

OPTIMALIZACJA ODDZIAŁYWANIA CZYNNIKÓW ŚRODOWISKA PRZYRODNICZEGO W ASPEKcie ODNAWIANIA EKOLOGICZNYCH ZASOBÓW ŚRODOWISKA

Grażyna Łaska¹, Aneta Sienkiewicz¹

¹ Katedra Ochrony i Kształtowania Środowiska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok, e-mail: g.laska@pb.edu.pl

STRESZCZENIE

Czynniki biotyczne i abiotyczne istotnie wpływają na kształtowanie i odnawianie ekologicznych zasobów środowiska przyrodniczego. Głównym celem zachowania i ochrony cennych zasobów naturalnych jest poznanie optymalnych warunków środowiska. Ma to szczególnie duże znaczenie, gdy poszukujemy optymalnych warunków do zachowania dalszej egzystencji zagrożonych wyginieciem taksonów. W określeniu zależności przyczynowo-skutkowych pomiędzy biologią rozwoju i dynamiką zagrożonych taksonów a oddziaływaniem czynników środowiska znajdują zastosowanie metody modelowania matematycznego w postaci sieci bayesowskich. Wykorzystanie algorytmów modelowania (GeNie 2.0, University of Pittsburgh) umożliwia integrację analityczną parametrów środowiska z badanymi cechami gatunków. Określona topologia sieci połączeń daje podstawy do wnioskowania na temat dalszej egzystencji zagrożonych wyginieciem gatunków. Opracowany model matematyczny pozwala również na proces optymalizacji oddziaływania poziomów badanych czynników środowiska. Celem pracy jest określenie możliwości zastosowania modelowania matematycznego w postaci sieci bayesowskich do odnawiania ekologicznych zasobów środowiska.

Słowa kluczowe: czynniki biotyczne i abiotyczne, naturalne zasoby środowiska, odnawianie, modelowanie matematyczne, optymalizacja.

OPTIMIZATION OF THE IMPACT OF NATURAL ENVIRONMENT FACTORS IN TERMS OF RENEWAL OF ECOLOGICAL ENVIRONMENTAL RESOURCES

ABSTRACT

Biotic and abiotic factors significantly influence the formation and restoration of ecological environmental resources. The main purpose of the conservation and protection of valuable natural resources is to know the optimal environmental conditions. This is especially important when we intend to maintain optimal conditions and continued existence of endangered taxons. In determining the cause and effect relationships between developmental biology and dynamics of endangered taxons and the impact of environmental factors mathematical modeling methods in the form of Bayesian networks are used. The use of modeling algorithms (GeNie 2.0, University of Pittsburgh) enables the integration of environmental analytical parameters with the studied characteristics of species. The specified network topology of connections provides a basis for reasoning about the continued existence of endangered species. The mathematical model also allows for the optimization process of the impact studied levels of environmental factors. The aim of the study was to determine the applicability of mathematical modeling in a form of Bayesian networks for the restoration of ecological environmental resources.

Keywords: biotic and abiotic factors, natural environmental resources, renewing, mathematical modeling, optimization process.

WSTĘP

Procesy kształtowania i odnawiania ekologicznych zasobów środowiska zachodzą pod wpływem oddziaływania czynników biotycznych i abiotycznych środowiska przyrodniczego [Schulze 2005]. Poznanie optymalnych warunków środowiska przyrodniczego jest głównym celem w procesie zachowania i ochrony cennych zasobów naturalnych. Szczególnie duże znaczenie odgrywa poszukiwanie optymalnych warunków do zachowania dalszej egzystencji zagrożonych wyginieciem taksonów [Łaska, Sienkiewicz 2013; 2014; 2015 w druku].

Identyfikacja optymalnych warunków środowiska jest procesem trudnym ze względu na występowanie zaburzeń, które zmieniają strukturę i funkcjonowanie poszczególnych elementów układu ekologicznego [Sienkiewicz 2012; 2014]. Skłania to do poszukiwania metody modelowania matematycznego w zakresie określenia wzajemnych zależności przyczynowo-skutkowych pomiędzy wybranymi cechami zagrożonych gatunków a oddziaływaniem czynników środowiska w warunkach zaburzeń. Zastosowanie sieci połączeń w badaniach ekologicznych zasobów środowiska przyrodniczego cieszy się ostatnio coraz większą popularnością [Green i in. 2005; Proulx i in. 2005].

Modelowanie z wykorzystaniem złożonej struktury powiązanych elementów sieci może stanowić podstawę do zrozumienia funkcjonowania naturalnych układów ekologicznych. Model matematyczny w postaci sieci połączeń umożliwia całościowe spojrzenie na funkcjonowanie złożonego układu ekologicznego z punktu widzenia całej struktury sieci, a nie tylko poszczególnych jej elementów. Wykorzystanie sieci powiązań pozwala również na integrację modelowanego układu z dynamiką zmian poszczególnych jego elementów [Jordán, Scheuring 2004]. Opracowana topologia sieci daje podstawy do wnioskowania na temat funkcjonowania całego układu ekologicznego w warunkach występowania zaburzeń [Jordán 2001; Dambacher i in. 2003; Proulx i in. 2005]. Ponadto opracowany model matematyczny w postaci sieci połączeń wspomaga podejmowanie decyzji zapewniających prawidłowe funkcjonowanie całego układu ekologicznego [Roney 2001; Reynolds 2005; Jensen i in. 2009].

Jednym z najbardziej popularnych narzędzi do modelowania oddziaływania czynników środowiska przyrodniczego na ekologiczne zasoby

środowiska są sieci bayesowskie [Uusitalo 2007]. Celem pracy jest określenie możliwości zastosowania modelowania matematycznego w postaci sieci bayesowskich do odnawiania ekologicznych zasobów środowiska.

ZASTOSOWANIE SIECI BAYESOWSKICH DO MODELOWANIA EKOLOGICZNYCH ZASOBÓW ŚRODOWISKA

Modelowanie matematyczne z wykorzystaniem sieci bayesowskich znajduje szerokie zastosowanie w analizie danych ekologicznych. Badania wielu autorów potwierdzają możliwość wykorzystania metody sztucznej inteligencji w postaci sieci bayesowskich do modelowania procesów środowiskowych związanych z eutrofizacją cieków wodnych [Borsuk i in. 2004], zmianą pokrycia terenu i przekształceniem krajobrazu [Aitkenhead, Aalders 2009] oraz z zanieczyszczeniem wód powierzchniowych [Dorner i in. 2007] i podziemnych [Farmani i in. 2009]. Sieci przyczynowo-skutkowe umożliwiają również prognozowanie wielkości zasobów wodnych [Maier i in. 2010] i efektywne zarządzanie jakością wody [Lynam i in. 2010], szacowanie parametrów powierzchni gleby na podstawie roślinności [Qu i in. 2008] oraz ocenę ryzyka związanego z zanieczyszczeniem środowiska [Voie i in. 2010]. Wielu autorów potwierdza, że modelowanie matematyczne z wykorzystaniem sieci bayesowskich odgrywa szczególną rolę w ochronie różnorodności biologicznej poprzez modelowanie rozmieszczenia rzadkich gatunków [Aguilera i in. 2010] i sukcesu ich relokacji [Johnson i in. 2010], ocenę warunków siedliskowych dla występowania rzadkich taksonów [McNay i in. 2006; Smith i in. 2007] i ich monitoring w celu ochrony [Wilson i in. 2008], parametryzację i ocenę zagrożenia gatunków [Pollino i in. 2007a] oraz prognozowanie wpływu stref buforowych na ochronę różnorodności biologicznej [Tattari i in. 2003].

Możliwości wykorzystania omawianej metody modelowania matematycznego w postaci sieci bayesowskich do poszukiwania związków przyczynowo-skutkowych umożliwia znalezienie odpowiedzi na wiele innych zagadnień związanych z problematyką środowiska. Analizowana metoda uczenia maszynowego znajduje również liczne zastosowania w procesie mapowania ekosystemów leśnych [Walton, Meidinger 2006] i zachowania ich różnorodności biologicznej [Cyr i

in. 2010] oraz modelowania terenów przeznaczonych pod zalesienie [Ordóñez-Galán i in. 2009]. Wykorzystanie sieci bayesowskich umożliwia również kompleksowe rozwiązanie zagadnień środowiskowych związanych z analizą i modelowaniem warunków geologicznych, geotechnicznych, sejsmicznych, hydrologicznych, hydrogeologicznych, meteorologicznych i klimatycznych. Analizowana metoda znalazła szerokie zastosowanie w omawianych pracach środowiskowych ze względu na możliwość przeprowadzenia procesów optymalizacji i prognozowania wielkości wyjściowych w modelowaniu ekologicznych zasobów środowiska. Dodatkowo wykorzystanie tej metody pozwoliło na zrealizowanie celów środowiskowych postawionych przez osoby sterujące modelowaną siecią, przy możliwie minimalnym zaburzeniu schematu sieci.

WPŁYW CZYNNIKÓW BIOTYCZNYCH I ABIOTYCZNYCH

Sieci bayesowskie (*Bayesian Networks*) jako wielowymiarowe modele statystyczne umożliwiają uzyskanie wiedzy o wzajemnych zależnościach pomiędzy modelowanymi czynnikami bazując na teorii prawdopodobieństwa. Twierdzenie Bayesa wyrażono równaniem (1).

$$P(A|B) = P(A,B)/P(B) = P(B|A)/P(B) \cdot P(A) \quad (1)$$

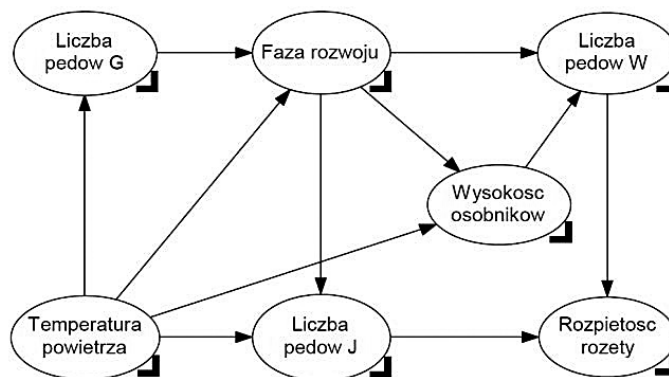
gdzie: $P(A|B)$ – jest to prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia A zależnego od zdarzenia B – a więc A jest prawdziwe, jeśli B miało miejsce.

Prawdopodobieństwo to jest wynikiem zestawienia ilorazu prawdopodobieństw $P(B|A)/P(B)$, wyrażającego jak ważne jest zdarzenie B w odniesieniu do zdarzenia A, oraz prawdopodobieństwo zdarzenia $P(A)$ wyliczonego przed zaistnieniem zdarzenia B [Drużdżel 2005].

Sieć przyczynowo-skutkowa modelowana jest za pomocą skierowanego grafu acyklicznego (zbioru wierzchołków połączonych krawędziami, który nie posiada cykli), w którym wierzchołki reprezentują analizowane zmienne, a krawędzie obrazują probabilistyczne powiązania pomiędzy nimi (rys. 1) [Jensen 2001; Drużdżel 2005; Pourret i in. 2008; Aguilera i in. 2011]. Wykorzystanie algorytmów modelowania w sieciach bayesowskich (GeNie 2.0, University of Pittsburgh) pozwala na integrację analityczną parametrów środowiskowych z cechami zagrożonych wyginię-

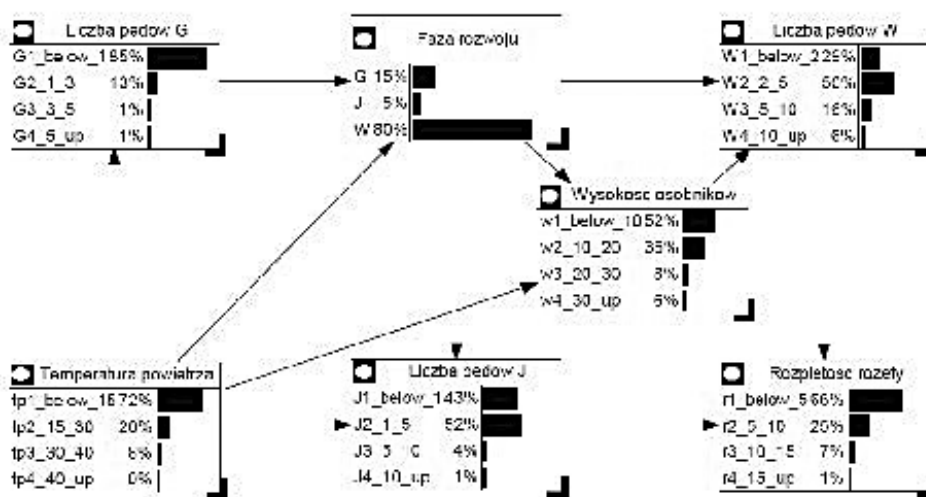
ciem gatunków. Proces modelowania obejmujący określenie zmiennych, zdefiniowanie połączeń pomiędzy zmiennymi, wprowadzenie danych do sieci oraz wyznaczenie rozkładów prawdopodobieństw umożliwia uzyskanie wzajemnych zależności pomiędzy biologią rozwoju i dynamiką zagrożonych taksonów a oddziaływaniem czynników środowiska [Marín i in. 2003; Newton i in. 2007; Pollino i in. 2007b; Łaska, Sienkiewicz 2013, 2014] (rys. 1). Opis jakościowy sieci oparty na graficznej strukturze modelu pozwala identyfikować warunkowe zależności pomiędzy badanymi zmiennymi. Opis ilościowy sieci oparty na parametrycznych modelach przypisanych wierzchołkom pozwala uzyskać rozkłady prawdopodobieństwa pojedynczych zmiennych czynników środowiska lub rozkład łączny zbioru tych zmiennych. Modelowanie matematyczne z wykorzystaniem sieci bayesowskich umożliwia także rozbudowę diagramu ze zmiennymi środowiskowymi ze względu na występowanie zaburzeń, które zmieniają strukturę i funkcjonowanie analizowanego układu ekologicznego. Pozwala to na wprowadzanie nowych informacji w postaci obserwacji oraz na modyfikacje modelu w warunkach niepewności. Zastosowanie tej metody modelowania do określenia warunków odnawiania cennych zasobów ma szczególne znaczenie w sytuacji, gdy tylko część poziomów analizowanych czynników środowiskowych jest znana [Uusitalo 2007; Newton 2010; Chen i Pollino 2012].

Opracowana topologia sieci daje podstawy do probabilistycznego wnioskowania na temat dalszej egzystencji zagrożonych wyginięciem gatunków w warunkach zachodzących przemian pod wpływem zaburzeń. Modelowana struktura grafu wzajemnych powiązań określa zależności pomiędzy zmiennymi i pozwala ustalić rozkłady prawdopodobieństwa warunkowego osiągnięcia określonych stanów przez zmienne (rys. 2). Ustalenie związków przyczynowo-skutkowych w sieci umożliwia znalezienie odpowiedzi na dowolnie postawione pytania dotyczące zachowania dalszej egzystencji zagrożonych wyginięciem taksonów na podstawie łącznego rozkładu prawdopodobieństwa analizowanych zmiennych. Niepewność wnioskowania w sieciach wyrażona jest rozkładem prawdopodobieństwa i im większy jest rozkład jego wartości (od 0 do 1), określony dla danej zmiennej, tym większa jest niepewność. Wraz ze wzrostem obserwacji wiedza o rzeczywistych wartościach zmiennych zwiększa się, co powoduje zmniejszenie stopnia niepewności



Rys. 1. Przykładowy model sieci bayesowskiej wpływu temperatury powietrza na cechy morfologiczno-rozwojowe *P. patens* [Łaska, Sienkiewicz 2013]

Fig. 1. An example of a Bayesian network model of the effect of air temperature on morphological and developmental characteristics of *P. patens* population [Łaska, Sienkiewicz 2013]



Rys. 2. Warunkowe rozkłady prawdopodobieństw analizowanych czynników w modelu sieci bayesowskiej wpływu temperatury powietrza na cechy morfologiczno-rozwojowe *P. patens* [Łaska, Sienkiewicz 2013]

Fig. 2. Conditional probability distributions analyzed factors in a Bayesian network model of the effect of air temperature on morphological and developmental characteristics of *P. patens* population [Łaska, Sienkiewicz 2013]

uzyskanych wyników w procesie modelowania [Gelman i in. 1995; Sivia 1996]. Wykorzystanie algorytmów wielokrotnego zastosowania twierdzenia Bayesa pozwala na określenie stanów zmiennych lub wartości zmiennych poprzez rozsyłanie w modelowanej sieci informacji o zaistniałych zmianach [Drużdżel 2005]. Modelowana sieć bayesowska wzajemnych połączeń umożliwia wnioskowanie zarówno o przyczynach, jak i skutkach zaburzenia względnej równowagi badanego układu ekologicznego. Wykorzystane efektywne narzędzie modelowania z koncepcją sieci bayesowskiej pozwala identyfikować przyczyny zaburzeń oraz skuteczniej podejmować działania ograniczające ryzyko ich wystąpienia. Analiza wzajemnych powiązań przyczynowo-skutkowych w sieci bayesowskiej umożliwia oszaco-

wanie potencjalnych strat związanych z brakiem korzystnych warunków środowiskowych do rozwoju badanej populacji i odnawiania jej cennych zasobów.

OPTIMALIZACJA CZYNNIKÓW BIOTYCZNYCH I ABIOTYCZNYCH

Opracowany model matematyczny Bayesa [Pearl, 1988] w postaci sieci przyczynowo-skutkowej pozwala również na proces optymalizacji poziomów oddziaływania badanych czynników środowiska przyrodniczego. Uzyskane wyniki badań z wykorzystaniem modelowania matematycznego poddaje się realistycznej symulacji komputerowej, która polega na sterowaniu war-

4. Borsuk M.E., Stow C.A., Reckhow K.H. 2004. A Bayesian network of eutrophication models for synthesis, prediction, and uncertainty analysis. *Ecol. Model.* 173, 219–239.
5. Chen S., Pollino C. 2012. Good practice in Bayesian network modelling. *Environ. Model. Softw.* 37, 134–145.
6. Cyr D., Gauthier S., Etheridge D.A., Kayahara G.J., Bergeron Y. 2010. A simple Bayesian belief network for estimating the proportion of old-forest stands in the Clay Belt of Ontario using the provincial forest inventory. *Can. J. For. Res.* 40, 573–584.
7. Dambacher J.M., Li H.W., Rossignol P.A. 2003. Qualitative predictions in model ecosystems. *Ecol. Model.* 161, 79–93.
8. Dorner S., Shi J., Swayne D. 2007. Multi-objective modelling and decision support using a Bayesian network approximation to a non-point source pollution model. *Environ. Model. Softw.* 22, 211–222.
9. Drużdżel M. 2005. Wprowadzenie do Sieci Bayesa. *Software Developer's Journal*.
10. Farmani R., Henriksen H.J., Savic D. 2009. An evolutionary Bayesian belief network methodology for optimum management of groundwater contamination. *Environ. Model. Softw.* 24, 303–310.
11. Gelman A., Carlin J.B., Stern H.S., Rubin D.B. 1995. *Bayesian data Analysis*. [In:] *Texts in Statistical Science*. Chapman and Hall, New York.
12. Green J.L., Hastings A., Arzberger P., Ayala F.J., Cottingham K.L., Cuddington K., Davis F., Dunne J.A., Fortin M.J., Gerber L., Neubert M. 2005. Complexity in ecology and conservation: mathematical, statistical, and computational challenges. *BioScience* 55, 501–510.
13. Jensen F.V. 2001. *Bayesian Networks and Decision Graphs*. Springer, New York, 448.
14. Jensen M., Reynolds K., Langner U., Hart M. 2009. Application of Logic and Decision Models in Sustainable Ecosystem Management. [In:] *Proceedings of the 42nd Hawaii International Conference on System Sciences*. Waikoloa, Hawaii, 5-8 January 2009.
15. Johnson S., Mengersen K., de Waal A., Marnewick K., Cilliers D., Houser A.M., Boast L. 2010. Modelling cheetah relocation success in southern Africa using an iterative Bayesian network development cycle. *Ecol. Model.* 221, 641–651.
16. Jordán F. 2001. Ecosystem flow networks and community control. [In:] Villacampa Y., Brebbia C.A., Uso J.L. (eds.) *Ecosystems and Sustainable Development III. Advances in Ecological Sciences*. WIT Press, Southampton, 771–780.
17. Jordán F., Scheuring I. 2004. Network ecology: topological constraints on ecosystems dynamics. *Physics of Life Reviews* 1, 139–172.
18. Lynam T., Drewry J., Highm W., Mitchell C. 2010. Adaptive modelling for adaptive water quality management in the great barrier reef region, Australia. *Environ. Model. Softw.* 25, 1291–1301.
19. Łaska G., Sienkiewicz A. 2013. Stan zachowania i zagrożenie populacji *Pulsatilla patens* (L.) Mill. pod wpływem zmiennych warunków środowiska przyrodniczego w Puszczy Knyszyńskiej. [W:] Ciereszko I., Bajguz A. (red.) *Różnorodność biologiczna – od komórki do ekosystemu. Rośliny i grzyby w zmieniających się warunkach środowiska*. Wyd. PTB, Białystok, 143–154.
20. Łaska G., Sienkiewicz A. 2014. Mathematical modelling of the influence of air temperature on the conservation status and threat of *Pulsatilla patens* (L.) Mill. population in the Knyszyńska Forest. *Episteme* 22, 173–179.
21. Maier H.R., Jain A., Dandy G.C., Sudheer K.P. 2010. Methods used for the development of neural networks for the prediction of water resource variables in river systems: current status and future directions. *Environ. Model. Softw.* 25, 891–909.
22. Marín J.M., Díez R.M., Insua D.R. 2003. Bayesian methods in plant conservation biology. *Biol. Conserv.* 113, 379–387.
23. McNay R.S., Marcot B.G., Brumovsky V., Ellis R. 2006. A Bayesian approach to evaluating habitat for woodland caribou in north-central British Columbia. *Can. J. For. Res.* 36, 3117–3133.
24. Newton A.C., Stewart G.B., Díaz A., Golicher D., Pullin A.S. 2007. Bayesian belief networks as a tool for evidence-based conservation management. *J. Nat. Conserv.* 15, 144–160.
25. Newton A.C. 2010. Use of Bayesian network for red listing under uncertainty. *Environ. Model. Softw.* 25, 15–23.
26. Ordóñez-Galán C., Matías J.M., Rivas T., Bastante F.G. 2009. Reforestation planning using Bayesian networks. *Environ. Model. Softw.* 24, 1285–1292.
27. Pollino C.A., White A.K., Hart B.T. 2007a. Examination of conflicts and improved strategies for the management of an endangered Eucalypt species using Bayesian network. *Ecol. Model.* 201, 37–59.
28. Pollino C.A., Woodberry O., Nicholson A., Korb K., Hart B.T. 2007b. Parameterisation and evaluation of a Bayesian network for use in an ecological risk assessment. *Environ. Model. Softw.* 22, 1140–1152.
29. Pourret O., Naim P., Marcot B. 2008. *Bayesian Networks. A Practical Guide to Applications*. Wiley, USA, 446.
30. Proulx S.R., Promislow D.E.L., Phillips P.C. 2005. Network thinking in ecology and evolution. *Trends Ecol. Evol.* 20, 345–353.
31. Qu Y., Wang J., Wan H., Li X., Zhou G. 2008. A

- Bayesian network algorithm for retrieving the characterization of land surface vegetation. *Remote Sens. Environ.* 112, 613–622.
32. Reynolds K.M. 2005. Integrated decision support for sustainable forest management in the United States: Fact or fiction? *Comput. Electron. Agr.* 49, 6–23.
33. Rooney T.P. 2001. Deer impacts on forest ecosystems: a North American perspective. *Forestry* 74, 201–208.
34. Schulze E.D., Beck E., Müller-Hohenstein K. 2005. *Plant Ecology*. Springer, Berlin, 702 pp.
35. Sienkiewicz A. 2012. *Pulsatilla patens* (L.) Mill. in the Knyszyńska Forest on background of abiotic disorders. [W:] Łaska G. (red.) *Różnorodność biologiczna – od komórki do ekosystemu*. Wyd. PTB, Białystok, 103–116.
36. Sienkiewicz A. 2014. Wpływ czynników abiotycznych na strukturę populacji sasanki otwartej *Pulsatilla patens* (L.) Mill. w Nadleśnictwie Spychowo w Puszczy Piskiej. [W:] Łaska G. (red.) *Różnorodność biologiczna – od komórki do ekosystemu. Zagrożenia środowiska a ochrona gatunkowa roślin i grzybów*. Wyd. PTB, Białystok, 251–260.
37. Sivia D.S. 1996. *Data Analysis. A Bayesian Tutorial*. Oxford Science Publications, USA.
38. Smith C.S., Howes A.L., Price B., McAlpine C.A. 2007. Using a Bayesian belief network to predict suitable habitat of an endangered mammal-the julia creek dunnart (*Sminthopsis douglasi*). *Biol. Conserv.* 139, 333–347.
39. Tattari S., Schultz T., Kuussaari M. 2003. Use of belief network modelling to assess the impact of buffer zones on water protection and biodiversity. *Agric. Ecosyst. Environ.* 96, 119–132.
40. Uusitalo L. 2007. Advantages and challenges of Bayesian networks in environmental modelling. *Ecol. Model.* 203, 312–318.
41. Walton A., Meidinger D. 2006. Capturing expert knowledge for ecosystem mapping using Bayesian networks. *Can. J. For. Res.* 36, 3087–3103.
42. Wilson D.S., Stoddard M.A., Puettmann K.J. 2008. Monitoring amphibian populations with incomplete survey information using a Bayesian probabilistic model. *Ecol. Model.* 214, 210–218.
43. Voie Ø.A., Johnsen A., Strømseng A., Longva K.S. 2010. Environmental risk assessment of white phosphorus from the use of munitions-A probabilistic approach. *Sci. Total Environ.* 408, 1833–1841.