

Экспертная система оценки породных отвалов угольных шахт как структурных элементов экологических сетей

Предложена структура экспертной системы оценки пригодности породных отвалов угольных шахт для их использования в качестве элементов региональных экологических сетей. Разработана математическая модель дефляции поверхности отвалов и отложения загрязняющих частиц породы на прилегающей территории.

Ключевые слова: породный отвал, дефляция, загрязнение территории, экологическая сеть, экспертная система, математическая модель.

Контактная информация: zubov-home@mail.ru

Постановка проблемы. В последние годы в мире происходит становление стратегии экологической организации территории. В разных странах она получила такие наименования, как «Национальный траст» (Великобритания), «Национальная экологическая сеть» (Нидерланды), «Сеть развития природы» (Франция), «Сеть диких земель» (США). Украина, одна из немногих в СНГ, также активно занимается формированием Национальной экологической сети [1].

Согласно Закону Украины «Об экологической сети Украины» от 24 июня 2004 г. № 1864-IV к структурным элементам экосети относятся ключевые, соединительные, буферные и восстанавливаемые территории, которые обеспечивают:

ключевые территории – сохранение наиболее ценных и типичных для каждого региона компонентов ландшафтного и биологического многообразия;

соединительные, или экокоридоры (соединяют между собой ключевые территории) – миграцию животных и обмен генетического материала;

буферные – защиту ключевых и соединительных территорий от внешних влияний;

восстанавливаемые – формирование пространственной целостности экосети, для них должны быть выполнены первоочередные меры по воссозданию первичного естественного состояния.

Однако в густонаселенных промышленных районах степной части Украины не хватает площадей для создания местной экологической сети. Этот дефицит можно восполнить путем использования поверхности отвалов угольных шахт, выведенных из эксплуатации [2, 3], поскольку, согласно утвержденным в 2009 г. Методическим рекомендациям [4], всем породным отвалам предоставлен статус «восстанавливаемых территорий» экосети.

В настоящее время на всей территории Донбасса, простирающейся от восточной части Днепропетровской области Украины до



А. Р. ЗУБОВ,
доктор с.-х. наук



А. А. ЗУБОВ,
канд. техн. наук

западной части Ростовской области Российской Федерации, расположено более 1500 породных отвалов угольных шахт (терриконов) – потенциальных структурных элементов экологической сети. Но они являются также источником повышенной экологической опасности для десятков тысяч гектаров прилегающих земель [1]. Главные опасные процессы, которые происходят на отвалах, – горение породы, ветровая и водная эрозия, вследствие чего загрязняется атмосферный воздух, почвенный покров и водоемы.

Включение породных отвалов с недостаточно развитым фитоценозом в экосеть в качестве восстанавливаемых территорий и осуществление фитомелиорации поверхности отвалов одновременно снизило бы их многофакторное негативное влияние на окружающую среду.

Материалы и результаты исследований.

По мнению авторов, учитывая ограниченность бюджетных средств, которые могут быть выделены на облесение отвалов, необходимо разработать тщательно обоснованную последовательность проведения озеленительных работ, а для оказания помощи проектировщикам экосети в решении комплекса вопросов, возникающих при оценке отвалов как потенциальных структурных элементов сети, необходима экспертная система поддержки принятия необходимых организационных и технических решений. На рис. 1 представлены предлагаемые авторами критерии оценки отвалов и структура

такой системы, которая включает, в частности, следующие блоки:

I. Отнесение отвала к одной из трех категорий по возможности их использования в экосети: «пригодный», «условно пригодный», «непригодный».

Критерием «непригодности» отвала является наличие горящих участков, диагностируемых вначале косвенно – по относительной площади участков с неперегоревшей породой $f_{н.п}$, которая не должна превышать установленный экспертом предел f_{max} , а затем непосредственно – на основании анализа космических снимков, сделанных в инфракрасной части спектра.

Выполненные авторами расчеты показали, что для выявления участков, разогретых до 80–300 °С, снимки должны быть сделаны в интервале 4–10 мкм.

Критерием полной пригодности негорящих отвалов к вовлечению в экосеть является степень их облесенности $f_{л}$, которая должна быть не ниже устанавливаемого экспертом предела f_{min} (ориентировочно не менее 50–80 %).

Критерий условной пригодности – облесенность ниже f_{min} .

II. Оценка необходимости проведения работ для привязки пригодных и условно пригодных отвалов к остальным элементам экосети.

Критерии необходимости привязочных работ:

- отсутствие ближе 20–50 м от подножия отвала – предела, устанавливаемого экспертом, объектов, способных выполнять функции экокоридоров: лесных полос или насаждений, а также элементов первичной гидрографической сети – ложбин, лощин или балок;

- отсутствие растительности в примыкающих к отвалам ложбинах, лощинах или балках.

III. Выбор состава работ для привязки отвала к экокоридорам (возможные варианты:

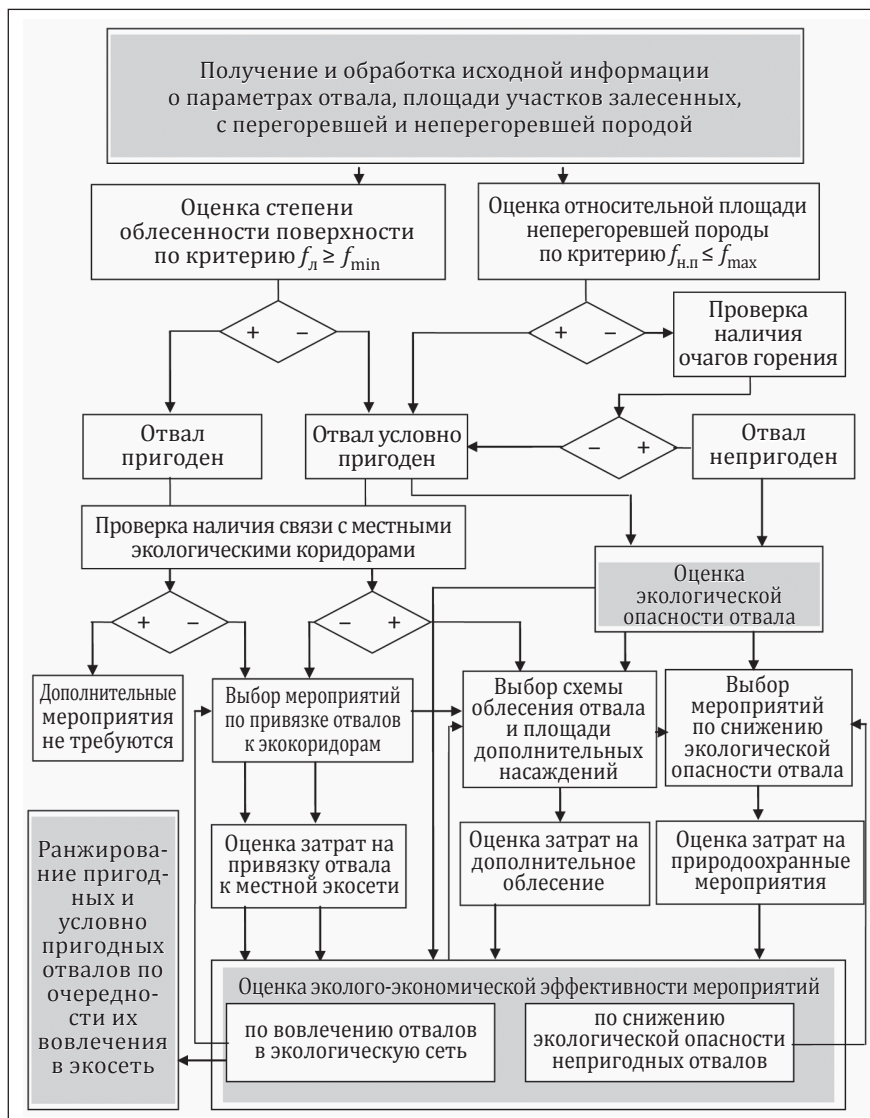


Рис. 1. Структурная схема системы управления экологической опасностью отвалов при их использовании как элементов региональной экологической сети.

создание древесных и кустарниковых лесных полос и насаждений вблизи отвалов и на дне первичной гидрографической сети или их залужение).

Критерии выбора состава привязочных работ:

- вид потенциально пригодных к использованию элементов ландшафта;
- наличие сельхозугодий, нуждающихся в дополнительных полевых защитных или противоэрозионных насаждениях;
- возможность получения экологического или экономического эффекта.

IV. Ранжирование «условно пригодных» отвалов по очередности их вовлечения в экосеть – на основе расчета эколого-экономической эффективности необходимых для этого мероприятий, включающего оценку затрат на облесение отвалов, их привязку к сети экокореидоров и оценку получаемого при этом экологического эффекта.

V. Выбор мероприятий для снижения экологической опасности непригодных к вовлечению в экосеть терриконов: тушение горящих – полное или очаговое, создание вокруг отвала ловчей траншеи, совмещенной с валом, противоэрозионных сооружений в ложбинах или их залужение – в целях локализации загрязнителей, выносимых в результате водной эрозии с отвала, у его подножия и предотвращения их дальнейшего распространения по гидрографической сети на прилегающей территории.

VI. Выбор оптимальной схемы размещения лесных насаждений на терриконах (полное или частичное облесение).

Для экономии средств возможно размещать насаждения на терриконе полосно по аналогии с полевыми защитными лесными полосами. В целях снижения водной эрозии лучше располагать лесополосы в несколько рядов поперек склона на террасах или микротеррасах. Чтобы снизить вынос загрязняющих частиц ветром, будет достаточна высадка деревьев одиночными рядами вдоль склона – в промоинах. Возможно сочетание поперечно-склонового и вдольсклонового

размещения рядов деревьев с оставлением залужаемых полей между ними.

Поскольку экологический эффект любых мероприятий принято определять по предотвращаемому ими экологическому ущербу, необходимо оценить экологическую опасность отвалов до их облесения. Она может быть рассчитана по массе загрязняющих веществ, выносимых с отвалов, а также по характеру их распределения на прилегающей территории.

Оценивая возможность получения информации об экологической опасности эрозионных процессов на отвалах, отметим, что водная эрозия изучена намного лучше ветровой (дефляции). В работах Л. Г. Зубовой, С. Г. Воробьева и других авторов рассмотрены пространственные и временные закономерности водной эрозии, количественные показатели выноса породы, разработаны методы мониторинга эрозии по космическим снимкам и защиты территории от загрязнения [1, 5]. Поэтому авторами статьи была сделана количественная оценка дефляции поверхности отвалов методами физического и математического моделирования.

В опытах, проводившихся с применением разработанной авторами аэродинамической установки [6], испытывалась порода отвалов трех шахт ПАО «Лисичанскуголь». Были проанализированы образцы породы видов: насыпной без уплотнения; насыпной с уплотнением;

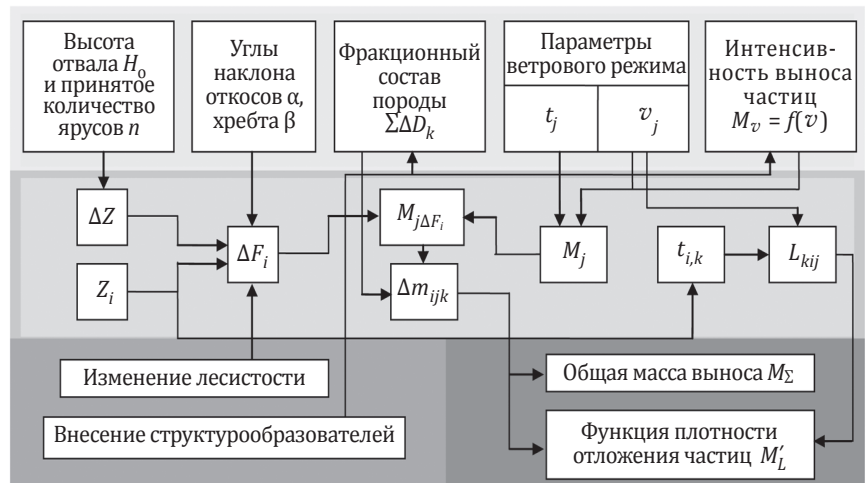


Рис. 2. Структурная схема математической модели процесса загрязнения территории продуктами дефляции поверхности отвалов и управления им:

- – вводимые исходные данные; □ – промежуточные результаты;
- – управляющие воздействия; ■ – итоговые результаты.

насыпной, цементированной многократным повторением цикла увлажнения–высыхание, характерного для отвалов [1].

В процессе дефляции – в результате воздействия ветра – от поверхности террикона отрываются частицы разного размера. Траектория их перемещения ветром и расстояние от подножия отвала, на котором откладывается каждая частица, являются функциями таких переменных: высоты расположения точки отрыва каждой частицы от поверхности отвала, ее диаметра и скорости ветра. Поэтому накопление частиц происходит по сложному закону распределения в широком спектре расстояний, для описания которого был разработан алгоритм (рис. 2), реализованный с помощью аппарата программы Microsoft Excel.

При разработке алгоритма были сделаны следующие упрощения.

1. Боковая поверхность отвала разбивается на n ярусов, а вынос частиц породы рассчитывается не для каждой ее точки по высоте отвала H_o , а дискретно – для каждого из этих ярусов высотой ΔZ .

2. Вместо множества всех значений скорости ветра v использовались дискретные значения – v_j , соответствующие середине стандартных интервалов (0–1; 2–3; 4–5...14–15; 16–17; 18–20 м/с).

3. Вынос частиц рассматривался не для каждого возможного их размера D (диаметра), а для стандартных интервалов (фракций): менее 0,1; 0,1–0,25; 0,25–0,5; 0,5–1; 1–2; 2–5; 5–7; 7–10 и более 10 мм, характеризующихся определенной их массовой долей ΔD_k общей массы породы в процентах.

Согласно алгоритму последовательно рассчитываются такие показатели:

- высота ярусов: $\Delta Z = H/n$, м;
- высота середины каждого (i -го) яруса Z_i , м;
- площадь поверхности каждого (i -го) яруса ΔF_i , м²;
- годовой вынос породы M_j с единицы площади ветром каждой (j -й) скорости v_j : $M_j = M_{vj}t_j$ (где M_{vj} – интенсивность выноса частиц ветром j -й скорости, т/(га·ч); t_j – суммарная длительность ветра данной скорости в часах за год);
- годовой вынос породы $M_{j\Delta F_i}$ с боковой поверхности каждого (i -го) яруса при каждой (j -й) скорости ветра: $M_{j\Delta F_i} = M_j \Delta F_i$;
- масса Δm_{ijk} каждой (k -й) фракции породы, выносимой с i -го яруса при j -й скорости ветра: $\Delta m_{ijk} = M_{j\Delta F_i} \Delta D_k / 100$;
- время падения t_{ik} частиц каждой фракции с высоты каждого яруса;
- средняя дальность отложения частиц k -й фракции, выносимых с i -го яруса ветром j -й скорости: $L_{ijk} = v_j t_{ik}$;
- плотность отложения частиц породы M'_L в тоннах на 1 га площади прилегающей территории как функция расстояния от центра отвала.

Для практического применения модели к конкретному отвалу необходимо знать: 1) площадь поверхности каждого из ярусов отвала; 2) суммарную за месяц, сезон и год продолжительность ветра с каждой из скоростей; 3) зависимость массы частиц, выносимых с единицы площади за единицу времени (удельной интенсивности выноса), от скорости ветра.

Для расчета площади ярусов конических и плоских отвалов были выведены формулы, основанные на главных характеристиках фор-

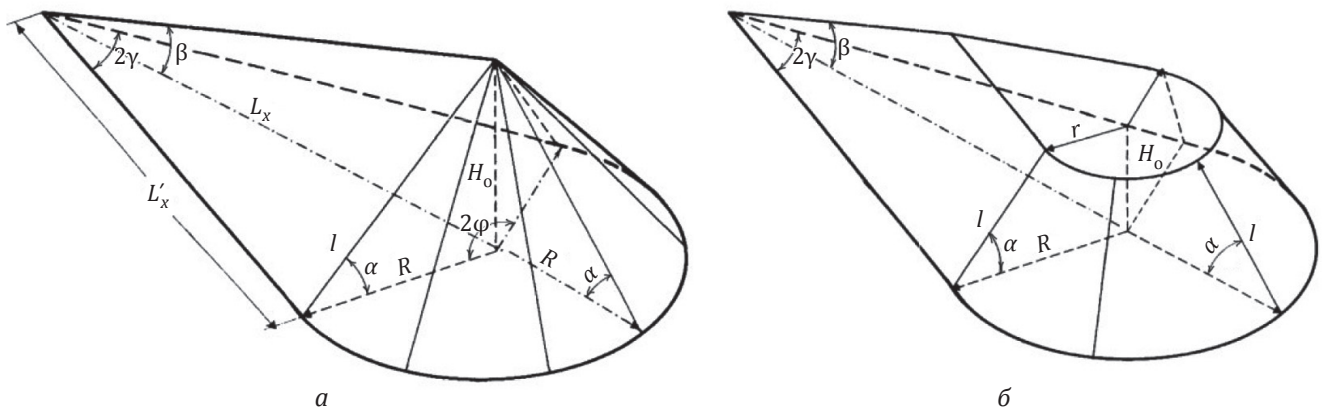


Рис. 3. Пространственные схемы терриконов с несрезанной (а) и срезанной (б) верхушками: α и β – углы наклона боковой поверхности и хребта отвала; H_o и H' – высота отвалов; R и r – радиусы нижнего и верхнего оснований; l – образующая; L_x и L'_x – проекции линии хребта отвала на его основание и линию периметра.

мы отвалов (рис. 3, а, б), к которым относятся высота H_0 или H' , радиус основания R , длина хвостовой части L_x , угол наклона боковой поверхности отвала к горизонтальной поверхности α и угол наклона хребта (ребра) β .

Суммарная площадь основания конического отвала

$$F_{oc} = H_0^2 \{ [(0,50 + 0,00556 \arcsin(\operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta))] \pi \cdot \operatorname{ctg} \alpha^2 + \cos[\arcsin(\operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta)] \operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta \};$$

площадь его боковой поверхности

$$F_{б.п} = H_0^2 \{ [(0,50 + 0,00556 \arcsin(\operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta))] \pi \cdot \operatorname{ctg} \alpha^2 + \cos[\arcsin(\operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta)] \operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta / \cos \alpha \}.$$

Наиболее часто угол α , соответствующий углу естественного откоса породы, равен 37° , а $\beta = 19^\circ$. В этом типовом случае пользование формулами упрощается, так как между параметрами отвала устанавливаются постоянные соотношения, выражаемые различными коэффициентами.

Так, $R = 1,327H_0$; площадь основания отвала

$$F_{oc} = 4R^2 = 7,03H_0^2;$$

площадь боковой поверхности

$$F_{б.п} = 8,8H_0^2 = 5R^2.$$

Площадь боковой поверхности типичного отвала со срезанной верхушкой по формуле усеченного конуса

$$F_{б.п} = 8(R + r)H' / 2 \sin 37^\circ = 6,65H'(R + r) = 13,3RH' - 8,83H'^2,$$

площадь его верхнего основания $F_{в.о} = 4r^2$, а полная площадь поверхности

$$F_{п} = 4r^2 + 13,3RH' - 8,83H'^2.$$

Суммарные за месяцы, сезоны и год продолжительности ветра с каждой из стандартных скоростей можно рассчитывать на основании фондовых метеоданных с использованием разработанной авторами методики [1].

Зависимость удельной интенсивности выноса частиц породы от скорости ветра была определена лабораторными опытами. Для перехода от лабораторных результатов к реальным условиям разработана специальная методика. Полученная зависимость интенсивности выноса породы M , т/(га·ч), от скорости ветра v , м/с, на высоте 10 м имеет вид

$$M_v = 0,0232v^4 + 1,15v^3 + 36,42v^2 - 380,4v + 1448,5.$$

Приводим результаты расчета потенциально-го среднесноголетнего годового выноса поро-

ды с единицы площади отвалов в условиях ветрового режима, характерного для окрестностей Луганска:

Скорость ветра, м/с	6,5	8,5	10,5	12,5	14,5	16,5	19,0
Суммарная длительность за год, ч	828	235	70,0	27,2	14,9	16,9	2,05
Интенсивность выноса породы, т/(га·ч)	0	0,01	0,09	0,41	1,52	4,76	16,6
Вынос породы ветром, т/га	0	2,35	6,3	11,2	22,6	80,4	34,0

Как видим, за год с 1 га непокрытой растительностью поверхности отвалов ветром может выноситься катастрофическое для окружающей среды количество породы – до 157 т.

Процесс загрязнения территории породой, выносимой ветром с поверхности отвалов, рассматривался авторами как имеющий три составляющие: многолетнее отнесение ветром частиц породы, свободно падающей при отсыпке отвала на его верхушку, на разные расстояния в сторону от вертикали; многолетняя дефляция поверхности отвала в период отсыпки; ежегодная дефляция поверхности, происходящая после окончания его отсыпки.

Представленная математическая модель описывает третью составляющую процесса загрязнения территории. Для первой и второй составляющих также разработаны компьютерные реализации модели.

В результате испытания модели на примере типичного конического отвала высотой 50 м получены некоторые значимые характеристики. Установлено, что дефляционный вынос частиц с поверхности породы начинается при скорости ветра 8,5 м/с на высоте флюгера (10 м); предельная дальность отложения частиц размерами крупнее 0,01 мм, выносимых с поверхности отвала при скорости ветра 18–20 м/с, достигает 14,7 км; частицы крупнее 5 мм практически ветром не выносятся за пределы периметра основания отвала любой высоты. В этих же пределах откладываются свыше 80 % частиц размерами более 0,5 мм.

Следовательно, изменяя фракционный состав породы, например путем внесения структурообразователей, можно уменьшить массу породы, выносимой при отсыпке за пределы основания отвала, которая может достигать 11,7 % массы всей отсыпаемой породы.

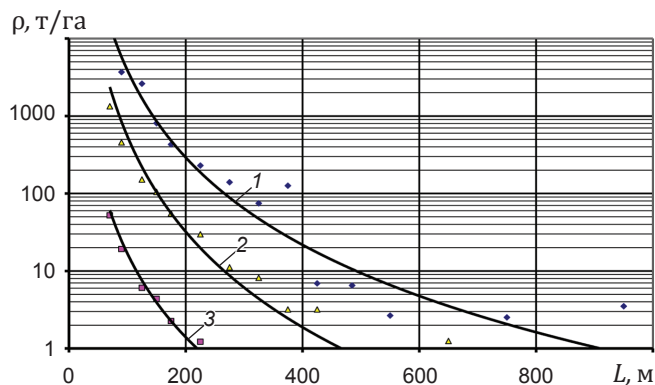


Рис. 4. Изменение плотности ρ многолетнего и годового загрязнения территории по расстоянию L от центра отвала в результате: 1 – отнесения частиц породы ветром при отсыпке отвала; 2 – дефляции за период отсыпки; 3 – годовой дефляции после окончания отсыпки отвала.

За пределы расстояния, кратного $10H$ (H – высота отвала), которое в данном случае соответствует ширине санитарной защитной зоны, практически не распространяются частицы крупнее 0,1 мм. Частицы размерами 0,01–0,1 мм оседают в этой зоне только на 30,7 %. За ее пределами максимум плотности их отложения наблюдается на расстоянии, кратном $36H$ (1,8 км).

Отложение частиц характеризуется плотностью, которая с увеличением расстояния уменьшается по степенному закону, что позволяет зонировать смежные территории по интенсивности их загрязнения.

Как видно из рис. 4, многолетнее загрязнение территории, происходящее за время отсыпки среднего террикона высотой 50 м в результате бокового отнесения ветром частиц породы, на

порядок выше дефляционного загрязнения за тот же период, которое в 15–20 раз больше, чем последующее ежегодное дефляционное загрязнение. Несмотря на такие количественные различия, все три этапа загрязнения территории очень опасны, поскольку даже после окончания формирования отвала на расстоянии от 0 до 220 м от его подножия на 1 га территории каждый год откладывается от 60 до 1 т породы.

Полученные уравнения изменения плотности загрязнения территории по расстоянию L от центра отвала в результате: отнесения при отсыпке $M'_{от}$; многолетней дефляции за период отсыпки $M'_{м.деф}$; годовой дефляции $M'_{г.деф}$ имеют вид:

$$M'_{от} = 10^{11} L^{-3,75}, \quad M'_{м.деф} = 9 \cdot 10^{10} L^{-4,1}, \quad M'_{г.деф} = 10^8 L^{-3,59}.$$

За период отсыпки отвала на расстоянии до 950 м формируется зона с плотностью загрязнения на 1 га свыше 1 т, а на расстоянии до 500 м она превышает 10 т. В зоне до 150 м плотность загрязнения превышает 1000 т, а в непосредственной близости к отвалам – 10 000 т. И это без учета отложения породы, выносимой водными потоками, также очень высокого [1]. Учитывая, что доля отвалов, к которым близко расположены жилье, приусадебные участки, пашни, кормовые угодья, реки и водоемы, составляет соответственно 28, 38, 18, 16 и 23 % [1], экологическую ситуацию на территории, окружающей породные отвалы в Донбассе, можно оценить как катастрофическую.

Разработанная модель может служить инструментом регулирования интенсивности загрязнения различных зон прилегающей терри-

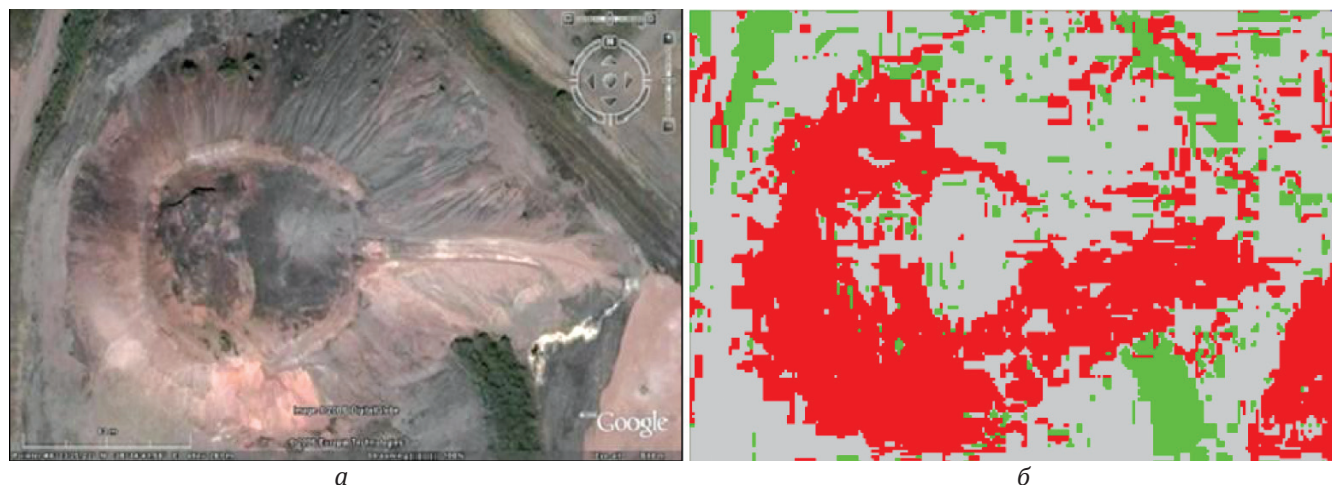


Рис. 5. Исходное (а) и преобразованное в картограмму (б) изображения террикона.

тории путем увеличения лесистости на соответствующих высотных ярусах террикона.

Как следует из рис.1, начальным этапом оценки терриконов в качестве элементов экосети является получение информации о степени обле-сенности $f_{л}$ и относительной площади участков с неперегоревшей породой $f_{н.л.}$. Источник информации – аэрокосмические снимки. Для их компьютерного распознавания был разработан специальный алгоритм, в котором в качестве идентификационных признаков использованы коэффициенты относительной яркости (фототона) каждого из трех аддитивных цветов изображения по 256-уровневой цветовой шкале RGB (K_R , K_G и K_B) к среднему арифметическому их фототонов [7].

Первый этап предложенного алгоритма – получение фотоснимка террикона с помощью программного сервера Google Earth. Далее с помощью программы Adobe Photoshop осуществляется последовательное преобразование полученного изображения вначале в монохромные изображения красного R , зеленого G и голубого B цветов, затем в цифровые матрицы с использованием программы TNT lite 6.3, а далее – в таблицы Microsoft Excel. Выполнив с ними математические действия, получают матрицы коэффициентов K_R , K_G , K_B , которые затем сравнивают с их граничными значениями. Конечный этап алгоритма – получение картограммы (рис. 5), на которой участки с перегоревшей породой окрашены красным, залесенные – зеленым, а участки с неперегоревшей породой – серым цветом (в черно-белом воспроизведении это соответственно три градации серого цвета по возрастанию яркости) и таблицы искомых площадей этих участков в гектарах и процентах общей площади отвала.

Для определения граничных значений коэффициентов были проведены исследования космических снимков 82 участков разных терриконов с помощью программы Adobe Photoshop. В результате анализа фототонов характерных участков (с растительным покровом зеленого цвета различных оттенков; с перегоревшей породой, имеющих различные оттенки красного, желтого, бурого цветов; с неперегоревшей породой с оттенками серого цвета) установлено, что участки с перегоревшей породой распознаются двумя условиями: $K_R \geq 1,05$ и $K_B < 0,97$; с неперегоревшей породой – тремя: $K_R < 1,1$, $K_G < 1,03$, $K_B \geq 0,97$; с растительным покровом – одним: $K_G \geq 1,03$.

Таким образом, значение разработанного алгоритма состоит в том, что он дает возможность дистанционно оценить потенциальную опасность возгорания отвала и степень покрытости его поверхности растительностью, которые в экспертной системе являются исходными критериями пригодности отвала к использованию в экологической сети.

Выводы. При разработке системы мероприятий по снижению экологической опасности шахтных отвалов помимо вероятности их возгорания необходимо оценивать массу годового загрязнения прилегающей территории продуктами как эрозии, так и дефляции с учетом неравномерности отложения последних, используя предлагаемую математическую модель процесса загрязнения. Эта модель позволяет прогнозировать плотность отложения загрязняющих частиц в зависимости от доли лесных насаждений на каждом высотном ярусе террикона и, следовательно, может быть инструментом снижения интенсивности загрязнения разных зон прилегающей территории путем увеличения лесистости на соответствующих высотных ярусах террикона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Терриконы [монография] / [Л. Г. Зубова, А. Р. Зубов, А. А. Зубов и др.]. – Луганск: Ноулидж, 2015. – 712 с.
2. Шапарь А. Г. Принципы и особенности создания экологической сети в горнодобывающих регионах Украины / А. Г. Шапарь, О. А. Скрипник // Теория и практика металлургии. – 2004. – № 5 (43). – С. 87–90.
3. Пат. 44092 Україна, МПК А 01 В 79/02 (2009.1). Спосіб формування екологічної мережі / О. Р. Зубов, А. О. Зубов, О. С. Гуренко; заявник і патентовласник Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля. – № у 200812248; заявл. 17.10.08; опубл. 25.09.09, Бюл. № 18.
4. Методичні рекомендації щодо розроблення регіональних та місцевих схем екомережі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ecoternopil.gov.ua/data/metodrek>.
5. Пат. 36884 Україна, МПК Е 21 С 41/32 (2008.1). Спосіб обліку виносу продуктів водної ерозії з терриконів / О. Р. Зубов, Л. Г. Зубова, С. Г. Воробйов; заявник і патентовласник Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля. – № у 200807071; заявл. 21.05.08; опубл. 10.11.08, Бюл. № 21.
6. Пат. 53815 Україна, МПК F 15 С 1/00 (2009). Аеродинамічна установка для моделювання процесу вітрової ерозії ґрунтів та гірських порід / О. Р. Зубов, А. О. Зубов; заявник і патентовласник Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля. – № у 201001729; заявл. 18.02.10; опубл. 25.10.10, Бюл. № 20.
7. Пат. 74772 Україна, МПК Е 21 С41/32 (2008). Спосіб визначення стану поверхні терриконів і ґрунтів на прилеглій до них території / О. Р. Зубов, А. О. Зубов; заявник і патентовласник Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля. – № у 201205003; заявл. 23.04.12, опубл. 12.11.12, Бюл. № 21.