

# Оцінка ступеню відновлення індустриальних ландшафтів на основі біомасових характеристик рослинності та тривимірного моделювання ґрунтового покриву

ТЕТЯНА МИКОЛАЇВНА ПРИСЯЖНЮК  
ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ ДОЛИНА  
АНАТОЛІЙ МИКОЛАЙОВИЧ БОНДАРЕНКО

PRISYAZHNYUK T.M., DOLINA O.O., BONDARENKO A.M. (2019). **Estimation of the degree of industrial landscapes restoration based on biomass vegetation characteristics and three-dimensional soil cover modeling.** *Chornomors'k. bot. z.*, **15** (4): 351–361. doi: 10.32999/ksu1990-553X/2019-15-4-4

The soil cover structure and biomass characteristics of the phytocenoses in ArcelorMittal Kriviy Rih waste dump were studied. Soil cover structure and soil contour parameters were detailed using 3D-modelling. The use of the 3D-modelling is more objectively in contrast of mapping for industrial landscapes characterization. It confirms by increasing of object area by 50%. The waste dump area, according to the map is 38 ha, account for, and it is 55 ha according to 3D-model, the correction factor is 1.44. Confirmed, that 3D-modelling is necessary to predict the industrial objects self-recovery intensification and dynamics. It also useful to assess the quality of fertile and potentially fertile soils applying to waste dump survey. Structure of soil cover at waste dump is represented by combinations of primitive soils which have different genesis and depth with rocky substrates. More developed soils are situated on clay substrates. Phytocenoses with domination of *Koeleria cristata*, *Achillea nobilis* and *Lathyrus tuberosus* are adapted to survive and distribute on waste dumps with clay cover. Plant communities with *Securigera varia*, *Hieracium echioides* and *Poa angustifolia* domination are adapted to the stone substrates. Phytocenoses with *Koeleria cristata* domination are forming the biggest biomass (103.4 g/m<sup>2</sup>) on clays. The most biomass formed in *Securigera varia* phytocenoses – 20,9 g/m<sup>2</sup> on the stone substrates. The average biomass of the grass phytocenoses on waste dumps for clay soils are 21.8 g/m<sup>2</sup>, and for stone substrates are 6.9 g/m<sup>2</sup>.

*Keywords:* geo-information technologies, waste dump, substrate, primitive soils, biomass, phytocenoses

ПРИСЯЖНЮК Т.М., ДОЛИНА О.О., БОНДАРЕНКО А.М. (2019). **Оцінка ступеню відновлення індустриальних ландшафтів на основі біомасових характеристик рослинності та тривимірного моделювання ґрунтового покриву.** *Чорноморськ. бот. ж.*, **15** (4): 351–361. doi: 10.32999/ksu1990-553X/2019-15-4-4

Досліджено структуру ґрунтового покриву та біомасові показники рослинних угруповань відвалу гірничо-збагачувального виробництва АрселорМіттал Кривий Ріг. Деталізацію структури ґрунтового покриву та параметрів контурів виконано з використанням тривимірного моделювання. Використання тривимірного моделювання порівняно з картуванням для опису саме індустриальних ландшафтів дає об'єктивніші результати, що відображається у зростанні площі моделі майже на 50%. Зокрема, для досліджуваного відвалу площа за картографічною моделлю становить 38 га, а за тривимірною моделлю – 55 га, відповідно, поправочний коефіцієнт складає 1,44. Доведено, що застосування об'ємних моделей необхідне для прогнозування динаміки та шляхів прискорення самозаростання техногенних об'єктів, а також для оцінки якості виконання нанесення родючих та потенційно родючих порід на поверхню техногенно порушених територій. Структура ґрунтового



покриву відвалу представлена комбінаціями примітивних ґрунтів різного генезису і потужності з суцільно кристалічними та кам'янистими субстратами. Більш розвинуті ґрунти приурочені до ділянок, відсипаних глинистими або суглинистими гірськими породами. Виходячи з показників біомаси рослинних угруповань, найбільш пристосованими для виживання та розповсюдження на техногенних субстратах, представлених суглинками, є фітоценози з домінуванням *Koeleria cristata*, *Achillea nobilis* та *Lathyrus tuberosus*, а для субстратів, складених переважно кам'янистими уламками – *Securigera varia*, *Hieracium echinoides* та *Poa angustifolia*. Угруповання *Koeleria cristata* формують найбільшу біомасу на суглинках – 103,4 г/м<sup>2</sup>. На уламках залістистих кварцитів та сланців найбільша кількість біомаси утворюється у фітоценозах з домінуванням *Securigera varia* – 20,9 г/м<sup>2</sup>. Середні показники біомаси трав'янистих угруповань індустриальних територій становлять для суглинистих порід – 21,8 г/м<sup>2</sup>, для скельних – 6,9 г/м<sup>2</sup>.

*Ключові слова:* геоінформаційні технології, відвал, субстрат, примітивні ґрунти, біомаса, фітоценоз

ПРИСЯЖНЮК Т.М., ДОЛИНА А.А., БОНДАРЕНКО А.Н. (2019). **Оценка степени восстановления индустриальных ландшафтов на основе биомассового характеристик растительности и трехмерного моделирования почвенного покрова.** *Черноморск. бот. ж.*, **15** (4): 351–361. doi: 10.32999/ksu1990-553X/2019-15-4-4

Исследована структура почвенного покрова и биомассовые показатели растительных сообществ отвала горно-обогадительного производства АрселорМиттал Кривой Рог. Детализация структуры почвенного покрова и параметров контуров проведена с помощью трехмерного моделирования. Использование трехмерного моделирования в сравнении с картированием для описания именно индустриальных ландшафтов позволяет получить более объективные результаты, что отражается в увеличении площади модели почти на 50%. В частности, для исследуемого отвала площадь согласно картографической модели составляет 38 га, а по трехмерной модели – 55 га, соответственно, поправочный коэффициент составляет 1,44. Доказано, что использование объемных моделей необходимо для прогнозирования динамики и путей интенсификации самозарастания техногенных объектов, а также для оценки качества нанесения плодородных и потенциально плодородных пород на поверхность техногенно нарушенных территорий. Структура почвенного покрова отвала представлена комбинациями примитивных почв разного генезиса и мощности с целюно-кристаллическими и каменистыми субстратами. Более развитые почвы приурочены к участкам, отсыпанным глинистыми или суглинистыми горными породами. Исходя из показателей биомассы растительных сообществ, наиболее приспособленными для выживания и распространения на техногенных субстратах, представленных суглинками, являются фитосообщества с доминированием *Koeleria cristata*, *Achillea nobilis* и *Lathyrus tuberosus*, а для субстратов сложенных преимущественно каменистыми породами – *Securigera varia*, *Hieracium echinoides* и *Poa angustifolia*. Сообщества *Koeleria cristata* формируют наибольшую биомассу на суглинках – 103,4 г/м<sup>2</sup>. На обломках железистых кварцитов и сланцев наибольшее количество биомассы образуется в фитосообществах с доминированием *Securigera varia* – 20,9 г/м<sup>2</sup>. Средние показатели биомассы травянистых сообществ индустриальных территорий составляют для суглинистых пород – 21,8 г/м<sup>2</sup>, для скальных – 6,9 г/м<sup>2</sup>.

*Ключевые слова:* геоинформационные технологии, отвал, субстрат, примитивные почвы, биомасса, фитосообщество

На сьогодні інтенсивно ведеться видобуток і переробка рудних корисних копалин. Однією з головних проблем, що виникають під час розробки залізних руд, є величезні маси розкритих гірських порід, четвертинних відкладів та некондиційних залізних руд, що складують у відвалах [TRUBETSKOY et al., 1994]. Первинний ґрунтовий покрив даних територій повністю знищений або докорінно трансформований, а сучасний – представлений строкатими структурами та характеризується несприятливими фізико-хімічними і фізико-механічними властивостями [DOLINA,

СМЕТАНА, 2014]. Відновлення саме ґрунтового покритву техногенних об'єктів є основою для повернення колишніх індустріальних територій у навколишнє природне середовище, а також для запобігання негативному впливу від них прилеглим ділянкам. Актуальним питанням сьогодення є вивчення структури ґрунтового покритву техногенних ландшафтів, динаміки та шляхів прискорення їх генезису.

Через кілька років після створення відвалу можливе значне його відхилення від норми, яка фіксується у проектно-технічній документації. Основна причина цього полягає у відсутності реальної ресурсно-інформаційної моделі індустріальної території, яка має враховувати вплив природних (наприклад, вивітрювання, тектонічні, гравітаційні або сейсмічні процеси) та техногенних процесів (досипання відвалу). Саме тому необхідним є створення геоінформаційних моделей відвалів гірських порід та інших техногенних об'єктів для подальшого уникнення екологічних катастроф.

Для дослідження, опису та візуалізації техногенних об'єктів доцільно використовувати не лише картографічний метод, але і тривимірне моделювання, яке дає більш детальну інформацію при диференціації та територіальному розподілі елементарних ґрунтових ареалів та ґрунтового покритву через наявність суттєвого висотного градієнту, порівняно з природними територіями, характерного індустріальним ландшафтам. Через значні перепади висот техногенні ландшафти являють собою утворення з послідовним чергуванням плоских поверхонь та схилів, отже при зображенні їх за допомогою карт спостерігається суттєве відхилення площі об'єктів на карті від їх реальної площі.

Важливим показником ступеню відновлення порушених земель, «індикатором» процесу їх повернення до ландшафтно-структури регіону є інтенсивність формування сталого рослинного покритву. Основу рослинного покритву техногенно трансформованих земель Криворіжжя складає рослинність, що спонтанно формується на залізородних відвалах, так як рекультиваційні заходи останнім часом практично не проводяться [СМЕТАНА et al., 1997].

Багатьма дослідниками встановлено, що продуктивність фітоценозів гірничопромислових ландшафтів залежить від едафічних умов (зокрема засоленість, кам'янистість субстрату, тип водного режиму, наявності поживних речовин тощо) та від біологічних особливостей виду-домінанта [ZVONKOVA, 1970; ЕКОЛОГІЧЕСКИЕ ..., 1985; DENISIK, 1998].

Загальні еколого-фітоценотичні зв'язки техногенно-порушених комплексів оцінюються за допомогою складного набору інтегральних та диференціальних параметрів, серед яких важливе місце займає продуктивність. Продуктивність у своєму вторинному аспекті (після витрат на дихання та деструкції фауною) може бути виражена через біомасу. Не викликає сумніву те, що біомаса є основним кількісним показником стабільності екосистеми. Дані про надземну продукцію рослин є фундаментом дослідження багатьох проблем лісового господарства та екології. Точне кількісне визначення біомаси є надзвичайно важливим для вивчення зміни клімату, продуктивності екосистеми та кругообігу поживних речовин [WANG et al., 2018]. Проте внаслідок деградації земель та порушення ґрунтового покритву під час розробки залізних руд актуальними залишаються питання різкого зниження біомаси рослин та видового різноманіття на даних територіях.

Втрата біорізноманіття є головною глобальною проблемою, яка прискорюється внаслідок надмірного використання та забруднення навколишнього середовища. Більшість вчених у своїх роботах досліджують вплив різних факторів на зміни біорізноманіття. Зокрема, деякі вчені вважають, що на рослинне різноманіття та екосистемні функції може впливати надмірна кількість поживних речовин у ґрунті. У статті даних авторів зазначено, що азот є глобальною і зростаючою загрозою для біорізноманіття, так як він може призводити лише до підвищення продуктивності [DIAS

et al., 2014]. Колектив китайських вчених навпаки, зазначає, що збільшення азоту не завжди призводить до збільшення надземної біомаси [JUNFU et al., 2016]. Відмінності у проведених експериментах можуть спостерігатись внаслідок дослідження різних видів рослин та типів екосистем.

У сучасних наукових працях висвітлюються проблеми взаємозв'язку між біорізноманіттям та продуктивністю. Проте це питання є досить суперечливим. Багато досліджень допомогли виявити, що функціональні характеристики (функціональне домінування та функціональне різноманіття) є ключовим компонентом, який пояснює продуктивність краще, ніж таксономічне різноманіття. Останні експерименти виявили, що функціональне домінування є більш важливим у продуктивності рослинних угруповань, ніж біорізноманіття [ZHANG et al., 2017].

Також вчені зосереджені на дослідженні співіснування рослин на видовому рівні. Слід зазначити, що внутрішньовидові взаємодії також є важливими для структури рослинних угруповань [BUKOWSKI, PETERMANN, 2014]. Дослідники встановили, що види, які з'являються першими в середовищі існування є пріоритетними та впливають на функціонування наступних видів, і таким чином визначають властивості екосистем [GILLHAUSSEN et al., 2014]. Відомо, що рослини з родини бобових (Fabaceae) є «інженерами» екосистем. Бобові підвищують родючість ґрунту, оскільки на їх коренях селяться бульбочкові бактерії, що засвоюють атмосферний азот. Тому при низькому початковому вмісті поживних речовин або високому впливу на навколишнє середовище ці культури можуть позитивно впливати не тільки на продуктивність, але й на виживання та встановлення інших видів.

Також, крім зниження біорізноманіття, актуальною є проблема втрати ґрунтових ресурсів внаслідок трансформації ландшафту [XIAO et al., 2016]. Науковці детально вивчають процеси міграції хімічних елементів у ґрунті, зміни ґрунтових властивостей у відповідь на антропогенну діяльність [ZHANG et al., 2014; SCHOLL et al., 2013; SCHIRRMANN et al., 2011]. Для узагальнення та відображення отриманих результатів використовують різні методи картування та моделювання [YAO et al., 2016; ZHANG et al., 2014]. Надійна та реальна інформація про властивості ґрунту є важливою для розвитку практики управління існуючими екологічними проблемами [YAO et al., 2016].

З розвитком інформаційних технологій актуальними стають питання просторового моделювання ґрунту, створення віртуального ландшафту для оцінки ризиків і прийняття рішень [HOLLAND et al., 2007; PENG et al., 2015]. Картографічний метод відображення особливостей структури ґрунтового покриву за допомогою геоінформаційних технологій є поширеним способом подання просторової інформації. Зокрема, розроблено швидкий, недорогий і точний метод відображення забруднення ґрунтів за допомогою карт з використанням даних ГІС та геостатичної просторової інтерполяції [SUN et al., 2016]. Також побудовано ґрунтові карти, що поєднують класифікацію з географічними даними ґрунту [GROENENDYK et al., 2015].

Використання даних дистанційного зондування як вторинних джерел інформації в цифровому картографуванні ґрунтів є економічно ефективним і менш трудомістким у порівнянні з традиційними підходами для картографування ґрунтів. Зважаючи на це, було досліджено використання супутникових даних для відображення просторового розподілу властивостей ґрунту [FORQUOR et al., 2017]. Деякі вчені займаються створенням глобальної 3-D інформаційної системи ґрунту, яка надає загальні прогнози для стандартних чисельних властивостей ґрунту. У своїй статті вони запропонували метод веб-просторового сервісу для управління екологічними даними [HENGL et al., 2014; HENGL et al., 2017].

Серед вітчизняних дослідників найбільша увага при вивченні техногенних ландшафтів приділялась способам їх рекультивації [BULAVA, 1998; ETEREVSKA, 1977], а також оптимізації їх ґрунтового і рослинного покриву з метою проведення успішного

озеленення та оптимізації відновлення біорізноманіття [DOVROVLSKIY, 1979]. Також слід відзначити роботи, присвячені вивченню та реалізації потенціалу наземних екосистем [GOLUBETS, 2003]. Більш детально специфічність структур ґрунтового покриву Кривбасу описано у роботах місцевих дослідників [DOLINA, SMETANA, 2014]. У ряді публікацій описані структура та закономірності формування трав'янистого рослинного покриву порушених територій [SMETANA et al., 2012, SMETANA et al., 2013].

Отже, метою даної роботи є дослідження ефективності використання тривимірного моделювання індустриальних ландшафтів порівняно з картографічним методом (на прикладі Бурщицького відвалу збагачувального виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг») та визначення продуктивності сформованих на відвалах фітоценозів.

### **Матеріали та методи досліджень**

Дослідження структури ґрунтового покриву проводили на Бурщицькому відвалі збагачувального виробництва ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг". Територія дослідження була обрана виходячи з того, що на зазначеному відвалі спостерігається типовий розподіл ґрунтових та геохімічних контурів, характерний для більшості відпрацьованих відвальних комплексів Криворізького залізорудного басейну.

В процесі виконання робіт було зроблено близько ста ґрунтових розрізів та прикопок. Зважаючи на те, що на сьогодні немає єдиної загальноприйнятої класифікації для ґрунтів техногенних та посттехногенних територій, у роботі ми застосували систему, розроблену О.О. Долиною та О.М. Сметаною з використанням актуальних та загально прийнятих розробок [NAZARENKO et al., 2004; TYCHONENKO, 2001; FRIDLAND, 1984], яка найбільш повно відображає ґрунтове різноманіття саме індустриальних ландшафтів та обґрунтовано виділення примітивних ґрунтів як окремого типу.

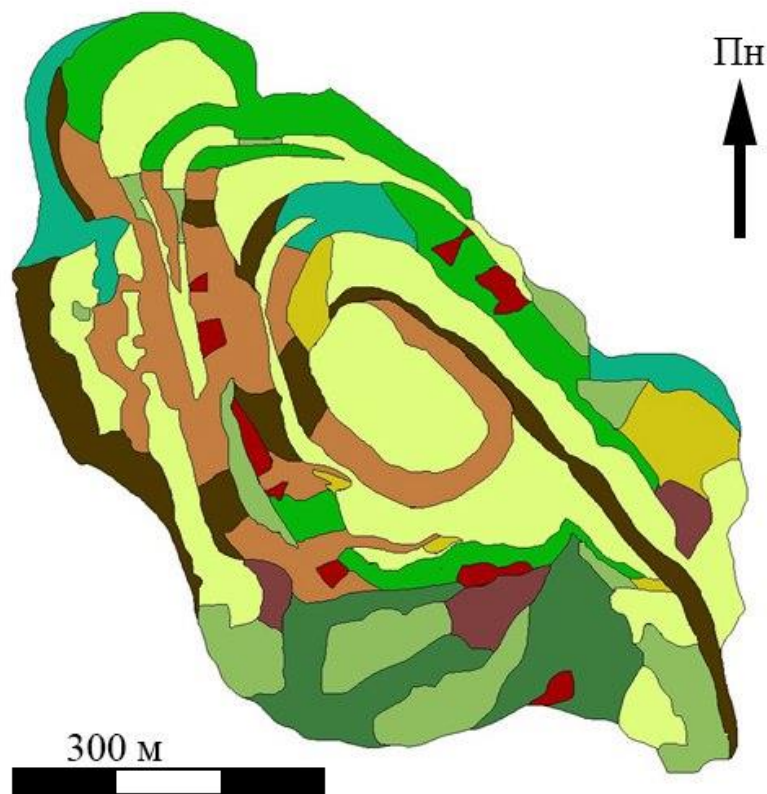
Основою тривимірної моделі є отриманий картографічний матеріал, а також дані географічних координат і висот досліджуваного об'єкта. Вимірювання просторових одиниць проведено за методом теодолітної зйомки. Побудова поверхонь моделі і розрахунки площ виконані за допомогою пробної версії геодезичного пакету K-Mine, розробленого компанією Кривбасакадемінвест. Програма знаходиться у вільному доступі.

Біомаса рослинних угруповань досліджувалась методом укосів з наступним зважуванням на лабораторних вагах [VTOROV, DROZDOV, 2001]. Назви видів наведено за С.Л. Мосякіним та М.М. Федорончуком [MOSYAKIN, FEDORONCHUK, 1999]. Статистичний аналіз отриманих результатів здійснено за Г.Н. Зайцевим [ZAITSEV, 1984]

### **Результати досліджень та їх обговорення**

У результаті аналізу структури ґрунтового покриву Бурщицького відвалу виявлено, що в ґрунтовому покриві даного посттехногенного ландшафту значна роль належить примітивним ґрунтам різної потужності. Отримані результати розміщення ґрунтових комбінацій відвалу відобразили на карті (Рис. 1).

Для деталізації площі відвалу та виявлення напрямів та інтенсивності основних геохімічних потоків, що суттєво впливають на розподіл вологи та речовинних потоків, нами була побудована тривимірна модель. Основою моделі є отриманий картографічний матеріал, а також дані географічних координат і висот досліджуваного об'єкта (Рис. 2). Вимірювання просторових одиниць проведено за методом теодолітної зйомки. Побудова поверхонь моделі і розрахунки площ виконані за допомогою пробної версії геодезичного комп'ютерного програмного пакету "K-Mine" (2018 рік), розробленого компанією Кривбасакадемінвест.



#### Умовні позначення

<p><b>1</b> примітивні автономні дерновогумусо-аккумулятивні суглинисті ґрунти на бурих та лесоподібних суглинках;</p>	<p><b>6</b> примітивні автономні підстилково-гумусоаккумулятивні суглинисті ґрунти на бурих та лесоподібних суглинках;</p>
<p><b>2</b> примітивні автономні дерново- та підстилковогумусоаккумулятивні суглинисті ґрунти на бурих та лесоподібних суглинках;</p>	<p><b>7</b> примітивні транзитні дерновогумусо-аккумулятивні суглинисті ґрунти на бурих та лесоподібних суглинках;</p>
<p><b>3</b> примітивні транзитні незвинуті дерново-гумусоаккумулятивні суглинисті ґрунти на бурих та лесоподібних суглинках;</p>	<p><b>8</b> транзитні субстрати з ознаками ґрунтоутворення;</p>
<p><b>4</b> примітивні фрагментарні ґрунти на осипах скельних порід;</p>	<p><b>9</b> примітивні транзитні дерново- та підстилковогумусоаккумулятивні суглинисті ґрунти на бурих та лесоподібних суглинках з домішками кварцитів;</p>
<p><b>5</b> субстрати без ознак ґрунтоутворення;</p>	<p><b>10</b> примітивні транзитні підстилковогумусо-аккумулятивні суглинисті ґрунти на бурих та лесоподібних суглинках з домішками кварцитів.</p>

Рис. 1. Карта основних ґрунтових комбінацій на моделі відвалу.

Fig. 1. Map of the main soil combinations on the dump model.

Загальна площа об'єкту досліджень у відповідності до картографічної моделі становить 38 га, а об'ємної моделі відвалу – 55 га. Таким чином, можна стверджувати, що коефіцієнт приросту площі тривимірної моделі техногенної території складає 1,44. Відповідно, похибка вимірювань при описі техногенного об'єкту за допомогою карт складає 44%, що категорично не відповідає вимогам достовірності наукових експериментів.



Примітка: умовні позначення відповідають рис. 1.

Рис. 2. Тривимірна модель відвалу.

Fig. 2. Three-dimensional model of the dump.

Використання для вивчення та моделювання поверхонь і структур ґрунтового покритву техногенних та посттехногенних ландшафтів тривимірних моделей та ГІС-технологій дозволяє більш детально оцінити ступінь відновлення ґрунтового покритву території відвалу на даний момент часу, якість виконання нанесення родючих та потенційно родючих порід, а також ступінь покриття ними поверхні відвалу, інтенсивність ерозійних процесів на схилових поверхнях відвалу.

На досліджуваному відвалі, вік якого становить близько 40 років з моменту завершення відсіпки, також були визначені біомасові показники рослинних угруповань. Субстратами для формування рослинності є рихлі четвертинні породи – лесоподібні суглинки та залізисті кварцити з незначною домішкою хлорит-біотитових карбонатних сланців.

Порівняно високі показники надземної біомаси мають угруповання, які формуються на рихлих розкривних породах – лесоподібних суглинках легкого механічного складу, місцями на супісках. На пласких бермах сформувалися ценоструктури з переважанням *Koeleria cristata* (L.) Pers., *Achillea nobilis* L. та *Lathyrus tuberosus* L. В даному різнотравно-злаковому угрупованні жива надземна маса складає від 38 до 103 г/м<sup>2</sup>. Слід зазначити, що дані фітоценози являють собою пізні стадії сукцесійних рядів, на яких рудеральні ценоструктури починають набувати ознаки степових (табл. 1).

На ділянках, субстратну основу яких складають скельні породи, найбільший внесок у загальну продукцію фітомаси трав'янистих ценозів роблять види-азотфіксатори з родини *Fabaceae*: *Securigera varia* (L.) Lassen, *Lathyrus tuberosus* L., *Melilotus albus* Medik. Також значна частка біомаси належить *Poa angustifolia* L. Специфічними домінантами і, відповідно, переважаючими продуцентами петрофільних угруповань є представники роду *Hieracium*. У фітоценозах з домінуванням *Securigera varia* надземна біомаса складає 20,9 г/м<sup>2</sup>; з домінуванням *Pilosella echioides* (Lumn.) F. Schultz & Sch. Bip – 12,1 г/м<sup>2</sup>; з домінуванням *Poa angustifolia* – 15,2 г/м<sup>2</sup>.

Середнє значення біомаси трав'янистих ценозів, які формуються на рихлих четвертинних породах, складає в середньому 21,8 г/м<sup>2</sup>, на скельних породах – 6,9 г/м<sup>2</sup>.

Проаналізувавши розвиток рослинних угруповань на порушених територіях, які вже утворили ценотичне середовище, визначені оптимальні та критичні умови для розповсюдження певних рослинних угруповань на техногенно-порушених комплексах.



Таблиця 1

Середнє значення надземної біомаси рослинних угруповань на різних типах субстратів  
Бурщицького відвалу

Table 1

Average value of aboveground biomass of plant communities on different types of Burschitsky  
dump heaps

Вид рослин	Надземна біомаса $M \pm \sigma$ , г/м <sup>2</sup> ( $p \leq 0,1$ )	
	суглинки	кварцити
<i>Koeleria cristata</i>	103,4±14,6	7,1±2,1
<i>Achillea nobilis</i>	42,5±6,8	0,1±0,01
<i>Lathyrus tuberosus</i>	38,6±5,3	6,05±1,7
<i>Centaurea diffusa</i>	9,98±1,1	0,4±0,84
<i>Elytrigia repens</i>	9,42±1,0	6,8±1,8
<i>Arenaria uralensis</i>	5,62±0,5	0,1±0,01
<i>Alyssum hirsutum</i>	2,86±0,4	0,3±0,04
<i>Securigera varia</i>	0,48±0,1	20,9±2,6
<i>Poa angustifolia</i>	2,81±0,4	15,2±1,7
<i>Hieracium echinoides</i>	2,0±0,3	12,1±1,3
<b>Середнє значення: <math>M \pm \sigma</math></b>	21,8±2,8	6,9±1,8

Слід зазначити, що процеси самозаростання відбуваються нерівномірно та залежать від порід, що формують його основу. Тому, на основі проведених досліджень, нами розроблена загальна формула розрахунку ефективності заростання відвалів після завершення технічного етапу рекультивації порушених земель, яка була створена на базі регресійної математичної моделі:

$$B = X_1 * C + X_2 * K,$$

- де  $X_1$  – надземна біомаса рослин на ділянках, перекритих суглинками;  
 $X_2$  – надземна біомаса рослин на ділянках, перекритих кварцитами;  
 $C$  – частка територій, перекритих суглинками  
 $K$  – частка територій, перекритих кварцитами.

Формула дозволяє проводити розрахунки як для кожного виду рослин окремо, так і усереднено для кількох представлених видів.

Дані по розрахункам за усередненими показниками для десяти основних домінантів рослинних угруповань відвалу наведені в таблиці 2.

Проаналізувавши дані з таблиці 2, можна зробити висновок, що самозаростання відвалів відбувається найбільш ефективно внаслідок суцільного перекриття техногенно порушених територій шаром потенційно родючих порід після завершення технічного етапу рекультивації. Якщо відвал сформований на 50% з рихлих порід та на 50% зі скельних порід – спостерігається зниження біомасових показників рослинності майже на 35%. Відвал, субстратом якого є скельні породи, має найменшу ефективність заростання – 6,9 г/м<sup>2</sup>, що свідчить про низьке біорізноманіття на даній території.

На основі проведених досліджень можна стверджувати, що просторове моделювання відвалів за допомогою тривимірних моделей дає значно точніший результат порівняно з картографічним. Кількісне співвідношення на поверхні відвалів контурів слабозвинених ґрунтів, а також субстратів без ознак ґрунтоутворення до добре розвинутих за зональним типом ґрунтоутворення примітивних ґрунтів може слугувати критерієм якості виконання технічного та біологічного етапів рекультивації.

Найбільшу біомасу на субстратах, представлених суглинистими породами, формують угруповання з домінуванням *Koeleria cristata*, *Achillea nobilis* та *Lathyrus tuberosus*, а на кам'янистих субстратах – *Coronilla varia*, *Hieracium echinoides* та *Poa angustifolia*. Це слід враховувати при проведенні озеленення та відновлення біоценотичного покриву відвалів.



Таблиця 2

Ефективність заростання відвалів, відсипаних суглинистими та скельними породами

Table 2

Effectiveness of overgrown dumps, covered with loam and rocks

Ефективність заростання відвалів В, г/м <sup>2</sup>	Частка територій з суглинками, %	Частка територій з кварцитами, %
6,9	0	100
8,4	10	90
9,88	20	80
11,37	30	70
12,86	40	60
14,35	50	50
15,84	60	40
17,33	70	30
18,82	80	20
20,31	90	10
21,8	100	0

Висновки

Ґрунтовий покрив залізорудних відвалів в достатній мірі складний і різноманітний, сформований примітивними ґрунтами різного ступеню розвитку, які формуються за зональним напрямом генезису, що дозволяє зробити прогноз його подальшого розвитку у напрямі формування чорноземоподібних ґрунтів.

При застосуванні геоінформаційних систем забезпечується покращена візуалізація диференціації едафотопів техногенно порушених територій. Використання тривимірного моделювання при оцінці параметричних характеристик відвалів гірничодобувних підприємств дозволяє більш об'єктивно оцінити площу порушених територій, яка реально зростає майже на 50 % порівняно з їх картуванням.

Продуктивність надземної біомаси фітоценозів, сформованих на потенційно родючих породах – лесоподібних суглинках, у 3 рази вища, ніж на кварцитах. Для озеленення відвалів, сформованих рихлими лесоподібними суглинками, рекомендовані такі види рослин: *Koeleria cristata*, *Achillea nobilis* та *Lathyrus tuberosus*, а для відвалів, відсипаних скельними породами: *Securigera varia*, *Lathyrus tuberosus*, та *Hieracium echioides*.

References

- BODNER G., SCHOLL P., LOISKANDL W., KAUL H.P. (2013). Environmental and management influences on temporal variability of near saturated soil hydraulic properties. *Geoderma*, **204**: 120–129.
- BUKOWSKI A.R., PETERMANN J.S. (2014). Intraspecific plant-soil feedback and intraspecific overyielding in *Arabidopsis thaliana*. – *Ecol. Evol.*, **4**: 2533–2545.
- BULAVA L.N. (1998). *Landshaftnyi analiz territorii dlya celey rekultivacii i racionalnogo ispolzovaniya narushennyh zemel (na primere Krivorojskogo gornopromyshlennogo rayona)*. Dissertation candidate of geographical sciences degree. Kiev. 160 p. (in Russian)
- DENISIK G.I. (1998). *Antropogenni landshafti Pravoberezhnoyi Ukrainy*. Vinnitsya: Arbat, 292 p. (in Ukrainian)
- DIAS T., CLEMENTE A., MARTINS-LOUÇÃO M.A., SHEPPARD L., BOBBINK R., CRUZ C. (2014). Ammonium as a driving force of plant diversity and ecosystem functioning: observations based on 5 years' manipulation of N dose and form in a Mediterranean ecosystem. *PLoS ONE*, **9**(4): e92517.
- DOBROVOLSKIY I.A. (1979). *Ekologo-biogeocenoticheskie osnovy optimizacii tehnogennyh landshaftov stepnoy zony Ukrainy putem ozeleneniya i oblesneniya (na primere Krivorojskogo jelezorudnogo basseina)*. Dissertation doctor of biological sciences degree. Dnepropetrovsk, 240 p. (in Russian)
- DOLINA O.O., SMETANA O.M. (2014). Territorial pattern and classification of soils of Kryvyi Rih Iron-Ore Basin. *Visn. Dnipropetr. Univ. Ser. Biol. Ekol.*, **22**(2): 161–168. (in Ukrainian)
- EKOLOGICHESKIE osnovy rekultivacii zemel (1985). Chernova N.M. (ed.). M.: Science, 181 p. (in Russian)
- ETEREVSKA L.V. (1977). *Rekultivacii lands. Kiev Urozhai*, 128 p.

- FORKUOR G., HOUNKPATIN O.K.L., WELP G., THIEL M. (2017). High Resolution Mapping of Soil Properties Using Remote Sensing Variables in South-Western Burkina Faso: A Comparison of Machine Learning and Multiple Linear Regression Models. *PLoS ONE*, **12**(1): e0170478.
- FRIDLAND V.M. (1984). *Struktury pochvennogo pokrova mira*. Mysl', Moscow (in Russian)
- GILLHAUSSEN P., RASCHER U., JABLONOWSKI N.D., Plickers C., BEIERKUHNEIN C., TEMPERTON V.M. (2014). Priority Effects of Time of Arrival of Plant Functional Groups Override Sowing Interval or Density Effects: A Grassland Experiment. *PLoS ONE*, **9**(1):e86906.
- GOLUBETS M.A., MARYSKEVICH O.G., KROK B.O. (2003). *Ecological potential of terran ecosystems*. Lviv: Polly, 180 p. (in Ukrainian)
- GROENENDYK D.G., FERRE T.P., THORP K.R., RICE A.K. (2015). Hydrologic-Process-Based Soil Texture Classifications for Improved Visualization of Landscape Function. *PLoS ONE*, **10**(6): e0131299.
- HENGL T., DE JESUS J.M., MACMILLAN R.A., BATJES N.H., HEUVELINK G.B.M., RIBEIRO E. (2014) SoilGrids1km — Global Soil Information Based on Automated Mapping. *PLoS ONE*, **9**(8): e105992.
- HENGL T., MENDES DE JESUS J., HEUVELINK G.B.M., RUIPEREZ GONZALEZ M., KILIBARDA M., BLAGOTIC A. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS ONE*, **12**(2): e0169748.
- HOLLAND E.P., AEGERTER J.N., DYTAM C., SMITH G.C. (2007). Landscape as a Model: The Importance of Geometry. *PLoS Comput Biol*, **3**(10): e200.
- JUNFU D., XIAOYONG C., SHUPING W., FANG W., ZHE P., NING X., GUOQIANG Z., SHIPING W. (2016). Changes in Biomass and Quality of Alpine Steppe in Response to N & P Fertilization in the Tibetan Plateau. *PLoS ONE*, **11**(5): e0156146.
- MOSYAKIN S.L., FEDORONCHUK M.M. (1999). *Vascular Plants of Ukraine. A nomenclature Checklist*. Kiev, 345 p.
- NAZARENKO I.I., POLCHINA S.M., NIKORYCH V.A. (2004). *Gruntoznavstvo*. Knygi-XXI, Chernivtsy (in Ukrainian)
- PENG Y., XIONG X., ADHIKARI K., KNADEL M., GRUNWALD S., GREVE M.H. (2015). Modeling Soil Organic Carbon at Regional Scale by Combining Multi-Spectral Images with Laboratory Spectra. *PLoS ONE*, **10**(11): e0142295.
- SCHIRRMANN M., GEBBERS R., KRAMER E., SEIDEL J. (2011). Soil pH Mapping with an On-The-Go Sensor. *Sensors*, **11**, 573–598.
- SMETANA A.N., JAROTCHUK J.V., DOLINA A.A., MYKHAILENKO I.L. (2012). Spatial differentiation of post-industrial landscape ecological potential (waste dump of “pershotravnevyi” quarry of jsc “northern mining combine plant”). *Questions of bioindication and ecology*, **17**(1): 34–54. (in Ukrainian)
- SMETANA N.G., MAZUR A.E., KRASOVA O.O. (1997). *Sintaksonomiya rastitelnosti zhelezorudnyh otvalov Krivbassa*. «Biologicheskaya rekultivaciya narushennyh zemel»: mat. mezhd. sovesh. Ekaterinburg, 280: 215–219. (in Russian)
- SMETANA O.M., DOLINA O.O., YAROSHCHUK Y.V., KRASOVA O.O., RUDIUK D.O. (2013). Development of the ingulets regional ecocorridor: problems and perspectives. *Ukr. Bot. J.*, **70**(4): 457–466. (in Ukrainian)
- SUH J., LEE H., CHOI Y. (2016). A Rapid, Accurate, and Efficient Method to Map Heavy Metal-Contaminated Soils of Abandoned Mine Sites Using Converted Portable XRF Data and GIS. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **13**: 1191.
- TRUBETSKOY K.N., POTAPOV M.G., VINNITSKY K.E., MEL'NIKOV N.N. (1994). *Otkrytye gornye raboty: spravochnik (Open Pit Mining: Manual)*. M.: Gornoe byuro, 500 p. (in Russian).
- TYCHONENKO D.G. (2001). Do pytannya pro klasifikatsiju gruntiv Ukrainy. *Gruntoznavstvo*, **1**(1–2): 15–22 (in Ukrainian)
- VTOROV P.P., DROZDOV N.N. (2001). *Biogeografiya: Ucheb. dlya stud. vy`ssh. ucheb. zavedenij*. M.: VLADOS-PRESS, 304 p. (in Russian)
- WANG JH, LI FR, DONG LH. (2018). Additive aboveground biomass equations based on different predictors for natural Tilia Linn. *The Journal of Applied Ecology*, **29**: 3685–3695.
- XIAO R., JIANG D., CHRISTAKOS G., FEI X., WU J. (2016). Soil Landscape Pattern Changes in Response to Rural Anthropogenic Activity across Tiaoxi Watershed, China. *PLoS ONE*, **11**(11): e0166224.
- YAO R., YANG J., WU D., XIE W., GAO P., JIN W. (2016). Digital Mapping of Soil Salinity and Crop Yield across a Coastal Agricultural Landscape Using Repeated Electromagnetic Induction (EMI) Surveys. *PLoS ONE*, **11**(5): e0153377.
- ZAITSEV G.N. (1984). *Matematicheskaya statistika v eksperimentalnoy botanike*. Moscow.: Nauka, 424 p. (in Russian)
- ZHANG L., YU D., SHI X., XU S., XING S., ZHAO Y. (2014). Effects of Soil Data and Simulation Unit Resolution on Quantifying Changes of Soil Organic Carbon at Regional Scale with a Biogeochemical Process Model. *PLoS ONE*, **9**(2): e88622.

ZHANG Q., BUYANTUEV A., LI F.Y., JIANG L., NIU J., DING Y., KANG S., MA W. (2017). Functional dominance rather than taxonomic diversity and functional diversity mainly affects community aboveground biomass in the Inner Mongolia grassland. *Ecol Evol.*, 7:1605–1615.

ZVONKOVA T.V. (1970). *Prikladnaya geomorfologiya*. Moscow: Vyssh. shk., 271 p. (in Russian)

Рекомендує до друку  
Дубина Д.В.

Отримано 14.10.2019

Адреси авторів:

Т.М. Присяжнюк, О.О. Долина,  
А.М. Бондаренко  
Криворізький національний університет  
вул. Пушкіна, 37  
Кривий Ріг 50002, Україна  
e-mail: dolinaalexandr@gmail.com

Authors' addresses:

T.M. Prisyazhnyuk, O.O. Dolina,  
A.M. Bondarenko  
Kryvyi Rih National University  
37, Pushkina Str.  
Kryvyi Rih 50002, Ukraine  
e-mail: dolinaalexandr@gmail.com