, 2017; Popovych et al., 2018) та зарубіжних (Vacek et al., 2018; Prausová Ret al., 2017) в нашій роботі вперше надано кількісну оцінку локальних відмінностей інсоляції за різних експозицій, її динаміку протягом світлої частини доби, дано її осереднені показники для місяців вегетаційного сезону.

Висновки. В результаті досліджень запропоновано та апробовано авторську методику розрахунково-графічного визначення особливостей інсоляції крутих схилів, яка може використовуватися як для крутих відкосів породних відвалів вугільних шахт та інших підприємств гірничої та металургічної промисловості, так і для сільськогосподарських угідь. Використання методики у сукупності з натурними актинометричними спостереженнями свідчить, що лісорослинні умови на відвалах характеризуються дуже широким варіюванням, що робить їх за інсоляцією подібними умовам Землі від горизонтальних ділянок Заполяр'я до південних схилів на Північному

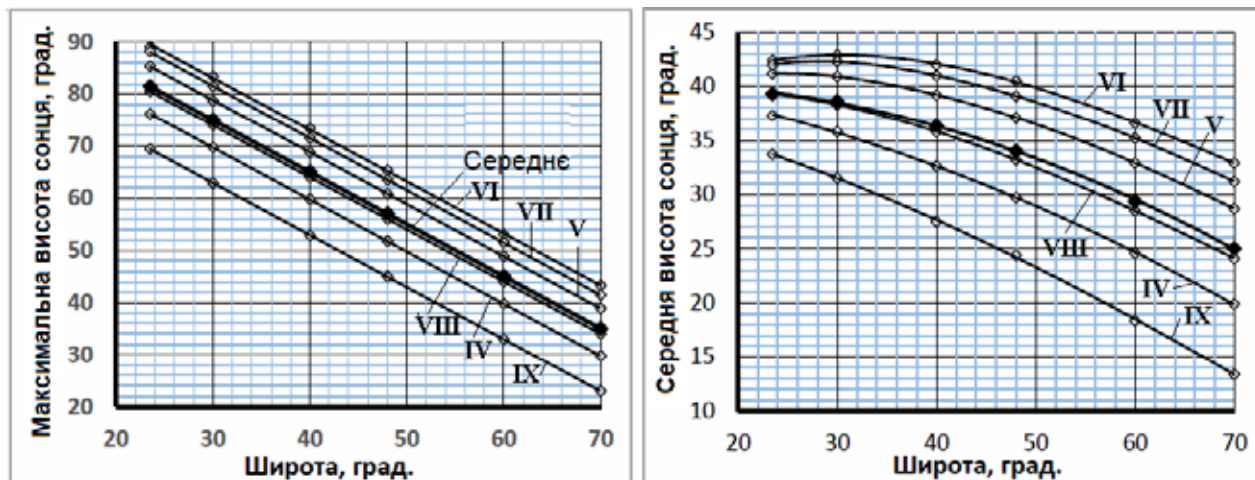


Рис. 8. Максимальні та середні місячні значення висоти сонця 22 червня залежно від широти місцевості

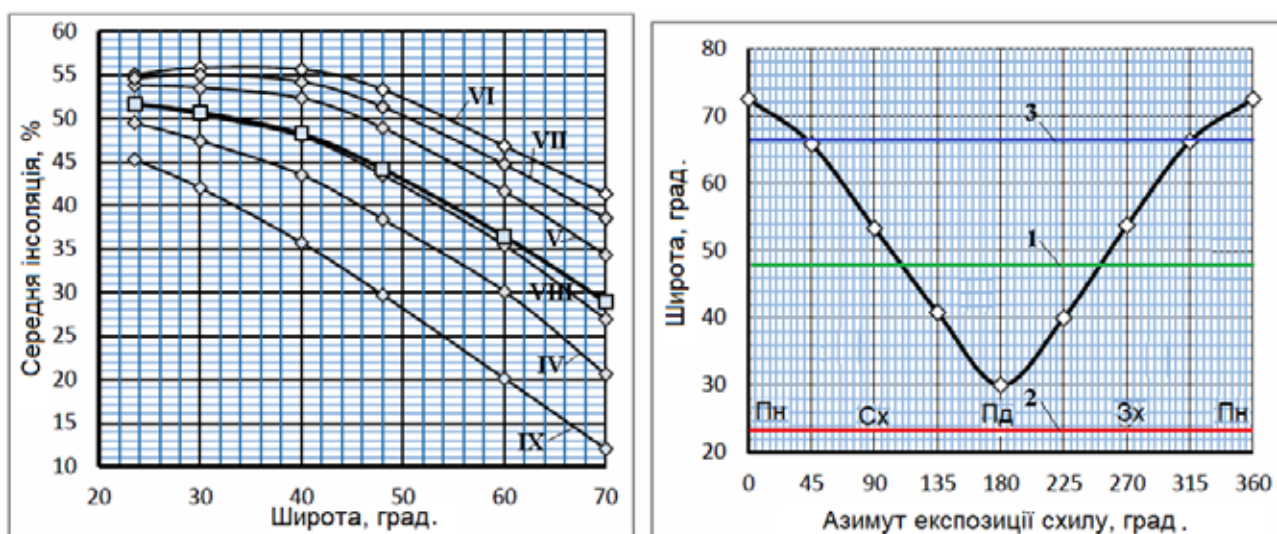


Рис. 9. Залежність середньої денної інсоляції горизонтальної поверхні у різні місяці від широти місцевості (ліворуч) та відповідність відвальних схилів різної експозиції ділянкам горизонтальної поверхні на різних широтах за величиною інсоляції: IV–XI – квітень-вересень, 1 – широта місця досліджень, 2 – Північний тропік, 3 – Полярне коло

тропіку. Говорити про повну ідентичність умов на відвальних схилах умовам різних географічних зон лише на підставі відмінностей в інсоляції не можна. Однак останні істотно впливають на танення снігу та його випаровування, на температуру породи та випарову-

вання вологи з неї, ґрунтоутворювальні процеси. Все це відбивається на умовах зростання деревних культур на різних схилах, змушує підбирати состав деревинних порід при залісненні відвалів з урахуванням їх посухостійкості та світлолюбності.

Бібліографічні посилання:

1. Alekseenko, V.A., Bech, J., Alekseenko, A.V. & Shvydkaya, N.V. (2018). Environmental impact of the disposal of coal mining waste in soils and plants in the Rostov Oblast, Russia Journal of Geochemical Exploration Volume 184, Part B, January, 261–270. doi: 10.1016/j.gexplo.2017.06.003
2. Anis, M.S., Jamil, B., Ansari, M.A. & Bellos, E. (2019). Generalized models for estimation of global solar radiation based on sunshine duration and detailed comparison with the existing: a case study for India. Sustain Energy Technol Assess, 31, 179–198. doi: 10.1016/j.seta.2018.12.009
3. Gupta, A. K. & Biswajit, P. (2015). Ecorestoration of Coal Mine Overburden Dump to Prevent Environmental Degradation: A Review. Research Journal of Environmental Sciences, 9, 307–319. doi: 10.3923/rjes.2015.307.319.
4. Aoun, N., Bouchouicha, K. & Bailek, N. (2019). Seasonal performance comparison of four electrical models of monocrystalline PV module operating in a harsh environment. IEEE J Photovoltaics. 9(4), 1057–1063. doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2917272.

5. Badesku, V. (2008). Modeling solar radiation at the Earth surface. Berlin: Springer, 517. doi: 10.1007/978-3-540-77455-6.
6. Bailek, N., Bouchouicha, K., Al-Mostafa, Z., El-Shimy, M., Aoun, N., Slimani, A., Al-Shehri, S. (2018). A new empirical model for forecasting the diffuse solar radiation over Sahara in the Algerian Big South. *Renew Energy*, 117, 530–537. doi: 10.1016/j.renene.2017.10.081.
7. Bailek, N., Bouchouicha, K., Abdel-Hadi, Yasser A., El-Shimy, Mohamed, Slimani, A., Jamil, B.t & Djaafari, A. (2020). Developing a new model for predicting global solar radiation on a horizontal surface located in Southwest Region of Algeria, *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 9(1), 341–349, doi: 10.1080/20909977.2020.1746892.
8. Baklanov, V. I. (1970). Rastitel'nye usloviya terikonov Donbassa [Vegetative conditions of waste heaps of Donbass] / V kn. *Introdukciya rasteni i zelenoe stroitel'stvo v Donbasse*. Nauk. dumka, K., 15–25 (in Russian).
9. Baliuk, S.A., Danylenko, A.S. & Furdychko, O.I. (2017). Zvernennia do kerivnytstva derzhavy shchodo podolannia kryzovoi sytuatsii u sferi okhorony zemel [Appeal to the state leadership on overcoming the crisis situation in the field of land protection]. *Visnyk ahrarnoi nauky*, 11, 5–8. (in Ukrainian).
10. Chugh, Y. P. & Behum, P. T. (2014). Coal waste management practices in the USA: an overview *Int Coal Sci Technol*, 1, 163–165. doi: 10.1007/s40789-014-0023-4.
11. Gawor, L. (2014). Coal mining waste dumps as secondary deposits – examples from the Upper Silesian Coal Basin and the Lublin Coal Basin *Geology, Geophysics and Environment*, 40 (3), 285–289. doi: 10.7494/geol.2014.40.3.285.
12. Geissen, V., Mol, H., Klumpp, E., Umlauf, G., Nadal, M., van der Ploeg, M., van de Zee, S.E.A.T.M. & Ritsema, C.J. (2015). Emerging pollutants in the environment: A challenge for water resource management. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(1), 57–65. doi: 10.1016/j.iswcr.2015.03.002.
13. Dong, X., Mace, G. G. (2003). Macearctic Stratus Cloud Properties and Radiative Forcing Derived From Ground-Based Data Collected at Barrow, Alaska. *J. Climate*, 16, 445–461. doi: 10.1175/1520-0442(2003)016<0445:ASCPAR>2.0.CO;2
14. Khrgian, A.H. (1958) *Fizika atmosfery*. Izdanie 2-e pererabotannoe. Gos. Izd-vo fiziko-matematicheskoy literatury, Moskva, 466. (in Russian)
15. Kirichek, L.S. (2003). Tipologiya terikoniv vugil'nih shaht Donbasu za lisoroslinnimi umovami [Typology of waste heaps of Donbass coal mines according to forest conditions]. *Naukovij visnik UkrDLTU*, 13.3, 123–127 (in Ukrainian).
16. Kondrat'ev, K.Ya., Pivovarova, Z.I., & Fedorova, M.P. (1978). Radiacionnyj rezhim naklonnyh poverhnoстей [Radiation regime of inclined surfaces]. *Gidrometeoizdat*, L., 216.
17. Korshikov, I.I. & Zhukov, S.P. (2008). Samovozobnovlenie drevesnyh rastenij na otvalah ugol'nyh shaht Donbassa [Self-renewal of woody plants on dumps of Donbass coal mines]. *Promyshlennaya botanika*, 8, 17–23 (in Russian).
18. Kumar, L., Skidmore, A. & Knowles, E. (1997). Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. *Intern. J. of GIS*, 11(5), 475–497. doi: 10.1080/136588197242266.
19. Lai, Y.J., Chou, M.D. & Lin, P.H. (2010). Parameterization of topographic effect on surface solar radiation *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 115. D01104, 11. doi: 10.1029/2009JD012305.
20. Logginov, B.J., Kirichek, L.S. & Korec'kij, G.S. (1972) Umovi rostu lisonasadzhen' ta rezul'tati doslidiv na terikonah Donbasu [Conditions for the growth of forest plantations and the results of research on waste heaps of Donbass] / *Naukovi praci USGA*, Vip. 64. C. 39–45 (in Ukrainian).
21. Marcisz, M., Probiez, K. & Gawor, Ł. (2020). Possibilities of reclamation and using of large-surface coal mining dumping grounds in Poland. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*, 36(1), 105–122. doi: 10.24425/gsm.2020.132546
22. Morgunov, V.K. (2005). *Osnovy meteorologii, klimatologii. Meteorologicheskije pribory i metody nablyudenij: Uchebnik* [Fundamentals of meteorology, climatology. Meteorological Instruments and Methods of Observation: Textbook]. Rostov/D., Feniks – Novosibirsk, Sibirskoye otdeleniye, 331 (in Russian).
23. Muzathik, A.M., Ibrahim, M.Z., Samo, K.B. & Nik, W.B.W. (2011). Estimation of global solar irradiation on horizontal and inclined surfaces based on the horizontal measurements. *Energy*, 36(2), 812–818. doi: 10.1016/j.energy.2010.12.035.
24. Nevidimova, O.G. & Kuznecov, A.S. (2015). Morfometricheskaya differenciatsiya plotnosti gelioursa na severnom makrosklone Severo-Chujskogo hrebtu (Gornyj Altaj) [Morphometric differentiation of solar resource density on the northern macroslope of the Severo-Chuysky ridge (Gornyj Altaj)] *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. № 2 (chast' 2) URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=21540> (in Russian).
25. Olmo, F.J., Vida, J., Foyo, I., Castro-Diez, Y. & Alados-Arboledas, L. (1999). Prediction of global irradiance on inclined surfaces from horizontal global irradiance. *Energy*, 24(8), 689–704. doi: 10.1016/S0360-5442(99)00025-0
26. Pandey, B., Madhoolika, A. & Singh, S. (2014). Effects of Coal Mining Activities on Soil Properties with Special Reference to Heavy Metals. *Conference Paper*, 369–372. doi: 10.1007/978-3-319-18663-4_56
27. Petlovanyi, M.V., Medianyuk V.Yu. (2018). Assessment of coal mine waste dumps development priority. *Naukovyi Visnyk NHU*, No. 4, 28-35 ISSN 2071-2227, doi: 10.29202/nvngu/2018-4/3.
28. Pinder, V.F., Popovych V.V. (2017). Rekul'tyvatsiya porodnykh vidvaliv likvidovanykh shakht L'vivs'ko-Volyns'koho vuhil'noho baseynu. [Reclamation of mine waste dumps of liquidated mines in Lviv-Volyn coal basin], *Naukovyy visnyk NLTU Ukrainy*, 27(3), 27 (3), 113–116. doi: 10.15421/40270325 (in Ukrainian).
29. Pluss, C. & Ohmura, A. (1997). Longwave Radiation On Snow-Covered Mountainous Surfaces. *J. Appl. Meteor*, 36, 818–824. doi: 10.1175/1520-0450-36.6.818
30. Popovich, V.V., Pidgorodec'kij, Ya. I. & Pinder, V.F. (2016). Tipologiya terikoniv L'vivs'ko-Volyns'koho vugil'nogo baseynu [Typology of waste heaps of the Lviv-Volyn coal basin]. *Naukovij visnyk NLTU Ukrainy*, 26.8, 238–243. doi: 10.15421/40260837 (in Ukrainian).

31. Popovych, V. (2019). Features of temperature and humidity conditions of extinguishing waste heaps of coal mines in spring. *News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences*, 4(436), 230 – 237. doi: 10.32014/2019.2518-170X.118.
32. Popovych, V., Kuzmenko, O., Voloshchynshyn, A. & Petlovanyi, M. (2018). Influence of man-made edaphotopes of the spoil heap on biota. *E3S Web of Conferences*, 60. 00010. doi: 10.1051/e3sconf/20186000010.
33. Prausová Romana, Štefánek Michal, Rauch Ota, Kovář Pavel (2017). Trees as ecosystem engineers driving vegetational restoration/retrogradation of industrial deposits in cultural landscape. *Journal of Landscape Ecology*, 10(2), 122–131. doi: 10.1515/jlecol-2017-0015
34. Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M. & Pennock, D. (2018). *Soil Pollution: a hidden reality*. Rome, FAO, 142. URL: <http://www.fao.org/3/i9183en/i9183en.pdf>.
35. Shalyt, M.S. & Kostomarov, V.I. (1950). Opytnoe ozelenenie terrikonikov Donbassa [Experimental landscaping of waste heaps in Donbass]. *Doklady AN USSR*. T.5, 399–404 (in Russian).
36. Sidorenko, S.V., Korsovec'kii, V.O., Sidorenko, S.G. & Gladun, G.B. (2020). Sezonne ta dobove formuvannya zoni zatinnennya v priuzliski chastini shchil'nih polezahisnih lisovih smug [Seasonal and daily formation of a shading zone in the marginal part of dense field-protective forest belts]. *Lisivnictvo i agrolisomelioraciya*, 136, 83–95. doi: 10.33220/1026-3365.136.2020.83. (in Ukrainian).
37. Simonov, Yu.G. (1958). Raspredelenie solnechnoj energii po sklonam razlichnoj krutizny i ekspozicii v ravninnyh usloviyah [Distribution of solar energy on slopes of various steepness and exposure in flat conditions]. *Uchenye zapiski. M., Izd-vo MGU*, 197–203 (in Russian).
38. Sivkov, S.I. (1968). *Metody rascheta harakteristik solnechnoj radiacii* [Methods for calculating the characteristics of solar radiation]. – L.: Gidrometeoizdat. 232 p. [In Russian].
39. Skliar, V.H. (2015). *Ekolohichna fiziologhiia roslin: pidruchnyk* [Ecological physiology of plants: a textbook] / za zah. red. Yu.A. Zlobina. Universytetska knyha, Sumy, 271 (in Ukrainian).
40. Sokolova, G.G. (2016). The influence of terrain altitude, slope exposure and slope degree on plant spatial distribution. *Acta Biologica Sibirica*, 2(3), 34–45. doi: 10.14258/abs.v2i3.1453 (in Russian).
41. Vacek, Z., Cukor, J., Vacek, S., Podrázský, V., Linda, R. & Kovařík, J. (2018). Forest biodiversity and production potential of post-mining landscape: opting for afforestation or leaving it to spontaneous development? *Central European Forestry Journal*, 64 116–126. doi: 10.1515/forj-2017-0036
42. Williams, L. D., Barry, R. G. & Andrews, J. T. (1972). Application of computed global radiation for area of high relief. *J. Appl. Meteor.*, 11, 526–533. doi: 10.31163/2618-964X-2020-3-3-412-417
43. Yingyi Chen, Yijun Jiang, Hu Wang & Daoliang Li. (2007). Assessment of ambient air quality in coal mine waste areas – a case study in Fuxin, China. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, vol. 50, 1187–1194. doi: 10.1080/00288230709 510401
44. Yucel, S. D., Yucel, M. A. & Ileri, B. (2017). Monitoring metal pollution levels using the GIS. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Volume IV / W4*, 2017 4th International GeoAdvances Workshop, 14–15 October, Safranbolu, Karabuk, Turkey, 335–338. doi: 10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-335-2017
45. Zástěrová, P., Marschalko, M., Niemiec, D., Durd'ák, J., Bulko, R. & Vlšek, J. (2015). Analysis of Possibilities of Reclamation Waste Dumps after Coal Mining. *Procedia Earth and Planetary Science* 15 656–662. doi: 10.1016/j.proeps.2015.08.077
46. Zhukov, S.P. (2020). Drevesnye rasteniya na porodnyh otvalah Donecko-Makeevskoj gorodskoj aglomeracii [Woody plants on waste dumps of the Donetsk-Makeevka urban agglomeration]. *Ekobiotech. Tom 3, № 3*, S. 412-417. DOI: 10.31163/2618-964X-2020-3-3-412-417 (in Russian).
47. Zillig, Lisa J. K., Keenan, N. & Roberts, T. (2015). Mining Rehabilitation in New South Wales (Australia) and Germany. *Journal of Earth Science and Engineering* 5, 499–511. doi: 10.17265 / 2159-581X / 2015.08.005
48. Zubov, O.R., Zubova, L.G. & Zubov, A.O. (2019). Ocinyuvannya vplivu terikoniv na ekologichnij stan agrolandshaftiv [Assessing the influence of waste heaps on the ecological state of agricultural landscapes]. *Naukovij visnik NLTU Ukraini. L'viv.*, 29(9), 50–59. doi: 10.36930/40290909 (in Ukrainian).
49. Zubova, L.G., Zubov, O.R. & Zubov, A.O. (2019). Analiz stanu lisovih nasadzhen' na terikonah [Analysis of the state of forest plantations on the terricons]. *Tavrijs'kij naukovij visnik. Herson*, 110, 141–151. doi: 10.32851/2226-0099.2019.110-2.22. (in Ukrainian).
50. Zubova, L.G., Zubov, A.R., Zubov, A.A., Kharlamova, A.V., Vorob'yev, S.G., Makarishina, Yu.I. & Buniachenko, V.V. (2015). *Terrikony: Monografiya* [Waste dumps: Monograph]. Lugansk: Noulidzh. 712. (in Russian). URL: <http://www.geokniga.org/books/16806>.

Zubov A.O., PhD (Technical Sciences), Doctoral Student, Institute of Agroecology and Nature Management, Kyiv, Ukraine

Zubov O.R., Doctor (Agricultural Sciences), Professor

Features of the arrival of solar radiation on the slopes of waste dumps as a factor in the forest conditions of their surface

The purpose of the study is to determine the temporal differences in the elements of the radiation balance on the steep slopes of the rock dumps of mining enterprises, depending on their exposure. To achieve this goal, the following tasks were solved: to establish the spatial and temporal patterns of changes in the insolation of dump slopes as the main element of the incoming part of their radiation balance; to assess the insolation of slopes of different exposures in general for the warm season (vegetation period) and monthly; to compare the insolation of the slopes of the dumps of the Donetsk coal basin and flat terrain in other natural and climatic zones of the Earth. The studies were carried out on the basis

of the developed formula for the angle of incidence of sunlight on slopes of different steepness, depending on the latitude of the area, the date and hour of the day, and the exposure azimuth of the studied slope area. The difference from similar studies was the consideration of the attenuation of direct radiation during the passage of the atmosphere at different angles of incidence of solar rays on a horizontal surface. On the basis of actinometric measurements, a formula was obtained for the decrease in direct radiation relative to its maximum value, which takes place on June 22 at noon.

As a result of the research, it was found that the daily insolation of the June day, starting from the exposure azimuth of the slope A_e from 120° to 230° , is higher than on the plateau (horizontal surface) up to 7.2% in the south. In all other months, the slopes can also be insolated better than the plateau, but within certain exposure limits: April at A_e from 97° to 262° , August – from 100° to 260° , May – from 110° to 250° , July – from 114° up to 245° , September – at A_e from 90° to 265° . The greatest differences in insolation from the plateau occur in September – up to 47%.

It was established that on average for April-September, on slopes with a steepness of 35° at a latitude of 48° with an exposure between NW and NE ($A_e = 315-40^\circ$), the influx of solar radiation is similar to the Arctic. On slopes with $A_e = 45-110^\circ$ and $A_e = 250-315^\circ$ the insolation is lower than at the latitude of the center of Donbass (48°). And on the slopes of exposures with $A_e = 110-180^\circ$ and $A_e = 180-250^\circ$, the insolation is higher, reaching subtropical values at exposure S ($A_e = 180^\circ$). In June and July, insolation here acquires a significance that is not even found in the tropics. The established differences in insolation on the slopes of dumps are significantly reflected in the conditions for the growth of different types of vegetation on them. Therefore, the use of the author's method for determining the features of slope insolation will allow more correctly selecting the composition of tree species during afforestation of dumps, taking into account their drought resistance and light-loving nature.

Key words: waste dump, slope, radiation balance, insolation.