

СИЛЬВАТИЗИРУЮЩИЙ ЭФФЕКТ И ДИНАМИКА НАСАЖДЕНИЙ *AILANTHUS ALTISSIMA* (MILL.) SWINGLE НА УГОЛЬНЫХ ОТВАЛАХ

Ailanthus altissima, логистическая модель, клонообразование

Введение

Ailanthus altissima (Mill.) Swingle (айлант высочайший) – вид древесных листопадных растений, распространённый в природе почти по всей территории Китая, Северной Кореи, Тайваня [20] и Северного Вьетнама [2]. Встречается на высотах 100–2500 м над уровнем моря на различных субстратах. В Европу интродуцирован в XVIII веке по ошибке вместо лакового дерева *Toxicodendron vernicifluum* (Stokes) F.A. Barkley [7]. Позже вид попал в Северную и Южную Америку, Австралию и Новую Зеландию [19]. Распространению *A. altissima* за пределы природных мест обитания способствовали и китайские рабочие, которые, путешествуя в поисках работы, брали с собой его семена [7]. В Китае он имеет культурное, медицинское и хозяйственное значение, например, в изготовлении древесного угля, как корм для шелкопряда и др. [7, 15]. Другой причиной введения *A. altissima* в культуру за пределами Китая была пригодность его листьев для выращивания шелкопряда *Samia cynthia* (Drury, (1773) [21].

Быстрый рост, неприхотливость и декоративность кроны стали причинами широкого введения *A. altissima* в насаждения европейских городов уже в середине XIX века [10]. Высокая семенная продуктивность, вегетативная подвижность и неприхотливость к условиям произрастания привели к выходу вида за пределы культуры. В настоящее время *A. altissima* является частью флоры многих регионов планеты с умеренным и субтропическим климатом как инвазионный вид [1, 4, 8, 9]. Тем не менее, некоторые авторы рассматривают его как хозяйственно ценный вид для озеленения техногенно трансформированных территорий [17]. Сочетание высокой толерантности к аэро- и почвенным поллютантам, уплотнению и бедности почвы, засухоустойчивости [4, 16] делают этот вид пригодным для высаживания на коренным образом изменённых и разрушенных территориях. На отвалах угольных шахт он может быть перспективным мелиорантом, особенно на склонах восточной и юго-западной экспозиций. Однако для эффективной рекультивации и прогнозирования увеличения площади насаждений *A. altissima* за счет вегетативной подвижности необходимы дополнительные исследования его биологических и экологических особенностей.

Цель и задачи исследований

Целью работы было определение скорости роста куртин *A. altissima* и их средообразующий эффект на угольных отвалах. Задачи: 1) поиск логистической модели динамики роста насаждений; 2) выявление параметров, влияющих на время зарастания площади куртин; 3) оценка средообразующей роли *A. altissima* на угольных отвалах.

Объекты и методики исследований

Место проведения исследований. Отвал шахты «Заперевальня» в г. Донецке (47°59'24" с.ш.; 37°52'34" в.д.). Исследуемые куртины (под куртиной мы понимаем

группу деревьев одной породы) расположены на уровне нижних одной – двух третей высоты отвала, по склонам юго-восточной и северо-западной экспозиций.

Объект исследования. В работе исследовали куртины *A. altissima*. Возраст древостоя в насаждениях 20–25 лет и 10–15 лет. Сомкнутость полога 0,7–0,8. Взрослые деревья дают обильную корневую поросль в радиусе 10–15 м. Высота родительских растений 5,5–6,0 м, диаметр ствола на высоте 1,3 м ($d_{\text{гн}}$ – диаметр на уровне груди) – 12–15 см, диаметр кроны 4–6 м. Плотность растений порослевого происхождения 2–3 единицы на м^2 .

Динамика площади куртин. Изменение площади проекции куртин определяли по космическим снимкам, доступным в «Google Earth». Наиболее ранние из них относятся к 2002 г. Для анализа динамики куртин использовали снимки, сделанные в период вегетации *A. altissima*. При математическом моделировании изменения площади куртин за счет вегетативной подвижности использовали логистическую модель. При расчетах общей протяженности рядов насаждений использовали геометрические параметры конического отвала высотой 50 м и диаметром основания 140 м.

Актино- и термометрические исследования проводили в ясную погоду в III декаде мая после завершения разворачивания листьев. Измерения проводили одновременно под пологом и на открытом пространстве за пределами насаждения. Температуру грунта измеряли на глубине 10 см спиртовыми термометрами, освещенность – люксметрами Ю-116.

Результаты исследований и их обсуждение

Динамика площади куртин. Увеличение площади проекции клонов *A. altissima* с 2002 по 2012 годы описывается экспоненциальным уравнением (рис. 1 А).

Для удобства сравнения данные нормировали к значениям 2002 года. Как видно из рис. 1 Б, В, относительная площадь (An) куртин увеличивается быстрее, чем их периметр (Pn), который в случае куртины №2 снижается. Под относительной площадью куртин понимаем отношение площади куртины, взятое к её площади с самого раннего аэрофотоснимка. По динамике периметра куртины можно судить о зарастании её площади, но поскольку размеры самой площади также увеличиваются, мы использовали отношение An/Pn . Скорость роста An/Pn описывается экспоненциальным уравнением (рис. 1 Г). Очевидно, соотношение площади и периметра клона изменяется нелинейно в течение его жизни. Так, в период до начала образования клона площадь проекции определяется только кроной родительского дерева, а соотношение приближается к теоретически максимальному значению, т.е. A/P круга, или радиусу кроны. Начало образования клонов приводит к большему росту периметра, чем площади проекции, соответственно A/P снижается. Рост ранних клонов и увеличение их кроны вместе с появлением новых клонов приводит к заполнению пространства между ними и, соответственно, снижению скорости увеличения периметра по сравнению с площадью.

Для составления прогноза диверсификации куртин мы применили логистическую модель, в которой скорость роста была определена методом подстановки. Критерием отбора было значение χ^2 . Ограничивающим фактором S считали площадь куртины с радиусом 15 м. Его значение соответствует вегетативной подвижности *A. altissima* и выбрано на основе литературных данных и собственных измерений клонов на угольных отвалах. S куртин из нескольких клонов определяли как площадь, ограниченную линией, обводящей ряды родительских растений на расстоянии 15 м. Чтобы избавиться от необходимости учёта абсолютной площади, её значения были приведены к теоретически максимальным, т. е. к S . Отметим, что для

куртины №2 предельная площадь зарастания на отдельных участках ограничена резкими обрывами, т. е. физиологически допустимой. Подобранный коэффициент в показателе экспоненциального уравнения регрессии: для куртины №1 – 0,223 (логистическая модель) и 0,184 (экспоненциальная), №2 – 0,231 (логистическая) и 0,135 (экспоненциальная).

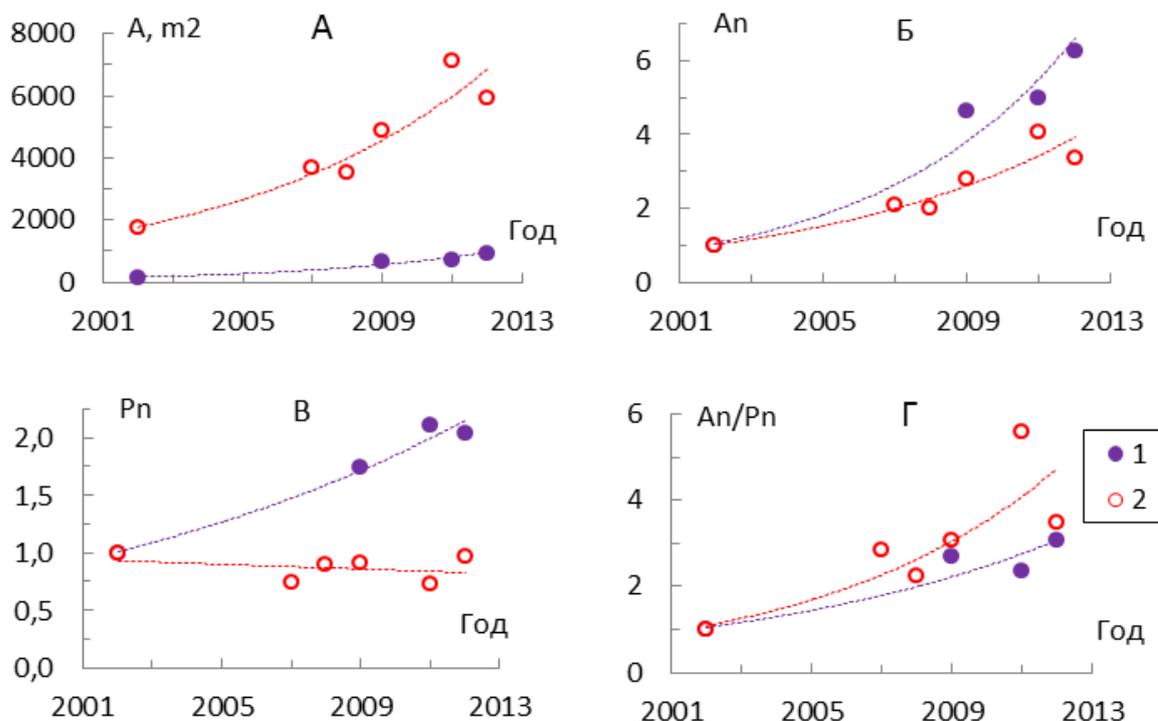


Рис. 1. Динамика абсолютной площади A (А), относительной площади An (Б) и периметра Pn (В), отношения площади к периметру An/Pn (Г) двух куртин *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle (1 и 2). Пунктир – линии регрессии.
 В 2002 г. площадь проекции куртины (1) составляла 1752 м², (2) – 145,6 м². Уравнения регрессий: А, Б – $y_1 \sim e^{0,1837x}$ ($R^2=0,97$), $y_2 \sim e^{0,1354x}$ ($R^2=0,94$); В – $y_1 \sim e^{0,076x}$ ($R^2=0,98$); Г – $y_1 \sim e^{0,11x}$ ($R^2=0,93$), $y_2 \sim e^{0,15x}$ ($R^2=0,94$).

Fig. 1. Dynamics of absolute area A (А), relative area An (Б) and perimeter Pn (В), area/perimeter ratio An/Pn (Г) of two groups of *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle (1 and 2).
 Dot line – regression lines.
 In 2002 the projected area of tree group (1) was 1752 м², that of (2) – 145.6 м². Equations of regressions: А, Б – $y_1 \sim e^{0,1837x}$ ($R^2=0,97$), $y_2 \sim e^{0,1354x}$ ($R^2=0,94$); В – $y_1 \sim e^{0,076x}$ ($R^2=0,98$); Г – $y_1 \sim e^{0,11x}$ ($R^2=0,93$), $y_2 \sim e^{0,15x}$ ($R^2=0,94$).

Как видно из рис. 2, в логистической модели достижение теоретического предела площади куртин *A. altissima* за счет вегетативной подвижности произойдет после ~2025 года, что более чем на 15 лет отличается от экстраполяции экспоненциального уравнения. На основе логистической модели было рассчитано время зарастания междурядий насаждения *A. altissima* при различной ширине рядов.

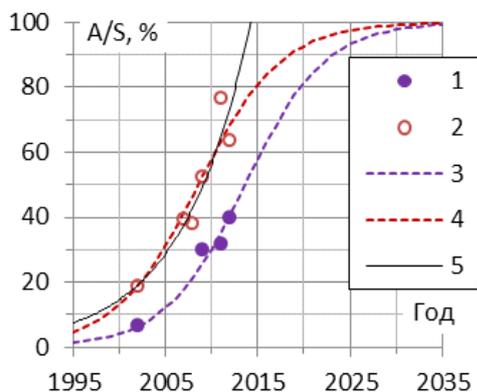


Рис. 2. Увеличение площади куртин относительно её теоретического предела A/S во времени: данные измерений для куртин 1 и 2 – 1, 2; соответствующие логистические модели роста – 3, 4; экспоненциальная модель для второй куртины – 5

Fig. 2. An increased tree group area in relation to its theoretical limit A/S in time: measurements for tree groups 1 and 2 – 1, 2; corresponding logistic growth simulative models – 3, 4; exponential model for the second tree group – 5

Из зависимостей, представленных на рис. 3 А, видно, что при увеличении ширины междурядья W от 5 до 15 м время зарастания возрастает на 8–10 лет, от 15 м до 20 м – на 7 лет. Разница во времени резко возрастает при приближении W к пределу вегетативной подвижности, точнее, двойному пределу ($2S$).

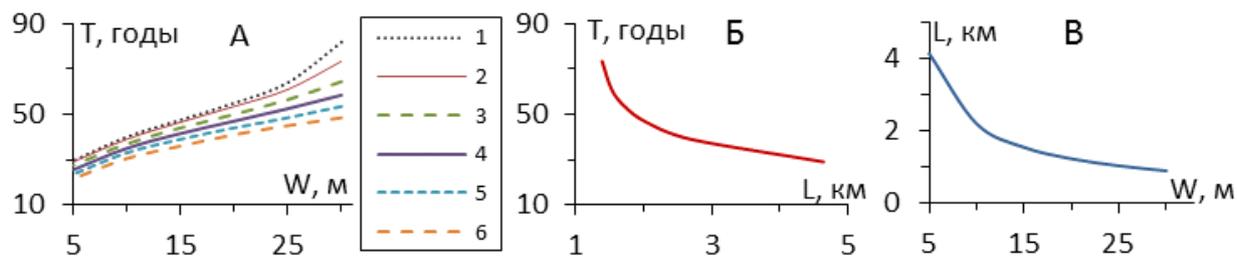


Рис. 3. Зависимость времени T зарастания площади между рядами *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle вегетативным путём от ширины W междурядья (А) и общей длины L рядов (Б); длины рядов L от ширины W междурядья (В).
1 – 95, 2 – 90, 3 – 80, 4 – 70, 5 – 60, 6 – 50% площади между рядами

Fig. 3. A correspondence between time T of inter-row spacing colonization of *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle vegetative undergrowth and inter-row spacing W (А) and total row length L (Б); between row length L and inter-row spacing width W (В).
1 – 95, 2 – 90, 3 – 80, 4 – 70, 5 – 60, 6 – 50% spaces between rows

Расстояние между рядами является определяющим параметром не только в расчёте времени зарастания отвала, но и стоимости работ по фиторекультивации. Так, от W зависит количество высаживаемых растений и общая длина рядов L , которая, в свою очередь определяет объём работ по подготовке к биологической рекультивации. Зависимость времени зарастания междурядья от L показана на рис. 3 Б, а L от W – на рис. 3 В. Расчёт выполнен для конического отвала высотой 50 м и диаметром основания 140 м. Время зарастания площади между рядами мало изменяется при W от ~12 до ~22 м. В этих же пределах мало изменяется и общая протяженность рядов, от которой непосредственно зависит стоимость биологического этапа рекультивации.

Средопреобразующий эффект. Насаждения *A. altissima* в возрасте 20–25 лет создают существенный силъватизирующий эффект. В утренние часы до восхода солнца освещенность подпологового пространства не отличалась от открытого участка. В дальнейшем % освещенности по отношению к открытому участку снижался по мере её роста на открытом участке. При максимальной экспозиции солнечной радиации относительная освещенность достигла своих наибольших значений. На различных участках освещенность под пологом составляла от 7,2 до 24% от открытого пространства. Температура в ночные часы была на 1°C выше, чем на открытом пространстве (17°C). К полудню она возросла на 1–2°C, т.е. достигла 19–20 °C, что на 5–6°C ниже температуры грунта открытого пространства.

Создаваемые под пологом *A. altissima* условия температуры и освещенности, несмотря на наличие обильного опада, по всей видимости, являются благоприятными для семян и подростов естественного происхождения ряда других видов древесных, а также для формирования травянистого яруса. Так, здесь массово произрастает *Acer negundo* L. (возраст от 1–2 до 10–11 лет, высота до 2,2 м), плотность всходов от 3 до 8 штук на 1м². Менее многочисленны представители других видов в насаждениях *A. altissima*: *Juglans regia* L. (высотой от 60 см до 5–6 м, возрастом до 7–10 лет), *Acer platanoides* L. (15 см – 4 м, до 7–8 лет), *Fraxinus pennsylvanica* Marshall. (до 1,3 м, возраст ~5 лет), *Quercus robur* L. (до 4 м, более 10 лет), *Robinia pseudoacacia* L. (до 1,2 м, 6–7 лет), а также *Prunus mahaleb* L. (80 см, 4–6 лет) и *Parthenocissus quinquefolia* (L.) Planch.

Увеличение площади куртин *A. altissima* за счет вегетативной подвижности на отвалах определяется первоначальной площадью и схемой посадки. Способность к клонообразованию можно использовать как для зарастания площади внутри куртин, так и за их границей, при посадке группами либо для заполнения пространства между рядами при рядовой посадке. Для прогноза этих процессов удобным инструментом является логистическое уравнение, которое с учётом сокращения длительности жизни *A. altissima* на отвалах может быть модифицировано в двойное логистическое. Так, после 20–25 лет роста на отвале родительские растения начинают усыхать, одновременно начинает падать скорость увеличения площади территории, занятой клонами. Однако клоны первого поколения к этому сроку представляют собой вполне сформировавшиеся взрослые растения, т.е. при потере связи с родительскими растениями могут быть «ядром» образования нового клона.

Куртины *A. altissima* в малопригодных для растительности условиях в средней части склонов восточной – южной экспозиций проявляют высокую скорость разрастания куртин, которые изначально состояли из единичных растений. Вероятно, это связано с известной высокой устойчивостью к неблагоприятным условиям произрастания. Так, разные авторы характеризуют *A. altissima* как вид устойчивый к почвенным и аэрополлютантам, высокой концентрации взвешенных частиц в воздухе, высоким (до 36°C) температурам грунта [3, 5, 6, 8, 9, 11, 13, 14]. Высокая засухоустойчивость айланты обеспечивается регуляцией работы устьиц и всасывающей функции корней [16].

Ранее считалось, что *A. altissima* не выдерживает затенения и поэтому не может расти в сформировавшихся лесных биоценозах. Однако в последние годы было выяснено, что для него характерна «gar-obligate»-стратегия в лесных сообществах, т.е. условием его включения в природные лесные биоценозы является наличие световых окон в пологе (4, 8). Как показано выше, на техногенных эдафотопках в изначально искусственно сформированных сообществах происходит обратный процесс, т.е. включение других видов древесных растений в насаждение *A. altissima*. Это

противоречит данным работ по аллелопатической активности *A. altissima* [1, 12, 18], но согласуется с данными других авторов. Так, в Греции были проведены сравнительные флористические и фитоценологические исследования фитоценозов с доминированием адвентивного *A. altissima* и аборигенных *Quercus pubescens* Willd. и *Q. coccifera* L. [5]. Авторы установили, что хотя количество видов типичных лесных травянистых растений больше в насаждениях дубов, общее количество видов и индексы флористического разнообразия выше в ценозах с *A. altissima*.

Учитывая недолговечность материнских стволов *A. altissima* и возможность прорастания в куртинах древесных растений других видов, его следует признать пригодным не только для создания чистых древостоев, но и смешанных групп при рекультивации нарушенных земель. Состав и этапы создания сообществ с участием *A. altissima* подлежат дальнейшей разработке.

Выводы

Увеличение площади насаждений *A. altissima* за счет вегетативной подвижности на угольных отвалах ограничивается диаметром распространения корневой системы родительских растений. Относительная скорость роста площади выше скорости роста периметра, это обуславливает формирование границ с малой извилистостью. Из логистической модели динамики насаждений *A. altissima* следует, что рост их площади за счет вегетативной подвижности продолжается около 25–30 лет. Более раннее окончание роста насаждений может быть связано с физическим препятствием на пути распространения корневой системы.

При посадке *A. altissima* на конусных отвалах рядами время зарастания пространства между ними зависит от соотношения ширины междурядья и среднего предельного значения диаметра клонообразования. Время зарастания свободной площади нелинейно растет с увеличением ширины между рядами. Увеличение ширины междурядья и количества рядов *A. altissima* на угольных отвалах приводит к сокращению общей протяженности рядов, но увеличению времени зарастания. Таким образом, при планировании биологического этапа рекультивации отвала необходимо учитывать соотношение между временем зарастания и протяженностью рядов, от которой зависят затраты на проведение работ и стоимость материала (саженцев).

Насаждения *A. altissima* возрастом 20–25 лет на угольных отвалах эффективно выполняют средопреобразующие функции, снижая освещенность (на 76–94%) пространства под пологом и перепады температуры почвы (на ~25%). Создаваемые условия оказываются благоприятными для развития подроста некоторых видов древесных растений адвентивной и аборигенной фракций флоры региона.

1. **Ерёменко Ю.А.** Адвентивные виды древесно-кустарниковых растений в региональном ландшафтном парке «Донецкий кряж» / Ю.А. Ерёменко, В.М. Остапко // Промышленная ботаника. – 2013. – Вып. 13. – С. 92–101.
Yeremenko, Yu.A., and Ostapko, V.M., Woody and shrub advents in the «Donetsky kryazh» regional landscape park, *Prom. Bot. (Industrial Botany)*, 2013, vol. 13, pp. 92–101.
2. **Basnou, C., and Vila, M.,** *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle, Tree of Heaven (Simaroubaceae, Magnoliophyta), Handbook of alien species in Europe, Daisie, Ed., Netherlands: Springer, Dordrecht, 2009, P. 342.
3. **Environ, J.,** The behaviour of *Ailanthus altissima* weed and its effects on natural ecosystems, *J. of Env. Biology*, Nov. 2011, vol. 32, pp. 801–806.
4. **Espenschied-Reilly, A.L., and Runkle, J.R.,** Distribution and changes in abundance of *Ailanthus altissima* (Miller) Swingle in a Southwest Ohio Woodlot, *Ohio J. of Science*, April, 2008, vol. 108, no. 2, pp. 16–22.

5. **Facelli, J.M.**, and Pickett, S.T.A., Indirect effects of litter on woody seedlings subject to herb competition, *Oikos*, 1991, vol. 6, pp. 129–138.
6. **Graves, W.R.**, Dana, M.N., and Joly, R.J., Influence of root-zone temperature on growth of *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle, *J. Env. Hort.*, 1989, vol. 7, pp. 79–82.
7. **Hu, S. Y.**, *Ailanthus*, *Arnoldia*, 1979, vol. 39, no. 2, pp. 29–50.
8. **Knapp, L.B.**, Invasion of an old-growth forest in New York by *Ailanthus altissima*: sapling growth and recruitment in canopy gaps, *J. Torrey Bot. Soc.*, 2000, vol. 127, pp. 307–315.
9. **Kowarik, I.** Clonal growth in *Ailanthus altissima* on a natural site in West Virginia, *J. Veg. Sci.*, 1995, vol. 6, pp. 853–856.
10. **Kramer, H.**, Iber den Gütterbaum, Natur und Museum (Frankfurt/Main), 1995, vol. 125, no. 4, pp. 101–121.
11. **Lodge, D.M.**, Biological Invasions: Lessons for ecology, *Trends Ecol. Evol.*, 1993, vol. 8, pp. 133–137.
12. **Mergen, F.**, A toxic principle in the leaves of *Ailanthus*, *Bot. Gazette*, 1959, vol. 121, pp. 32–36.
13. **Miller, J.H.**, *Ailanthus altissima*, In: Silvics of North America, Hard. Agric. Handbook, Burns, R.M., and Honkala, B.H., Eds., 1990, vol. 2, P. 877.
14. **Rabe, E.P.**, and Bassuk, N., Adaptation of *Ailanthus altissima* to the urban environment through analysis of habitat usage and growth response to soil compaction, *Hortscience (Programs and Abstracts)*, 1984, vol. 19, no. 3, P. 572.
15. **Tang W.** Eisenbrand G., *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle, in Chinese drugs of plant origin, Springer-Verlag, Berlin: Heidelberg, 1992, Chapter 6.
16. **Trifilr, P.**, Raimondo, F., Nardini, A., Lo, G.M.A., and Salleo, S., Drought resistance of *Ailanthus altissima*: root hydraulics and water relations, *Tree Physiol*, 2004, vol. 24, no. 1, pp. 107–114.
17. **Tsao, R.**, Romanchuk, F.E., Peterson, C.J., and Coats, J.R., Plant growth regulatory effect and insecticidal activity of the extracts of the Tree of Heaven (*Ailanthus altissima* L.), *BMC Ecol*, 2002, vol. 2, P. 1.
18. **Voigt, G.W.**, and Mergen, F., Seasonal variation in toxicity of *Ailanthus* leaves on pine seedlings, *Bot. Gazette*, 1962, vol. 123, no. 4, pp. 262–265.
19. **Weber, E.**, and Gut, D., Assessing the risk of potentially invasive plant species in central Europe, *Journal for Nature Conservation*, 2004, vol. 123, pp. 171–179.
20. **Xheng, H.**, Wu, Y., Ding, J., Binion, D., Fu, W., and Reardon, R., Invasive plants of Asian origin established in the United States and their natural enemies, *Forest Health Enterprise Team*, China, 2004, vol. 1.
21. **Fotiadis G.**, Kyriazopoulos A.P., and Fraggakis I., The behaviour of *Ailanthus altissima* weed and its effects on natural ecosystems, *Journal of Environmental Biology*, Vikas Nagar, Lucknow, India, vol. 32, 2011.

¹Донецкий ботанический сад НАН Украины

²Донецкий национальный университет

Поступила 27.06.2014

УДК 577.3

СИЛЬВАТУЮЩИЙ ЕФЕКТ І ДИНАМІКА НАСАДЖЕНЬ *AILANTHUS ALTISSIMA* (MILL.) SWINGLE НА ВУГІЛЬНИХ ВІДВАЛАХ

В.О. Корнієнко², Р.Б. Такташов¹, М.В. Нецветов^{1,2}

¹Донецький ботанічний сад НАН України

²Донецький національний університет

Насадження *Ailanthus altissima* віком 20–25 років на вугільних відвалах ефективно виконують середовищеперетворюючі функції, знижуючи освітленість (на 76–94%) простору під пологом і

перепади температури ґрунту (на ~25%). Створювані умови виявляються сприятливими для розвитку підросту деяких видів деревних рослин. Плануючи біологічний етап рекультивації відвалу, необхідно враховувати співвідношення між часом заростання і довжиною рядів, від якої залежать витрати на проведення робіт і вартість матеріалу (саджанців).

Ailanthus altissima, логістична модель, клоноутворення
UDC 577.3

SILVATIZING EFFECT AND DYNAMICS OF *AILANTHUS ALTISSIMA* (MILL.) SWINGLE PLANTINGS IN COAL MINE DUMPS

V.O. Kornienko², R.B. Taktashov¹, M.V. Netsvetov^{1,2}

¹Donetsk Botanical Garden of the National Academy of Science of Ukraine

²Donetsk National University

Ailanthus altissima plantings aged of 20–25 years in coal dumps effectively perform the function of transforming the environment, reducing the illumination (by 76–94%) in the space under the canopy and the soil temperature (about 25%). Created conditions are favorable for the development of undergrowth of some species of woody plants. When planning the biological stage of coal dump recultivation, one must consider the ratio between colonization time and inter-row spacing, which has implications for reducing the costs of work and planting material (seedlings).

Ailanthus altissima, logistic model, clone formation