

Leonid T. SVIRIDOV, Nikolaj E. KOSIČENKO\*

## ROLA LASU I JEGO KOMPONENTÓW W OCHRONIE PRZED SKAŻENIEM RADIOAKTYWNYM

THE ROLE OF FOREST AND ITS COMPONENTS  
IN PROTECTION AGAINST RADIOACTIVE CONTAMINATION

***Abstract.** The forests of the western region of Russia are subjected to the greatest radioactive pollution due to the accident at Chernobyl power station. It is established, that the forest is a very effective natural factor for protection against radiation. The forest and its components absorb the main mass (up to 80 percent) of radio nuclides and are able to bind, to confine and to protect against their pouring out beyond the limits of polluted areas; thus protecting the environment from the secondary radioactive pollution. Radio stability of coniferous species as compared with deciduous species is not high. Mean specific radioactivity of varied components of forest ecosystems is given, being 56; 104; 109; 123; 275; 360; 933 and 1467 Bk/kg for barked wood, bark, grassy vegetation, mineral portion of soil, moss and forest covering, respectively. Some recommendations related to ecological normalizing the territories polluted with radio nuclides, such as improvement of afforestation of forest-steppe zone and the development of complex biologically stable forest plants are given.*

***Key words:** radioactive pollution, radio nuclides, radio stability, forest ecosystems, biologically stable forest plants*

---

\* Voronežskaja gosudarstvennaja lesotekničeskaja akademija, 394613 g. Voronež, ul. Timirjazeva 8, Russia, e-mail nis@vgtla.vrn.ru

Jedną z największych katastrof technicznych w historii ludzkości, jaką była awaria Czarnobylskiej elektrowni jądrowej, wywarła ogromny negatywny wpływ na człowieka i środowisko przyrodnicze. Awaria ta spowodowała skażenie radioaktywne rozległych terenów nieleśnych i leśnych na obszarze 19 jednostek terytorialnych: 16 obwodów i 3 autonomicznych republik Federacji Rosyjskiej, przy czym na obszarze 57,7 km<sup>2</sup> skażenie radioaktywne wynosiło powyżej 1 Ci/km<sup>2</sup> (Gosudarstvennyj dokład 1994). Na północnym zachodzie skażenie dotarło do Obwodu Leningradzkiego włącznie, na północy – objęło tereny obwodów Smoleńskiego, Kałużskiego i Tulskiego, a na wschodzie – sięgnęło granic Republiki Tatarstanu\*.

Obszar skażonych terenów leśnych Federacji Rosyjskiej wynosi około 1 mln ha, z czego na I strefę skażenia radioaktywnego (1–5 Ci/ km<sup>2</sup>) przypada 871,2 tys. ha (87,0%), na II strefę (5–15 Ci/ km<sup>2</sup>) – 85,6 tys. ha (8,5%), na III strefę (15–40 Ci/km<sup>2</sup>) – 42,0 tys. ha (4,2%), na IV strefę (40 Ci/km<sup>2</sup> i więcej) – 2,5 tys. ha. Największemu skażeniu, zarówno pod względem powierzchni (171 tys. ha), jak i poziomu skażenia, uległy lasy zachodniej Rosji, tj. obwodów Brianskiego (Maradudin 1991, Murachtanov i in. 1997), Kałużskiego i Orłowskiego (Šubin 1995). W innych obwodach tereny leśne, które uległy skażeniu radioaktywnemu należą głównie do I i w niewielkim stopniu do II strefy skażenia. Skażenie odnotowano także w obwodach Czuwaszkim, Saratowskim i Niżegorodskim.

Na terenach leśnych poziom promieniowania zmniejsza się bardzo powoli w trakcie biologicznego obiegu substancji, ponieważ samooczyszczenie z izotopów cezu 137 i strontu 90 jest wynikiem rozpadu radioaktywnego lub ich nieznacznego pochłaniania przez drzewa i krzewy, mchy, grzyby, jagody itp. Zawartość radionuklidów w roślinności leśnej była wyższa niż poza lasem. Las jest specyficznym środowiskiem naturalnym, w którym początkowe rozprzestrzenianie się i dalsza migracja radionuklidów przebiega odmiennie niż w innych ekosystemach. Las i jego roślinność mogą wyjątkowo długo zatrzymywać radionuklidy, hamując tym samym ich przenoszenie poza granice skażonych terenów i zapobiegając wtórnemu skażeniu promieniotwórczemu środowiska. Jednocześnie las skażony przez radionuklidy może być źródłem rozprzestrzeniania się cząsteczek promieniotwórczych w przypadku wystąpienia pożarów leśnych oraz niekontrolowanego użytkowania lasu.

W przypadku napromieniowania gleby cezem 137 w wysokości 1–5 Ci/km<sup>2</sup> tło promieniowania w lasach wzrasta nie więcej niż dwukrotnie (10–15 μR/h) w porównaniu z naturalnym tłem promieniowania środowiska. W lasach o skażeniu gleby 5–15 i 15–40 Ci/km<sup>2</sup> moc dawki promieniowania wynosi odpowiednio 30–70 i 70–200 μR/h. W takim przypadku powszechne jest przekroczenie dopuszczalnych norm zawartości radionuklidów w wielu komponentach lasu (wyjątek stanowi tu okorowane drewno), a gospodarka leśna powinna być ukierunkowana na

\* Zagadnienia przedstawione w artykule były prezentowane podczas II Międzynarodowej konferencji młodych uczonych „Lasy Eurazji w XXI wieku: wschód–zachód”, 1-5.10.2002, Kamieniuki-Białowieża

ochronę i poprawę jakości lasu, tak by stanowił barierę biologiczną, zapobiegającą przenoszeniu się radionuklidów na inne tereny. Las powinien być utrzymywany w dobrym stanie sanitarnym i dobrze zabezpieczony przed pożarem. W terenach o skażeniu w przedziale 1–5 Ci/km<sup>2</sup> użytkowanie rębne powinno być oparte na przesłankach ekonomicznych, społecznych i hodowlanych, przy jednoczesnym zapewnieniu bezpiecznych warunków pracy i uzyskaniu produktów „czystych”, tzn. zgodnych z przyjętymi normami. W lasach, których radioaktywność wynosi 5–15 Ci/km<sup>2</sup> i 15–40 Ci/km<sup>2</sup> zabrania się jakiegokolwiek użytkowania, z wykaszaniem traw, zbieraniem jagód i innych owoców, polowaniem, wędkowaniem, turystyką, rekreacją, wypasem bydła, wydobywaniem i przeróbką kopalin włącznie, przejazdu środków komunikacji poza drogami ogólnej użyteczności oraz wykonywania jakichkolwiek prac powodujących przerwanie ciągłości pokrywy gleby (Šubin 1996). W strefie, w której skażenie gleby radioaktywnym cezem 137 jest większe niż 40 Ci/km<sup>2</sup>, moc dawki promieniowania wynosi >200 μR/h, a aktywność radionuklidów w drewnie odziomkowym sięga kilku tysięcy, a w wyższej części strzały kilkudziesięciu tysięcy Bq/kg. W tej strefie, tak samo jak w terenie o skażeniu 15–40 Ci/km<sup>2</sup>, zabronione jest prowadzenie jakiegokolwiek działalności, z użytkowaniem lasu włącznie. Obowiązuje tu szczególny, zatwierdzony przez federalne organy ochrony środowiska i miejscowe władze, reżim korzystania z zasobów naturalnych.

Na podstawie badań roślinności drzewiastej prowadzonych w promieniu 30 km od elektrowni atomowej w Czarnobylu stwierdzono, że odporność iglastych gatunków drzew na promieniowanie radioaktywne w porównaniu z odpornością gatunków liściastych jest mniejsza. Dla obszarów skażonych radionuklidami opracowano zestaw gatunków drzewiastych przewidzianych w składzie upraw, a także zalecenia dotyczące prowadzenia gospodarki leśnej (Rukovodstvo 1997). Drzewa w młodszym wieku okazały się mniej odporne na promieniowanie jonizujące niż drzewa starsze.

Według Kosičenki i Ščetenkina (1988) skażeniu radionuklidami, w mniejszym lub większym stopniu, uległy także lasy wszystkich obwodów w Regionie Centralnego Czarnozemia\* (tab. 1). Radioaktywność tych lasów nie jest duża i nie przekracza 5 Ci/km<sup>2</sup>. Największemu skażeniu, zarówno pod względem powierzchni, jak i dawki napromieniowania, uległy obwody północno-zachodnie. Cechą wspólną wszystkich obwodów dotkniętych katastrofą jest mozaikowatość występowania powierzchni skażonych (plam) i ich mała wielkość. Potwierdzeniem tego, że są one skutkiem katastrofy w Czarnobylu, jest jednakowy gradient w pasie skażenia prowadzącym od południowego zachodu na północny wschód. Szerokość tego pasa wynosi 150–250 km. Największemu skażeniu (pod względem powierzchni i stopnia) uległ obwód Orłowski.

\* Region Centralnego Czarnozemia to południowe obszary europejskiej części Rosji (graniczące z Ukrainą), najbardziej skażone w wyniku awarii elektrowni atomowej w Czarnobylu 25.04.1986 – przyp. red.

**Tabela 1. Powierzchnia skażenia lasów w Regionie Centralnego Czarnozemia (Kosičenko i Ščetenkin 1988)**

Table 1. Area of forests radioactive contamination in the region of Central Černozem'e (Kosičenko &amp; Ščetenkin 1988)

Obwód Region	Powierzchnia lasów w strefach skażenia radioaktywnego [w tys. ha] Area of forests in zones of radioactive contamination [thousand ha]				
	I 1-5 Ci/ km <sup>2</sup>	II 5-15 Ci/ km <sup>2</sup>	III 15-40 Ci/ km <sup>2</sup>	IV > 40 Ci/ km <sup>2</sup>	Razem Total
Belgorodskij	15,4	–	–	–	15,4
Voronežskij	25,3	–	–	–	25,3
Kurskij	21,2	0,1	–	–	21,3
Lipeckij	15,4	–	–	–	15,4
Orlovskij	95,6	1,5	–	–	97,1
Tambovskij	1,7	–	–	–	1,7

Na obszarach położonych w I strefie skażenia radioaktywnego wszelką działalność związaną z gospodarką leśną, jeśli jest zgodna z wymaganymi normami, prowadzi się bez ograniczeń, stosując zasady i technologie odpowiednie dla danej strefy przyrodniczo-leśnej (Rukovodstvo 1997).

Zawartość radionuklidów w różnych komponentach lasu (w I strefie skażenia) przedstawiono w tabeli 2. Najwięcej cezu kumuluje ściółka leśna, zwłaszcza w lasach obwodu Biełgorodskiego (radioaktywność 3500 Bq/kg). Skażenie mineralnej warstwy gleby jest niższe i wynosi od 305 Bq/kg w obwodzie Lipeckim do 450 Bq/kg w obwodzie Biełgorodskim.

U roślin drzewiastych radioaktywny cezu kumuluje się głównie w korze. Średnia radioaktywność kory gatunków iglastych wynosi od 206 Bq/kg (obwód Biełgorodski) do 226 Bq/kg (obwód Woroneżski), gatunków liściastych o twardym drewnie – od 203 Bq/kg (obwód Biełgorodski) do 360 Bq/kg (obwód Woroneżski), a liściastych o miękkim drewnie – od 162 Bq/kg (obwód Biełgorodski) do 302 Bq/kg (obwód Lipiecki).

W mniejszym stopniu radionuklidy cezu kumulują się w drobnych gałęziach. Przykładowo, radioaktywność gałązek gatunków iglastych wynosi od 37 do 135 Bq/kg, a liściastych o miękkim drewnie od 59 do 105 Bq/kg odpowiednio w obwodach Woroneżskim i Biełgorodskim.

Średni stopień skażenia radioaktywnego igieł (liści) roślin drzewiastych niewiele różni się od radioaktywności gałązek liściastych o miękkim drewnie i wynosi odpowiednio 109 i 104 Bq/kg. Maksymalna aktywność cezu w liściach odnotowana w obwodzie Lipeckim wyniosła 171 Bq/kg, w obwodzie Woroneżskim – 87 Bq/kg, a w obwodzie Biełgorodskim – 147 Bq/kg.

Stosunkowo wysoka jest również radioaktywność cezu w roślinności trawistej (średni stopień skażenia wynosi od 174 Bq/kg w obwodzie Biełgorodskim do 315 Bq/kg w Lipeckim).

**Tabela 2. Zawartość radionuklidów w różnych komponentach lasu [w Bk/kg] w I strefie skażenia**Table 2. Content of radionuclides in different components of forest ecosystems [Bq/kg] in the 1<sup>st</sup> zone of contamination

<b>Gleba</b> Soil	<b>ściółka</b> forest litter	1467
	<b>warstwa mineralna</b> mineral layer	360
<b>Drewno okorowane</b> Barked wood		56
<b>Drewno nieokorowane (opalowe)</b> Non-barked fuel wood		123
<b>Kora</b> Bark		275
<b>Drobne gałęzie</b> Small branches		104
<b>Liście (igły)</b> Leaves (needles)		109
<b>Roślinność zielna</b> Grasses		325
<b>Mchy</b> Mosses		933

Mchy akumulują pierwiastki radioaktywne w największym stopniu, toteż ich średnia radioaktywność waha się od 704 Bq/kg w obwodzie Lipeckim do 850 Bq/kg w obwodzie Woroneżskim.

Najczystszy produkt roślinny w Regionie Centralnego Czarnozemia i w innych regionach europejskiej części Rosji skażonych radionuklidami jest okorowane drewno. Średnia radioaktywność okorowanego drewna gatunków iglastych sięga 38 Bq/kg w obwodzie Biełogorodskim, a gatunków liściastych, zarówno o drewnie twardym, jak i miękkim, waha się od 20 (okręgi Woroneżski i Lipecki) do 100 Bq/kg (w obwodzie Biełogorodskim). Radioaktywność cezu w drewnie nieokorowanym jest znacznie wyższa i sięga do 202 Bq/kg.

Badania wykazały, że jednym z podstawowych pochłaniaczy radionuklidów są grzyby. Średnia radioaktywność cezu w grzybach w okręgu Lipeckim wynosi 1250 Bq/kg i dwukrotnie przekracza dopuszczalne normę (DUA-96), która w okręgu tym, dla gatunków słabo pochłaniających radionuklidy, wynosi 407 Bq/kg.

Na podstawie analizy zawartości radionuklidów w różnych elementach lasu stwierdzono, że w Regionie Centralnego Czarnozemia skażenie promieniotwórcze lasów nie stanowi szczególnego zagrożenia dla ludności. Wyniki te były przesłanką zmniejszenia finansowania regionów tej strefy w zakresie ochrony ludności przed skażeniem promieniotwórczym.

Nasze badania wykazały jednak, że zawartość radionuklidów, szczególnie w żywności, jest znacznie zróżnicowana w zależności od warunków abiotycznych. Na przykład, szczególnie duży wpływ na zawartość radionuklidów w grzybach ma

stopień wilgotności gleby. W wilgotnym borze mieszanym, przy skażeniu wynoszącym  $1,1 \text{ Ci/km}^2$ , zawartość cezu 137 w grzybach osiągnęła  $1200 \text{ Bq/kg}$ , co przekracza dwukrotnie normę DUA-96. Na suchych siedliskach stężenie cezu 137 w grzybach było znacznie poniżej obowiązujących norm. W wilgotnych lasach, które charakteryzują się glebami piaszczysto-gliniastymi bogatymi w humus, zawartość cezu 137 w grzybach przekracza normę DUA-96 nawet przy skażeniu  $0,4\text{--}0,5 \text{ Ci/km}^2$ . Nie stwierdzono przekroczenia poziomu aktywności w owocach maliny i poziomki, natomiast w przypadku żurawiny wyniósł on  $800 \text{ Bq/kg}$  i znacząco przekroczył dopuszczalny poziom.

Na obszarze małego skażenia źródłem dużego zagrożenia promieniotwórczego jest popiół i sadza z pieców grzewczych. Wiąże się to ze wzrostem koncentracji radionuklidów w trakcie spalania drewna (szczególnie z części odziomkowej). Badania popiołu i sadzy uzyskanych w wyniku spalania odpadów drewna i ściółki leśnej w piecach gospodarstw domowych wykazały, że największą aktywność wykazuje popiół ze spalanej ściółki –  $1260 \text{ Bq/kg}$ , a mniejszą ze spalonych odpadów pozrębowych –  $450 \text{ Bq/kg}$ , przy czym maksymalną aktywność wykazuje drewno osiki –  $560 \text{ Bq/kg}$ . Najwyższą aktywnością cechuje się sadza, która osadza się na ścianach kominów po spalaniu drewna dębowego – do  $3500 \text{ Bq/kg}$ , co jest porównywalne z aktywnością odpadów promieniotwórczych (Krivolutckij i in. 1988; Kozubov, Taskaev 1994).

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że głównymi komponentami ekosystemów leśnych kumulującymi radionuklidy są ściółka leśna i próchnicza warstwa gleby. W ekosystemach leśnych najintensywniej kumulują cezu 137 te rośliny, których korzenie lub ich odpowiedniki (ryzoidy) znajdują się w warstwie ściółki (mech, grzyby). Stopień skażenia grzybów i jagód w lasach w I strefie skażenia radioaktywnego może przekroczyć dopuszczalne normy i dlatego kontrola żywności jest konieczna.

Najwyższe stężenia cezu 137 w I strefie odnotowano w popiele ze spalania drewna i ściółki leśnej. Aktywność popiołu jest porównywalna z aktywnością odpadów promieniotwórczych, wobec czego konieczne są specjalne zabiegi w celu jego dezaktywacji. Tym samym, w Regionie Centralnego Czarnozemia, na terenach leśnych skażonych w stopniu słabym, konieczne są dalsze badania i działania w celu ochrony ludności przed napromieniowaniem. Przede wszystkim konieczne są rzetelne badania dotyczące kontroli radiologicznej miejsc zbioru produktów leśnych (jagód, grzybów, roślin leczniczych), koszenia traw, które na pewnych obszarach mogą kumulować radionuklidy w ilościach przekraczających dopuszczalne normy bezpieczeństwa.

Konieczne jest zatem wprowadzenie ograniczeń na pozyskanie drewna do celów gospodarczych, nawet na terenach ze skażeniem  $1\text{--}5 \text{ Ci/km}^2$ , lub nakazanie bezwzględnego usunięcia kory z drzew oraz wprowadzenie gazowego lub elektrycznego systemu grzewczego w wyluszczeniach działających w tej strefie zagrożenia. Obowiązuje już zakaz wykorzystywania popiołu jako nawozu do użyźniania pól i działek.

Drugim problemem ekologicznym związanym z promieniowaniem radioaktywnym w Regionie Centralnego Czarnozemia jest zapewnienie bezpieczeństwa

ludności w strefie czynnych elektrowni atomowych Nowoworoneżskiej i Kurskiej. Obecnie na terenie Rosji działa 26 elektrowni atomowych, w których w ciągu roku dochodzi do 40 niespodziewanych, nagłych wyłączeń, stwarzających niebezpieczeństwo skażenia radioaktywnego terenów sąsiadujących.

Głównym elementem chroniącym środowisko przed skażeniem radioaktywnym jest las charakteryzujący się określonym, odmiennym niż w innych ekosystemach, sposobem pierwotnego rozprzestrzeniania się oraz dalszą migracją radionuklidów.

Badania dynamiki skażenia radioaktywnego terenów po katastrofach nuklearnych (Krivolucki i in. 1988) wykazały, że las – jako długotrwały i złożony komponent środowiska, odgrywa główną rolę w pochłanianiu i wiązaniu radionuklidów przez różne elementy drzewostanu (drzewa, ściółkę, warstwę próchniczną) oraz przeciwdziała dalszemu ich przenoszeniu i skażeniu nowych terenów. Las pochłania główną część (do 80%) opadów radioaktywnych, aktywnie i biernie wiąże je i uniemożliwia dalsze przenoszenie. Doświadczenia zdobyte od czasu awarii elektrowni atomowej w Czarnobylu dowodzą, że liczne rozwiązania inżyniersko-techniczne stosowane przy dezaktywacji skażonego terenu okazały się mało efektywne, a w niektórych przypadkach nawet pogorszyły istniejącą sytuację ekologiczną (Kozubov, Taskaev 1994). Tymczasem obserwuje się proces samooczyszczania się ekosystemów w wyniku naturalnych procesów znacznie przewyższających skuteczność metod technicznych. Przy czym rola leśnej ściółki w pochłanianiu i kumulacji radionuklidów okazała się tak wielka, że dla jej zachowania zostało wstrzymane użytkowanie obumarłego (zrudziałego) lasu.

W związku z istotną rolą lasu w ochronie radiologicznej stwierdzono, że na terenach skażonych należy zachować drzewostany zdrowe, a silnie skażone radionuklidami tereny porolne ( $>80 \text{ Ci/km}^2$ ) należy zalesić. Dla dużych otwartych obszarów stepowych należy określić lesistość optymalną.

Chociaż zbiorowiska leśne są najefektywniejszym naturalnym elementem przyrody pełniącym funkcje ochronną przed promieniowaniem w strefie czynnych elektrowni atomowych, to jednak obecnie istniejące drzewostany, szczególnie w Regionie Centralnym Czarnozemia, nie mogą wystarczająco pełnić tej funkcji.

Po pierwsze, lesistość strefy lasostępu w europejskiej części Rosji jest niewielka. W obwodach Woroneżskim i Kurskim nie przekracza 10%, podczas gdy funkcje glebochronna i ochronna przed promieniowaniem radioaktywnym drzewostany przejawia się dopiero przy lesistości 30%.

Po drugie, na piaszczystych tarasach rzecznych, które otaczają tereny elektrowni atomowych, zazwyczaj rośnie sosna. Zwykle są to monokultury sosnowe, bez domieszki liściastych gatunków, mało odporne na choroby patogeniczne i podatne na pożary. Podczas pożarów radionuklidy razem z dymem, kurzem i resztkami roślinnymi przenoszą się na nieskażone tereny. Wokół elektrowni w Nowoworoneżu, na brzegu rzeki Don i Woroneż, rosną bory sosnowe z odnowienia sztucznego. W promieniu 10 km znajdują się lasy rozległego uroczyska Oleń-Kołodzieżnoje i kompleks borów sosnowych w wokół Nowoworoneża.

Gatunki iglaste mają wyższy współczynnik początkowego pochłaniania radionuklidów. Wielkość tego współczynnika dla młodych drzewostanów sosnowych

wynosi 90–95%, a dla drzewostanów sosnowych w średnim wieku 70–90%. Jednocześnie drzewostany sosnowe zatrzymują 2–3 razy więcej promieniowania radioaktywnego niż lasy liściaste i 8–10 razy więcej niż inne typy biocenoz (łąki, bagna) ze względu na dużą powierzchnię aparatu asymilacyjnego (Tichomirov i in. 1988). Mimo to, z punktu widzenia ochrony przed promieniowaniem, drzewostany iglaste wykazują wiele cech negatywnych, które powodują, że ogranicza się ich wykorzystanie w zalesianiu terenów wokół obiektów atomowych.

Wiadomo, że drzewostany iglaste mają dwukrotnie mniejszą odporność na promieniowanie radioaktywne niż liściaste, co można tłumaczyć znacznie większymi rozmiarami chromosomów (teoria „tarczy”) oraz znacznymi różnicami właściwości drewna (Kozubov, Taskaev 1994). Po awarii elektrowni w Czarnobylu drzewostany iglaste zamarły w ciągu jednego roku w promieniu 15 km („zrudziały” las), podczas gdy wiele gatunków liściastych nie wykazywało widocznych objawów zmian ani w organach wegetatywnych, ani generatywnych. Tylko w terenach skażonych w stopniu najwyższym (dawka pochłonięta rzędu kilkudziesięciu grejów) u niektórych gatunków liściastych pojawiły się radiomorfozy (niedziedziczne zmiany narządów wegetatywnych), które po upływie 1–2 lat nie były już wykrywalne.

Drugą negatywną cechą gatunków iglastych jest ich wysoka podatność na pożary, stąd też konieczne jest zakładanie specjalnych upraw iglastych z domieszką gatunków liściastych.

Wyniki badań dotyczących promieniowania jonizującego w strefie do 30 km wokół elektrowni Nowoworoneżskiej i badań produktów leśnych z zastosowaniem analizy gamma-spektrometrycznej prowadzonych na 8 powierzchniach doświadczalnych przedstawiono w tabeli 3.

Moc dawki ekspozycyjnej w obszarze tej strefy i skażenie gleby przez radionuklidy w większości przypadków odpowiadają naturalnym wskaźnikom środowiska. Jednak, im bliżej elektrowni atomowej, tym bardziej zwiększa się promieniowanie gamma i skażenie promieniotwórcze gleby. W poszczególnych częściach strefy radioaktywność przekracza poziom  $1 \text{ Ci/km}^2$ , przy którym teren można uznać za „czysty” ekologicznie, a najwyższe skażenie promieniotwórcze gleby stwierdzono nie w bezpośredniej bliskości, lecz w odległości 2 km od elektrowni atomowej, w miejscach pierwszego opadu radionuklidów pochodzących z kominów wentylacyjnych.

W tabeli 4 przedstawiono wyniki analiz aktywności cezu 137 w różnych komponentach drzewostanów sosnowych rosnących wokół elektrowni atomowej w Nowoworoneżu w odległości do 30 km. Charakter rozprzestrzeniania się radionuklidów w komponentach ekosystemów leśnych w zasadzie jest podobny jak wokół elektrowni w Czarnobylu. Nieznacznie większą zawartość radionuklidów w mchach niż w ściółce leśnej można wyjaśnić długotrwałym działaniem niewielkich dawek promieniowania jonizującego w strefie czynnych elektrowni atomowych, stopniowym wypłukiwaniem radionuklidów ze ściółki leśnej, szczególnie na piaszczystych glebach, dostarczaniem radionuklidów do części nadziemnych wieloletnich mchów nie tylko przez ryzoidy ze ściółki i wierzchniej warstwy gleby, ale również przez epidermę liści i łodygi w warunkach dużej wilgotności gleby. W



**Tabela 3. Skażenie radioaktywne wokół elektrowni atomowej w Nowoworoneżu (w 1994)**  
 Table 3. Radioactive contamination around nuclear power station in Novovoroneż (1994)

Kod Code	Lokalizacja Location	Odległość od elektrowni Distance from the nuclear power station	Promienio- wanie gamma Gamma radiation	Zanie- czyszczenie cez 137 Cez 137 contami- nation	Charakterystyka drzewostanów Forest stand properties
		km	μR/h	Ci/km <sup>2</sup>	
<b>na północ</b> North of the station					
01K	Novousmanski Leschoz, 52	35,0	11,0	0,76	<b>sosna, 30 lat</b> pine, 30 years old
02K	Novousmanski Leschoz, Zirowska Dača, 40	20,0	11,5	0,82	<b>sosna, 30 lat</b> pine, 30 years old
03K	Dawydovski Leschoz, Olen-Kolodeznoje, 30	10,0	12,5	0,87	<b>sosna, 25 lat</b> pine, 25 years old
04K	Dawydovski Leschoz, 115	2,0	14,0	1,01	<b>sosna, 25 lat</b> pine, 25 years old
05K	Dawydovski Leschoz, Novovoroneżske, 105	0,2	13,0	0,80	<b>sosna, 20 lat</b> pine, 20 years old
<b>na południe</b> South of the station					
06K	Dawydovski Leschoz, Anuškino, 12	15,0	11,5	0,69	<b>sosna, 25 lat</b> pine, 25 years old
07K	Dawydovski Leschoz, Chvorostianskoje, 44	20,0	11,5	0,51	<b>sosna, 20 lat</b> pine, 20 years old
08K	Dawydovski Leschoz, Liskinskije Sosny, 15	40,0	10,5	0,40	<b>sosna, 20 lat</b> pine, 20 years old

niektórych miejscach znaczną radioaktywnością charakteryzuje się kora drzew oraz roślinność trawiasta, przy tym takie procesy jak składowanie kory i jej spalanie powodują znaczne zwiększenie koncentracji radionuklidów.

Ważnym czynnikiem powodującym wzmocnienie ochronnej roli lasów przed promieniowaniem jest zdolność danego gatunku drzewa do pochłaniania radionuklidów. Jak stwierdzono na podstawie badań odnowień wokół elektrowni atomowej w Czarnobylu, w strefie szerokości 30 km (Annenkov, Judinceva 1991), radionuklidy są akumulowane najintensywniej przez szybko rosnące gatunki drzewiaste z płytkim systemem korzeniowym, rosnące na siedliskach wilgotnych. U drzew tych gatunków radionuklidy przenikają koncentrycznie wzdłuż promienia w głąb pnia, daleko poza słoje przyrostu rocznego z roku awarii (Kosičenko 1995). Duża ilość radionuklidów akumuluje się w pniach świerka i osiki, których radioaktywność w wilgotnych warunkach siedliskowych kilkakrotnie przekracza radioaktywność innych gatunków drzew.

**Tabela 4. Aktywność cezu 137 w różnych komponentach drzewostanów sosnowych w strefie szerokości 30 km wokół elektrowni atomowej w Nowoworoneżu [w Bk/kg]**

Table 4. Activity of Cez 137 in different components of pine stands in the 30-kilometre zone around nuclear power station in Novovoronež [w Bk/kg]

Kod Code	Ściółka leśna Forest litter	Mchy Mosses	Roślinność zielna Grasses	Igły Needles	Kora Bark	Drewno Wood
01K	96	137	124	70	120	15
08K	111	181	174	81	165	16
55K	204	252	215	96	244	23
107K	444	518	300	148	260	38
185K	93	145	185	90	144	19
148K	52	107	80	60	70	15
244K	53	104	78	61	72	15
16K	74	112	82	62	74	16

Biorąc pod uwagę odporność i zdolność drzew różnych gatunków do pełnienia ochronnej funkcji przed promieniowaniem, należy różnicować strukturę drzewostanów wokół obiektów jądrowych odpowiednio do dawek promieniowania, a także wymagań gospodarczych i ekologicznych w poszczególnych częściach 30 km strefy ochronnej (teren zakładu, bliższa strefa – do 15 km, i dalsza – do 30 km). Strefę ochronną wokół elektrowni należy zaprojektować tak, aby zapewnić bezpieczeństwo ludności, uwzględniając możliwość wystąpienia awarii i jej skutków podobnych do tych, jakie miały miejsce na obszarze strefy ochronnej do 30 km wokół elektrowni w Czarnobyliu.

Bardzo ważnym zagadnieniem jest utrzymanie drzewostanów rosnących na terenach skażonych w dobrym stanie zdrowotnym. Jednogatunkowe bory iglaste, bez domieszki gatunków liściastych, są mało odporne na choroby i szkodniki. W przypadku pożaru radionuklidy wraz z dymem, kurzem i resztkami roślinnymi mogą przenosić się na znaczne odległości. Dlatego konieczne jest opracowanie specyficznych zasad prowadzenia gospodarki leśnej na terenach skażonych, a także ustalenie listy gatunków drzew i krzewów przydatnych do zakładania lasów ochronnych.

Należy więc kontynuować badania dynamiki gromadzenia i migracji radionuklidów w ekosystemach leśnych na skażonych terenach w Regionie Centralnego Czarnozemia. Należy również opracować podstawy naukowe i rozpocząć tworzenie leśnych stref ochronnych wokół elektrowni atomowych w Nowoworoneżu i Kursku. Do tego celu niezbędne jest poznanie uwarunkowań ekologiczno-genetycznych i opracowanie odpowiednich metod i technologii wzmacniających odporność lasu. Na uwadze trzeba mieć nie tylko zagospodarowanie terenu pod kątem ochrony przed promieniowaniem radioaktywnym, ale również z uwzględnieniem ekologicznych, ekonomicznych i społecznych funkcji lasu. Już teraz zachodzi konieczność weryfikacji obowiązujących norm i zasad za-

gospodarowania terenów rolnych w Regionie Centralnego Czarnozemia z punktu widzenia melioracji leśnych i zwiększenia odporności drzewostanów. Wykorzystując wyniki badań z zakresu genetyki i selekcji, zaleca się kształtowanie biologicznie odpornych drzewostanów pochodzących z potomstwa drzew doborowych, drzew elitarnych i osobników o polepszonej jakości uzyskanej na drodze selekcji oraz ich rozmieszczenia w formie biogrup z wyraźnym rozdzieleniem pełnionych przez nie funkcji na leśną i społeczną.

(Tłum. M. Mikułowski)

Praca wpłynęła 15.04.2003. r. i została przyjęta przez Komitet Redakcyjny 20.06.2004 r.

## LITERATURA

- Annenkov B.N., Judinceva E. V. 1991: Osnovy sel'skochozjajstvennoj radiologii. Agropromizdat, ss. 287.
- Gosudarstvennyj doklad „O sostojanii okružajuščej prirodnoj sredy Rossijskoj Federacii v 1993 godu”. 1994: Zelenyj Mir, Rossijskaja Ekologičeskaja Gazeta, 26 (166).
- Kozubov G. M., Taskaev A. I. 1994: Radiobiologičeskie i radioekologičeskie issledovanija drevesnych rastenij. Nauka, Sankt Peterburg, ss. 256.
- Kosičenko H. E. 1995: Stroenie i udel'naja radioaktivnost' drevesiny na zagrjaznennyh territorijach. Tezisy dokl. koordinacion. soveščanija i Meždunar. nauč.-techn. konf. po sovremen. problemam drevesinovedenija, Brjansk, ss. 18.
- Kosičenko N. E., Ščetenkin C. B. 1998: Radioaktivnoe zagrjaznenie lesov i lesnoj produkcii Central'nogo Černozem'ja. Ekologija Central'nogo Černozem'ja Rossijskoj Federacii: Sb. nauč. tr (red. Ju. Ja. Filonenko, O. P. Negrobova), Izdatel. LEGI, Lipeck: 82-87.
- Krivoluckij D. A., Tihomirov F. A., Fedorov E. A., Pokarževskij A. D., Taskaev A. I. 1988: Dejstvie ionizirujuščej radiacii na biogeocenozy. Nauka, Moskva, ss. 240.
- Rukovodstvo po vedeniju lesnogo chozjajstva v zonach radioaktivnogo zagrjaznenija ot avarii na Černobyl'skoj AES (na period 1997-2000 gg.). Utv. Federal. služboj les. chozjajstva Rossii, 31.03.1997, Moskva, ss. 112.
- Maradudin I. I. 1991: Lesnoe chozjajstvo v uslovijach radioaktivnogo zagrjaznenija. Obzor. inform., VNIIClesresurs, Moskva, ss. 40.
- Murachtanov E. S., Bulatnyj I. L., Mišin S. B. Osobennosti lesnogo chozjajstva na radioaktivno zagrjaznennyh territorijach. Les. Žurn., 1-2: 39-43.
- Tichomirov F.A., Fedotov I. S., Karaban' R. T. 1988: K voprosu o kriterijach ocenki dejstvija chimičeskogo i radiacionnogo zagrjaznenija na sosnovye nasaždenija. Tr. ING., 72: 10-15.
- Šubin B. A. 1996: Lesnoe chozjajstvo v Černobyl'skoj zone Rossii. Les. chozjajstvo, 5: 2-5.