

УДК 631.481  
© 2013

**А.Н. СМЕТАНА,**  
кандидат біологічних наук

**А.А. ДОЛИНА,  
Ю.В. ЯРОЩУК,**  
соискатели

*Криворожский ботанический  
сад НАН Украины*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
3D-МОДЕЛЕЙ В АНАЛИЗЕ  
ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ  
ОРГАНИЗАЦИИ ПОЧВЕННОГО  
И РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВОВ

*Доведено, що використання тривимірного моделювання в дослідженні ґрунтового та рослинного покривів індустріальних об'єктів є більш ефективним порівняно з планіметричними методами. Розглянуто можливість часткової або повної компенсації запасів органічної речовини в ґрунтах залізородних відвалів за рахунок збільшення площі ґрунтоутворення.*

Криворожский железорудный бассейн – регион, где постоянно происходят извлечение и перемещение значительных объемов горных пород. В его пределах выделяются ландшафтные округа горно-обогатительных комбинатов с их рудоотвальным, обогатительным и хвостовым хозяйством [2]. Более мелкими подразделами техногенных ландшафтов являются отвалы, зоны сдвигов и обрушений, хвостохранилища, промышленные участки предприятий и тому подобное. Вследствие этого значительные площади плодородных земель отводятся под складирование отходов горных предприятий. Как известно, техногенные ландшафты относятся к особенной генетической группе антропогенных ландшафтов, в которых с помощью техники в корне перестраиваются все компоненты, в частности эдафическая и литологическая основы. Выявление закономерностей формирования как отдельных компонентов биогеоценотического покрова в ландшафтно-техногенных системах и посттехногенных ландшафтах Криворожья, так и развития биогеоценотического покрова в целом составляет фундамент для разработки системы мероприятий по оптимизации состояния окружающей среды региона. Приведение биогеоценотического покрова этих территорий в надлежащее состояние является необходимым условием для вывода техногенных объектов из эксплуатации. На этих землях полностью уничтожает-

ся биогеоценотический покров. Кроме того, создание техногенных ландшафтных систем приводит к деградации почвенного и растительного покровов прилегающих территорий.

Темпы проведения рекультивации отстают от темпов отчуждения земель, занимаемых техногенными объектами, поэтому восстановление почвенного и растительного покровов на территориях, нарушенных индустриальной деятельностью, в основном происходит спонтанно. Наиболее эффективным для отображения топологической структуры почвенного и растительного покровов считается картографический метод [5]. Но он результативен для участков, имеющих незначительные перепады высот. Индустриальные территории характеризуются большими перепадами высот поверхностей на сравнительно незначительных площадях, поэтому для более полной оценки площадей целесообразно использовать методы трехмерного моделирования. Основными преимуществами применения геоинформационных систем, кроме детального отображения поверхности объектов, можно назвать и возможности:

- ♦ рассмотрения объекта с любого ракурса;
- ♦ объединения всех объектов в единую сеть (городскую, областную, государственную);
- ♦ оперативной корректировки, дополнения и внесения изменений, происходящих на территории объектов;

♦ отображения ретроспективной и перспективной динамики.

Анализ современных систем обращения с техногенными территориями позволяет выделить следующие этапы: проектный; создание техногенного объекта; проверка, передача и контроль; обращение. Предложенный нами метод исследований может быть внедрен на любом этапе и является компонентом управления оптимизацией биогеоценотического покрова в условиях техногенного ландшафта, так как использование ГИС-технологий позволяет на основании трехмерной модели планировать каждый из указанных этапов.

Разработка крутопадающих залежей полезных ископаемых предусматривает создание внешних отвалов. При этом полностью уничтожается растительный и почвенный покровы территории, где складировались вскрышные породы. В свою очередь, за счет образования микро- и мезорельефа происходит увеличение площади поверхности, доступной для восстановления почвенного и растительного покровов. В связи с этим для исследования пространственного распределения структур почвенного покрова и растительности на отвалах более целесообразно использовать трехмерное моделирование в сравнении с планиметрическим картированием.

**Цель работы** – изучение топологической организации почвенного и растительного покровов отвалов на основании трехмерного моделирования поверхности.

**Объекты и методы исследования.** Регион исследований размещен в зоне экотона разнотравно-ковыльно-типчачковых и типчачково-ковыльных степей на границе Бугско-Днепровского (Криворожского) и Бугско-Ингульского округов. Топологическую организацию почвенного и растительного покровов изучали на примере правобережного отвала № 1 обогатительного производства ВАТ “ArselorMittal Кривой Рог”. Возраст исследуемого отвала – 27 лет.

Содержание гумуса определяли по методике И.В. Тюрина в модификации Д.С. Орлова [4]. Структуры почвенного покрова описаны с учетом разработок С. Боула [1], В.М. Фридланда [9]. При классификации почв применяли общепринятые подходы с

применением классификационных систем В.В. Егорова, В.М. Фридланда, Е.Н. Ивановой, Е.В. Лобовой и А.В. Хабарова, Н.И. Полупана [9].

Построение трехмерной модели и расчеты площадей выполнены программно с помощью геоинформационной системы K-MINE, разработанной и любезно предоставленной научно-промышленным предприятием Кривбассакадеминвест, за что авторы выражают свою благодарность.

Разработанная трехмерная модель структуры почвенного покрова позволяет более полно оценить содержание и запасы органического вещества в почвах, а также определить прогнозные запасы гумуса в почвах. Для реализации этой задачи нами была разработана модель баланса динамики запасов органического вещества (на примере отвала). Динамическая модель формирования запасов гумуса описывается уравнением Г.Ф. Хильми [10], адаптированным нами в соответствии с объектом исследований:

$$dG / dt = \eta (G_{ocm} - G_n), \quad (1)$$

где  $G_n$  – начальное значение запасов гумуса, присущее современным примитивным почвам отвала;

$G_{ocm}$  – предельное значение содержания гумуса в условиях формирования дерново-степных почв;

$\eta$  – количество гумуса, которое формируется (или теряется) в год.

Данное дифференциальное уравнение имеет решение

$$G(t) = G_{ocm} - (G_{ocm} - G_n) \exp^{-\eta(t-t_0)}. \quad (2)$$

Очевидно, что графиком функции  $G(t)$  является кривая с насыщением, и, следовательно, модель ограничена описанием динамики запасов в процессе активного развития почвообразовательного процесса.

При этом

$$\eta = G_n / t_0. \quad (3)$$

За шаг итерации расчета принят период в один год как период между вегетационными циклами растений с соответствующим отторжением мортмассы, поступающей в почву.

Расчет по модели предусматривает прирост площади почвообразования за счет увеличения площади поверхности отвала –  $\Delta S$ . В основу расчета площади поверхности слож-

ной трехмерной фигуры положен принцип триангуляционных расчетов площадей, который является базовым в геодезии. Измерение пространственных единиц проведено методом теодолитной съемки по второму классу точности. В общем статическом виде расчет увеличения площадей имеет вид

$$\Delta S = S_2 - S_1, \quad (4)$$

где  $S_2$  – площадь поверхности отвала, потенциально благоприятной для почвообразования;

$S_1$  – площадь основания отвала, где уничтожен естественный почвенный покров.

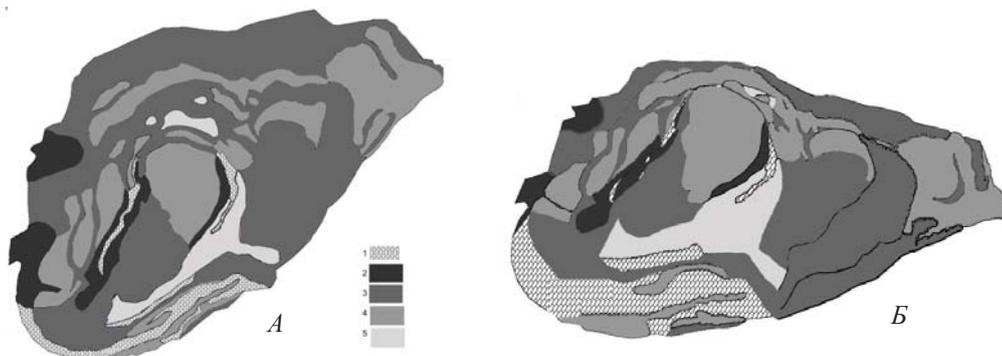
**Результаты исследований и их обсуждение.** Бермы и склоны отвала сформированы железистыми кварцитами, сланцами, мергелистыми и лессовидными суглинками. Данный отвал является типичным для железорудных отвалов Кривого Рога. Ввиду отсутствия современного индустриального влияния на развитие экосистем в пределах данного объекта, целесообразно рассматривать развитие почвенного и растительного покровов как посттехногенный сингенетический процесс.

Для выявления закономерностей пространственной структуры растительных сообществ и почвенного покрова в пределах контура отвала нами проведено картирование растительности на уровне мезокомбинаций (рис. 1) и почв (рис. 2).

Анализ полученного картографического материала позволяет сделать вывод о том, что растительный покров участка детерминирован геохимическими потоками, связанными с неоднородностью микро- и нанорельефа и рисунком контуров экотопов, отличающихся спецификой минерального скелета. При наложении геоботанических, почвенных и литогеохимических карт наблюдается несовпадение контуров, которое было отмечено и в других работах [3, 6–8].

Очевидно некоторое смещение контуров растительного покрова по отношению к почвенным по направлению движения потоков. Данное явление обусловлено несоответствием контуров, которые выделяются по однородным почвенным выделам и минеральному составу литоосновы и контуров геохимической миграции ионов. Динамика данного процесса тесно взаимосвязана с изменениями погодно-климатических условий и флуктуациями растительности.

Спонтанное зарастание древесными и кустарниковыми породами обусловлено локальными экотопическими условиями, которые создаются при нагромождении крупнообломочных кусков горных пород, что способствует конденсации влаги и накоплению незначительной части мелкозема.



**Рис. 1. Карта (А) и трехмерная проекция (Б) растительного покрова отвала № 1 обогащательного производства ВАТ «ArselorMittall Кривой Рог»:**

1 – несформированная растительность из единичных кустарников и травянистых видов; 2 – сплошное древесное зарастание с изреженным травянистым ярусом; 3 – комплексы травянистой растительности и каменистых осыпей с диффузно распределенными деревьями и кустарниками; 4 – фитоценоотические комплексы с преобладанием дерновинных злаков, с единичными деревьями и кустарниками; 5 – то же, с преобладанием дерновинных злаков

## СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКА ЕКОЛОГІЯ

На террасированных склонах при значительном количестве расщепленного материала отмечается сплошное древесное зарастание делювиальных позиций. Крупнообломочные субстраты без признаков почвообразования зарастают слабо, на них встречаются единичные экземпляры кустарников и травянистых растений. На уступах, сформированных лессовыми вскрышными породами, создаются наиболее благоприятные условия для образования многоярусных растительных сообществ.

На территории отвала выделены незначительные по площади участки со сплошным древесным зарастанием *Cerasus mahaleb* (L.) Mill., *Ulmus minor* L., *Acer negundo* L., *Fraxinus excelsior* L., *Armeniaca vulgaris* Lam., *Elaeagnus angustifolia* L., *Cotinus coggygria* Scop., *Pyrus communis* L., *Robinia pseudoacacia* L., *Populus nigra* L. с преобладанием комплекса *Armeniacetum* (*vulgaris*)+*Robinietum* (*pseudoacaciae*)+*Cerasetum* (*mahaleb*). При высокой сомкнутости крон в данных сообществах формируется низкопродуктивный травянистый ярус с преобладанием *Galium aparine* L. и *Stellaria media* (L.) Will. (53,09±5,33 г/м<sup>2</sup>). Продуктивность древесного компонента таких сообществ составляет 22,939 т/га (древесина стволовых частей – 18,359 т/га, веток – 3,521 т/га, листьев – 1,057 т/га) при объеме древесины – 24,026 м<sup>3</sup>/га.

Значительная площадь отвала занята комплексами травянистой растительности с диффузным распределением деревьев и кустарников. В границах проекций крон единичных экземпляров *Elaeagnus angustifolia* L., *Ulmus minor* L., *Acer negundo* L., *Fraxinus excelsior* L., реже – *Cerasus mahaleb* (L.) Mill., *Robinia pseudoacacia* L., *Armeniaca vulgaris* Lam., *Pyrus communis* L., *Morus nigra* L. создаются специфические условия, благоприятные для вселения кустарниковых видов *Swida sanguinea* (L.) Opiz., *Rosa corimbifera* Bohkh., *Cotinus coggygria* Scop., *Rhamnus cathartica*, *Crataegus fallacina* Klok., *Ligustrum vulgare* L., *Sambucus nigra* L., *Prunus stepposa* L., *Lonicera yttatarica* L. Травянистый покров таких сообществ при невысокой степени затенения представлен преимущественно *Poa angustifolia* L., *P. Compressa* L., *Seseli campes-*

*tre* Bess., *Securigera varia* L. Визуально такие комплексы напоминают редколесье. Показатели продуктивности травостоя в разреженных древостоях не имеют значительных разбежностей и в большей мере зависят от минерального состава и степени выветриваемости горной породы, чем от преобладающего в данном сообществе эдификатора. Так, фитомасса травянистого яруса в сообществах с *Cerasus mahaleb* (L.) Mill. – 39,92±10,55 г/м<sup>2</sup>, с *Populus nigra* L. – 45,5±1,92, а с *Robinia pseudoacacia* L. – 52,17±11,07 г/м<sup>2</sup>.

К вариациям примитивных автоморфных почв с дерновым типом почвообразования на лессовидных суглинках приурочены фитоценологические комплексы с эдификаторной ролью *Elytrigia repens* L., единичными деревьями и кустарниками. Показатели фитомассы пырейников соответствуют средним показателям травянистых ценозов – 218,88±14,74 г/м<sup>2</sup>. Аккумуляция значительного количества мортмассы (500,4±33,66 г/м<sup>2</sup>) связана с медленным прохождением процесса разложения. В состав формации *Elytrigietum repentis* входят ассоциации *Elytrigietum* (*repentis*) *poosum* (*angustifoliae*), *E. achilleosum* (*submillefolii*), *E. coronillosum* (*variae*) и сообщества, представленные неустойчивыми во времени сочетаниями *Elytrigia repens* + *Galium ruthenicum*, *Elytrigia repens* + *Ballota ruderalis*, *Elytrigia repens* + *Euphorbia virgultosa*. Отмечены локалитеты соэкологически ценных сообществ с доминированием *Stipa lessingiana* Trin. et Rupr.

Квазиклиматическая стадия представлена злаковыми сообществами, близкими по видовому составу к лугово-степным формациям *Poa angustifoliae* и *Calamagrostideta epigeioris*. Формация мятлика узколистого формируется как на плоских участках, так и в делювиальных позициях склонов. Более мезофильные сообщества вейника наземного приурочены к понижениям рельефа. При наличии водоупорного горизонта в автоморфных, а иногда и в транзитных позициях рельефа, формируются маловидовые сообщества с эдификаторной ролью *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. В фитоценозах формации *Phragmiteta australis* субдоминантами иногда выступают степные виды – *Poa*

## СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКА ЕКОЛОГІЯ

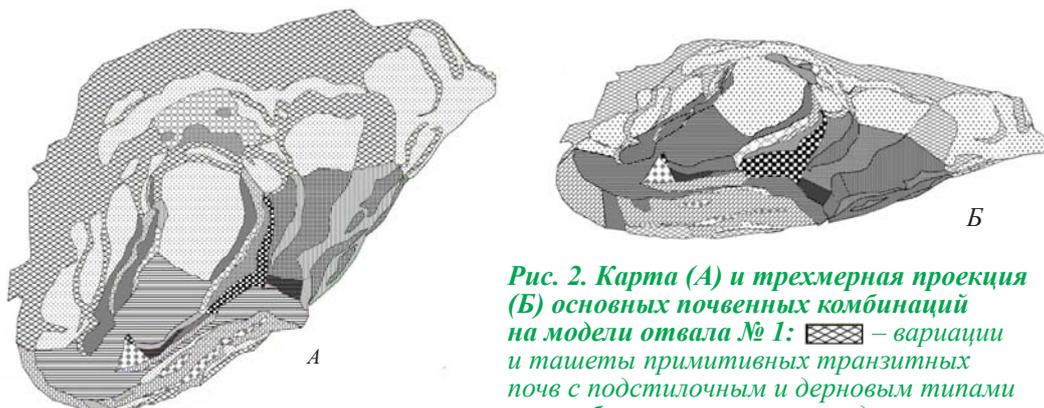
*angustifolia* L., *Koeleria cristata* (L.) Pers.

На дернових примитивних ґрунтах, які утворилися на суглинках і кварцитах, формуються багатобачкові ценоструктури з домінуванням *Koeleria cristata* (L.) Pers., *Achillea nobilis* L. В їх видовому складі переважають степні види, досить звичайні для схилів Кривбаси – *Medicago romanica* Prod., *Arenaria uralensis* Pall. ex Spreng., *Euphorbia seguieriana* Neck., *E. stepposa* Zoz., *Otites chersonensis* (Zapal.) Klok., *Achillea pannonica* Schneele., *Carex praecox* Jacq. non Schreb. При відсутності угнетаючого впливу затенення кількість фітомаси, накоплене трав'янистими полікарпіками, досягає  $180,9 \pm 52,32$  г/м<sup>2</sup>. К карбонатним легкосуглинчастим і супесчаным породам,

якими розсипані ерозійно нестійкі схили, приурочені спільноти з переважаючим *Anisantha tectorum* (L.) Nevski.

На початковій стадії заростання каменистих осипів часто зустрічаються п'ятна *Pilosella durisetum* (Naeg. et Peter) Juxib. і окремі екземпляри *Hieracium umbellatum* L. і *H. viosum* Pall. При накопленні кварцевих частинок в продуктах гіпергенезу створюються умови для формування ценозів і мікроценозів з домінуванням *Hieracium echinoides* Lumm. і *Pilosella officinarum* F. Schultz et Sch. Bip.

Основною літогеохімічною функцією рослинності є «забезпечення» ґрунтоутворювального процесу ресурсом органічної речовини. Диференціація



**Рис. 2. Карта (А) і тривимірна проекція (Б) основних ґрунтових комбінацій на моделі схилу № 1: [штрихуваний квадрат] – варіації і ташети примитивних транзитних ґрунтів з підстильним і дерновим типами ґрунтоутворення на лесовидних суглинках;**

[штрихуваний квадрат] – варіації примитивних автоморфних ґрунтів з дерновим типом ґрунтоутворення на лесовидних суглинках; [горизонтальні лінії] – варіації примитивних фрагментарних і розвинутих ґрунтів з дерновим і підстильним типом ґрунтоутворення на дресві кварцитів; [вертикальні лінії] – варіації примитивних транзитних фрагментарних ґрунтів з підстильним типом ґрунтоутворення на лесовидних суглинках з домішками карбонатів; [шпательований квадрат] – субстрати без ознак ґрунтоутворення; [чорний квадрат] – мозаїки примитивних автоморфних дерново-гумусово-аккумулятивних ґрунтів на суглинчастих породах і кварцитах; [шпательований квадрат] – мозаїки примитивних автоморфних розвинутих ґрунтів з підстильним типом ґрунтоутворення на лесовидних суглинках і карбонатних породах; [шпательований квадрат] – мозаїки примитивних автоморфних розвинутих ґрунтів з дерновим і підстильними типами ґрунтоутворення на суміші кварцитів і суглинків; [шпательований квадрат] – мозаїки примитивних фрагментарних транзитних ґрунтів на суміші охристих сланців і кварцитів; [шпательований квадрат] – варіації примитивних автоморфних фрагментарних і розвинутих ґрунтів з дерновим типом ґрунтоутворення на охристих сланцях; [шпательований квадрат] – примитивні фрагментарні транзитні ґрунти з дерново-гумусово-аккумулятивним типом ґрунтоутворення на кварцитах; [шпательований квадрат] – примитивні фрагментарні і розвинути автоморфні ґрунти на суміші кварцитів і охристих сланців; [шпательований квадрат] – примитивні транзитні ґрунти на карбонатних суглинках з дерновим типом ґрунтоутворення

## СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКА ЕКОЛОГІЯ

### *Накопление / снижение гумуса на разных стадиях реализации потенциала почвообразования почв отвала (в сравнении с исходными почвами)*

Почва	Запас гумуса, т/га	Динамика гумуса в почвах отвала возрастом, т/га	
		30 лет	70 лет
Черноземы обыкновенные	260,4	-195,3	-100,4
Дерново-степные почвы	140,4	-75,3	+19,6
Примитивные почвы отвала возрастом 25–30 лет	65,1	-	+94,9
Почвы отвала возрастом 70 лет (прогноз)	160 ± 5	-94,9	-

растительного и почвенного покровов на начальных этапах сингенеза полностью детерминирована неоднородностью отсыпки вскрышных горных пород. Однако со временем в результате взаимодействия растительности и почвообразующих пород формируются более крупные гомогенные контуры растительности.

В результате анализа выявлено, что в почвенном покрове данного посттехногенного ландшафта значительная роль принадлежит примитивным почвам (эмбриоземам) различной мощности, субстратам с признаками и без признаков почвообразования. Пространственное размещение основных почвенных комбинаций представлено на трехмерной графической модели (рис. 2). На основании оценки площади поверхности отвала как сложной трехмерной фигуры, проведенной по принципу триангуляционного расчета, установлена площадь поверхности, затронутая почвообразовательным процессом. С учетом того что в среднем мощность примитивных почв составляет 10 см, рассчитаны запасы органического вещества почв.

Очевидно, что почвообразовательные процессы на отвально-карьерных морфоструктурах в определенной мере компенсируют уничтоженный почвенный покров территории основания отвала за счет увеличенной площади поверхности.

Изменения содержания гумуса, описанные вышеупомянутым дифференциальным уравнением, позволяют рассчитать прогнозные запасы гумуса и оценить их динамику. С учетом увеличения площади почвообразования за счет увеличенной поверхности отвала в сравнении с площадью основания

запасы гумуса компенсируются значительно быстрее. Увеличение запасов гумуса будет происходить с замедлением ежегодного прироста. На основании модели было установлено, что потери органического вещества вследствие формирования отвалов и выведения территорий из сельскохозяйственного оборота на участках с черноземами сегодня составляют 195,3 т/га (таблица), что равно 75 % от исходных запасов. При размещении данного отвала на дерново-степных почвах, которые не используются в сельском хозяйстве (ориентировочные запасы гумуса – 142,1 т/га), потери составляют 75,3 т/га и 53 % соответственно. При последующих сукцессионных изменениях экстремумом развития примитивных почв отвалов станет их переход в дерново-степные или подобные им почвы. Тогда относительные потери гумуса по сравнению с первичным почвенным покровом из черноземов, учитывая увеличенную площадь поверхности, составят 91,5 т/га, или 35 %.

Исходя из изложенного, целесообразным является использование для создания отвалов территорий, где почвы обладают незначительным плодородием, например на засоленных почвах, в местах выходов на поверхность или близкого залегания кристаллических пород и т. д.

С помощью моделирования баланса и динамики запасов гумуса также становится возможным прогнозирование размещения промышленных объектов.

Конечным результатом оптимизации почвенного покрова является создание стабильной структуры почвенного покрова, где в полной мере реализуется потенциал фито-

## СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКА ЕКОЛОГІЯ

ценозов в первую очередь, а также других компонентов БГЦ. Оптимальным вариантом реализации потенциала почвообразования индустриальных территорий остается по-

чвенный покров, сформированный почвами, приближенными к зональным аналогам – дерново-степным почвам, черноземам обыкновенным и южным.

### Выводы

1. Растительный и почвенный покровы отвалов в достаточной мере сложны и разнообразны, что позволяет сделать позитивный прогноз их дальнейшего развития. Пространственная структура растительного покрова связана с микро- и нанорельефом и почвенным покровом. Значительные колебания границ фитоценологических структур обусловлены изменением площадей литогеохимических контуров, которые выделяются по минеральному составу и физико-химическим параметрам пород зоны гипергенеза.

2. Рациональное формирование структуры почвенного покрова на нарушенных землях предусматривает создание литологичес-

ких условий, которые обеспечат реализацию потенциала почвообразования в направлении приближения к природным аналогам – дерново-степным и черноземовидным почвам.

3. Использование трехмерных моделей позволяет более точно рассчитать площади почвенных и растительных выделов и выявить закономерности их пространственного размещения. На инициальных этапах сингенеза растительности динамика баланса органического вещества почв может служить показателем эффективности функционирования растительного покрова, как литогеохимической системы.

### Бібліографія

1. Боул С. Генезис и классификация почв / С. Боул, Ф. Хоул, Р. Мак-Крекен. – М. : Прогресс, 1977.

2. Добровольский И.А. Эколого-биогеоценологические основы оптимизации техногенных ландшафтов степной зоны Украины путем озеленения и облеснения (на примере Криворожского железорудного бассейна): автореф. на соискание учен. степени доктора биол. наук / И.А. Добровольский. – Днепропетровск, 1979. – 40 с.

3. Миркин Б.М. Закономерности развития растительности речных пойм / Миркин Б.М. – М. : Наука, 1974. – 175 с.

4. Орлов Д.С. Практикум по химии гумуса: учеб. пособие / Орлов Д.С., Гришина Л.А. – М. : Изд-во МГУ, 1981. – 272 с.

5. Позняк С.П. Картографування ґрунтового покриву: навчальний посібник / С.П. Позняк, Є.Н. Красеха, М.Г. Кіт. – Львів : ВЦ ЛНУ імені Івана Франка, 2003. – 500 с.

6. Сметана О.М. Закономірності просто-

рового розподілу ґрунтів та рослинного покриву балкових систем басейну р. Інгулець. Балка “Зелена” / О.М. Сметана, М.Г. Сметана, О.О. Красова // Інтродукція рослин. – 2009. – № 1. – С. 80–90.

7. Сметана О.М. Ґрунти схилів екоотпів пониззя Інгульця / О.М. Сметана, О.О. Красова // Вісті Біосферного заповідника “Асканія-Нова”. – 2008. – Т. 10. – С. 119–126.

8. Сметана М.Г. Екологічна характеристика моніторингової ділянки “Пригір’я” / М.Г. Сметана, О.М. Сметана, О.О. Красова // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг, 2006. – Вип. 5 (15). – С. 265–271.

9. Фридланд В.М. Структура почвенного покрова / В.М. Фридланд. – М. : Мысль, 1972. – 423 с.

10. Хильми Г.Ф. Теоретическая биогеофизика леса / Хильми Г.Ф. – Изд-во Академии наук СССР, 1957. – 204 с.

**Рецензент** – доктор сільськогосподарських наук, професор **Н.Н. Харитонов**