

Modelowanie węgla w ekosystemach leśnych – przegląd narzędzi

Carbon modelling in forest ecosystems – a review of tools

Krzysztof Korzeniewski , Emilia Wysocka-Fijorek 

Zakład Geomatyki, Instytut Badawczy Leśnictwa, ul. Braci Leśnej 3, Sękocin Stary 05-090 Raszyn

e-mail: K.Korzeniewski@ibles.waw.pl
e-mail: E.Wysocka-Fijorek@ibles.waw.pl

Abstract. The primary objective was to compare the structure, functionality, and applicability of five models commonly used in Europe – Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector (CBM-CFS3), EFIMOD, European Forest Information SCENario Model (EFISCEN), CO2FIX, and CASMOFOR – under conditions relevant to Poland. The scope of the work included analysis of forest biomass dynamics, mortality, decomposition of dead organic matter, soil carbon pools, and simulation of natural and anthropogenic disturbances. The review was based on published literature and supplemented by a systematic comparison of model assumptions. The main features of the models are summarised in Tables 1 and 2, while differences in growth, mortality, decomposition, and disturbance handling are presented in Tables 3–6. The methodology involved a structured review of model architecture and input data requirements, emphasising their capacity to simulate forest growth and carbon balance. CBM-CFS3 was identified as the most advanced in handling disturbances and land-use change, offering a wide range of modules and disturbance matrices. EFIMOD integrates tree-level growth processes with soil dynamics via the ROMUL module, explicitly capturing C/N interactions. EFISCEN, based on matrix structures, allows large-scale simulations at landscape and European levels but is less precise for uneven-aged stands. CO2FIX and CASMOFOR use simpler cohort approaches, suitable for stand-level simulations, with CASMOFOR focusing on afforestation scenarios and short-term carbon balance. Figures and tables show that the models differ significantly in the representation of tree growth, mortality, and decomposition, with EFIMOD providing the highest spatial resolution and EFISCEN ensuring scalability to policy-level applications. The results highlight that each model offers distinct strengths. CBM-CFS3 provides detailed decomposition and disturbance modules, EFIMOD excels in linking tree and soil processes, while EFISCEN is most effective for large-scale scenario analysis. CO2FIX and CASMOFOR remain practical tools for stand-level management and afforestation monitoring. Despite these differences, no universal “best” model could be identified. Instead, model selection depends on research objectives, data availability, and spatial scale. A consistent conclusion is that the use of statistical measures such as RMSE, NSE, and R^2 , combined with ecological validation (carbon balance, life cycles, response to disturbances), is essential for evaluating model efficiency.

In summary, the comparative analysis (Tables 1–6) demonstrates that forest carbon cycle modelling is highly diversified, ranging from simple balance models to complex disturbance-oriented systems. Fragmentation of approaches creates challenges for harmonisation at European and national levels. Nevertheless, adopting hybrid evaluation frameworks can improve methodological consistency and enhance the role of carbon models in supporting climate policy and sustainable forest management.

Słowa kluczowe: obieg węgla, biomasa nadziemna, biomasa podziemna, modele sekwestracji, CBM-CFS3, EFISCEN, CO2FIX, EFIMOD, CASMOFOR

Keywords: carbon cycle, aboveground biomass, belowground biomass, sequestration models, CBM-CFS3, EFISCEN, CO2FIX, EFIMOD, CASMOFOR

Narzędzia: Przy pisaniu artykułu wykorzystano model GPT-5.1 Thinking (ChatGPT), do podsumowania wstępnych notatek oraz do korekty językowej ostatecznej wersji tekstu.

Tools: In preparing the article, the GPT-5.1 Thinking model (ChatGPT) was used to summarise my initial notes and to proofread the final draft.

1. Wstęp

Według danych Eurostatu (2025) powierzchnia lasów w Europie wynosi około 160 mln hektarów, co stanowi 5% całkowitej powierzchni lasów na świecie. Lasy odgrywają istotną rolę w obiegu węgla (Masera i in. 2003; Cannell 1995). Są one ważne jako globalne rezerwuary, pochłaniacze lub źródło tego pierwiastka (Watson i in. 2000; Dixon i in. 1994). W kontekście zobowiązań państw członkowskich Unii Europejskiej dotyczących ograniczenia emisji gazów cieplarnianych oraz osiągnięcia neutralności klimatycznej, zastosowanie modeli obiegu węgla w przyrodzie oraz innych pierwiastków nie jest tylko tematem debaty naukowej, ale staje się niezbędnym narzędziem wspomagającym podejmowanie decyzji na poziomie krajowym (Rozporządzenie 2018; Porozumienie 2015; Protokół 1997; Konwencja 1992). Spośród ekosystemów lądowych lasy akumulują znaczne ilości węgla organicznego, jednak równie istotnym „magazynem” są torfowiska, które powinny być traktowane z taką samą uwagą jak zasoby węgla w ekosystemach leśnych. Przekłada się to bezpośrednio na konieczność ochrony torfów i mokradel oraz renaturyzacji terenów podmokłych i torfowisk (Van-Camp i in. 2004). Biomasa ekosystemów leśnych w literaturze dzielona jest na biomasę nadziemną oraz podziemną, która stanowi około 75% całkowitej puli i dwukrotnie przewyższa zasoby węgla w atmosferze (Zwydak i in. 2017; Farquhar i in. 2001). W celu oszacowania obiegu pierwiastków i ich sekwestracji w ekosystemach leśnych niezbędne jest zastosowanie narzędzi matematycznych – w postaci modeli.

Ze względu na istotne znaczenie tematu modelowania zawartości węgla w ekosystemach leśnych, a także fakt, że w Polsce dotychczas nie opublikowano artykułu tego typu, niniejsze opracowanie ma na celu przybliżenie czytelnikowi charakterystyk modeli w pracy badawczej. W niniejszym artykule porównano pięć modeli: CASMOFOR, Carbon Budget Model of Canadian Forest Sector (CBM-CFS3), CO2FIX, EFIMOD i European Forest Information SCENario Model (EFISCEN) pod względem możliwości i zastosowań. W pracy skupiono się na porównaniu podstawowych charakterystyk modeli, zaimplementowanych parametrach modelowania pod względem: śmiertelności drzewostanu, rozkładu martwej materii organicznej oraz węgla w glebach leśnych i macierzy oddziaływań zaburzających. Modele te wybrano ze względu na ich wykorzystanie na kontynencie europejskim oraz możliwość adaptacji do warunków klimatycznych panujących na terenie Polski.

Porównania dokonano na podstawie przeglądu literatury i wiedzy własnej autorów.

2. Wyniki

2.1 Ogólna charakterystyka modeli

CBM-CFS3 (Carbon Budget Model of Canadian Forest Sector) to zaawansowany model matematyczny, opracowany przez departament Natural Resources Canada rządu Kanady, służący do szacowania i prognozowania bilansu węglowego w lasach (Kurz i in. 2009). Model uwzględnia m.in. takie czynniki jak:

przyrost drzew, procesy glebowe, wylesianie i pożary. Jest szeroko stosowany przez naukowców, decydentów politycznych i organizacje pozarządowe na całym świecie do oceny wpływu różnych działań na bilans węglowy. Został zatwierdzony przez IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), co czyni go kluczowym narzędziem w kontekście krajowych inwentaryzacji gazów cieplarnianych (Alde i in. 2006). Model jest stale rozwijany i dostępny bezpłatnie do celów badawczych. Wymaga jednak specjalistycznej wiedzy i odpowiednich danych wejściowych (Pilli i in. 2018; Kurz i in. 2009).

EFIMOD (Discrete Lattice Ecosystem Simulator) to model opisujący akumulację węgla w ekosystemach leśnych, uwzględniający interakcje między wzrostem drzew a obiegiem materii w glebie (Komarov i in. 2003). Dzieli on węgiel na pulę w żywej biomase oraz w martwej materii organicznej i pulę glebową. Model jest wykorzystywany w analizach scenariuszy klimatycznych, analizy pożarów, składów gatunkowych i bilansów C/N (Komarov i in. 2003; Chertov i in. 2006; Shanin i in. 2016; Nadporozhskaya i in. 2018; Chertov i in. 2025).

EFISCEN (European Forest Information SCENario Model) to model symulacyjny do prognozowania zmian w europejskich lasach i oceny polityk leśnych (Verkerk i in. 2017; Schelhaas i in. 2007; Nabuur i in. 2000). Oparty na danych statystycznych model uwzględnia klimat, warunki glebowe oraz czynniki socjoekonomiczne. Pozwala na przewidywanie zmian w zasobach leśnych i ich wartości ekonomicznej, a także na symulowanie wpływu różnych scenariuszy polityk leśnych na emisje gazów cieplarnianych. Jest bezpłatny i szeroko stosowany przez instytucje takie jak Komisja Europejska i FAO (Schelhaas i in. 2007; Nabuurs i in. 2000).

CO2FIX to model na poziomie drzewostanu, służący do ilościowego określania roli lasów w globalnym cyklu węglowym i sekwestracji CO₂ (Mohren i in. 1999). Został opracowany w ramach projektu CASFOR. Model wykorzystuje podejście kohortowe, które uwzględnia konkurencję, śmiertelność i wycinkę drzew, co czyni go elastycznym i przydatnym w różnych typach lasów, od tropikalnych po lasy strefy umiarkowanej (Masera i in. 2003). Może symulować wzrost drzew w oparciu o wiek lub biomasę.

CASMOFOR to narzędzie do modelowania, którego głównym celem jest ocena ilości węgla sekwestrowanego w systemie leśnym (CASMOFOR 2014). Chociaż pierwotnie opracowany na potrzeby Węgier, może być adaptowany do innych krajów, pod warunkiem posiadania odpowiednich danych. Pomaga w podejmowaniu decyzji związanych z gospodarką leśną i określa wpływ działań na pulę węgla, zgodnie z metodologią IPCC. Obejmuje również procesy takie jak obróbka i transport drewna. Model jest dostosowany do krótkich cykli symulacyjnych (maksymalnie 120 lat) i ma za zadanie obserwować efekt pochłaniania węgla w celu łagodzenia zmian klimatycznych (Haszpra 2011; Kim i in. 2015; Braga i in. 2024). Podsumowanie dotyczące ogólnej charakterystyki znajduje się w Tabelach numer 1 i 2.

2.2 Charakterystyka modeli pod względem parametrów dynamiki wzrostu drzewostanu

EFISCEN ma strukturę macierzy. Dla każdego typu lasu wyróżnionego według gatunku, regionu, klasy siedliskowej i właściciela utrzymywana jest osobna macierz. Model obejmuje 6–15 klas wieku oraz 10 klas zapasu. Klasyfikacja według wieku i zapasu jest prosta, a zakres klas jest szerszy niż w pozostałych modelach. W EFISCEN wzrost modeluje się przez przesuwanie udziału powierzchni w macierzy z jednej komórki do następnej o wyższym zapasie. Klasa zapasu komórki może rosnąć do wartości maksymalnej, po czym wartość ta jest utrzymywana do czasu pozyskania. Model wzrostu w EFISCEN wykorzystuje tablice zasobności oparte na macierzy dynamiki wzrostu dla typów lasu i wyrażone pięcioletnimi bieżącymi przyrostami netto, pochodzącymi z danych inwentaryzacyjnych lub innych tablic dla każdego typu lasu (Schelhaas i in. 2007; Kim i in. 2015; Schelhaas i in. 2016). CO2FIX przyjmuje podejście kohortowe. Kohorta może oznaczać grupę sukcesyjną, grupę gatunków mieszanych albo warstwę w układzie wielowarstwowym. Każda kohorta rośnie, zamiera, jest pozyskiwana i konkuruje jako jednostka w obrębie drzewostanu, dzięki czemu nawet w jednym drzewostanie można odwzorować bardziej złożoną dynamikę. CO2FIX ma cztery komponenty biomasy drzew: pień (z korą), ulistnienie, gałęzie i korzenie. Wykorzystuje współczynniki i tempo wzrostu zależne od czasu, aby

oszacować ilość gałęzi, ulistnienia i korzeni na podstawie grubizny. Na bazie produkcji węgla oblicza się przepływy do innych komponentów. W przeciwieństwie do CBM-CFS3 model CO2FIX nie stosuje szczegółowych konwersji z objętości do biomasy, lecz używa stałej wartości do konwersji. Nie różni też kłody handlowej i „innego” drewna ani korzeni cienkich i grubych w pulach biomasy (Mohren i in. 1999; Masera i in. 2003; Schelhaas i in. 2004). CASMOFOR oblicza brutto pierwotną produkcję węglową drewna (tC/rok/ha) jako iloczyn bieżącego rocznego przyrostu objętości (m³/ha/rok), gęstości drewna (t suchej masy organicznej/m³ drewna) oraz współczynnika konwersji C (tC/t suchej masy organicznej). Na potrzeby wzrostu CASMOFOR przyjął pięć kroków: (1) oszacowanie przyrostu objętości nadziemnych części drzew; (2) przemnożenie objętości przez współczynnik rozszerzenia biomasy (BEF); (3) konwersja wartości biomasy na wartości C; (4) obliczenie pozostałych komponentów biomasy przy użyciu BEF; (5) obliczenie NPP (Net Primary Product) jako sumy przyrostów wszystkich komponentów biomasy (Kim i in. 2015). CASMOFOR ma podejście do modelowania wzrostu podobne do CO2FIX, a procesy szacowania przyrostu biomasy w obu modelach są bardzo zbliżone i prostsze niż w CBM-CFS3. Różnice w podziale i wzroście między CO2FIX a CASMOFOR nie wydają się powodować dużych różnic w dokładności obliczeń biomasy komponentów, choć CO2FIX może mieć większą elastyczność w opisie przyrostu gałęzi wynikającą z różnic

Tabela 1. Cechy modelu
Table 1. Model characteristics

Cecha Feature	CBM-CFS3	EFIMOD	EFISCEN	CO2FIX	CASMOFOR
Rok pomysłu / pierwsza wersja modelu Year of concept / first model version	1980/1999 (Kurz and Apps, 1999)	1996/1999 (Komarov i in. 2003)	1999 (Sallnäs, 1990)/2000 (Nilsson i in. 1992)	1999 (Mohren i in. 1999)	1998 (Somogyi, 2019)
Wersje modelu Model versions	1–3, GCBM, CBM-HWP, ANSE	1–3	1.0, 2.0, 3.1, 4.1, 4.2, 4.3	1.2, 2.1, 3.2	1.0–7.0
Rodzaj modelu / Model type	empiryczny empirical	empiryczny empirical	empiryczny empirical	empiryczny empirical	empiryczny empirical
Minimalna powierzchnia obszaru modelowania (ha) Minimum modeling area (ha)	0.01	1	kilka tysięcy several thousand (Schelhaas i in. 2004)	1	1
Możliwość dostosowania do warunków klimatycznych Capability to adjust to climatic conditions	○	○	○	○	○
Zmienne klimatyczne do wprowadzenia przez użytkownika User-specified climate variables	temperatura, opady temperature, precipitation	temperatura, opady temperature, precipitation	temperatura temperature	temperatura, opady, parowanie temperature, precipitation, evaporation	temperatura, opady, promienie słoneczne temperature, precipitation, solar radiation
Modelowanie zmiennych klimatycznych w czasie Time-varying climate modeling	×	×	×	×	×
Polecany przez autorów – użytkowników okres modelowania (lata) Recommended modeling horizon (years)	50–100	100–200	50–70 (Nilsson i in. 1992); 200 (Schelhaas i in. 2004)	1–120	120–240 (Kim i in. 2015)
Możliwość analiz przestrzennych Spatial analysis capability	model GCBM	CommonGIS	×	×	×
Język programowania Programming language	C++	R v. 4.1.3	C++ (Schelhaas i in. 2007)	C++	MS Visual Basic
Format danych wejściowych do modelu Input data format	MS Access, Excel, txt/ csv	txt/csv	txt/csv	txt/csv	txt/csv, MS Excel
Licencja License	open source z zamkniętym kodem źródłowym open-source with closed source code				

Opis: ○ zawiera; × nie zawiera

Description: ○ contains; × does not contain

w budowie drzew i tempach wzrostu. W CBM-CFS3 drzewostan (lub grupę drzewostanów) definiuje się jako unikatowy obszar w jednostce przestrzennej. Dla każdego drzewostanu model przechowuje powierzchnię (ha), wiek oraz klasę użytkowania. Mieszane drzewostany można zapisać jako udział gatunków (Kurz i in. 2009). Moduł nadziemny ma 10 pul biomasy: drewno handlowe i „inne drewno”, ulistnienie, korzenie cienkie i grube, odrębnie dla gatunków iglastych i liściastych. Ponieważ tablice zasobności zwykle podają tylko zależność objętość – wiek, dokładne przeliczenie objętości na biomasę jest kluczowe. W modelu wykorzystuje się klasyfikację (Boudewyn i in. 2007), która rozróżnia m.in. drzewa w klasie handlowej i poza nią, korę pnia, nalot, ulistnienie i gałęzie. Proporcje poszczególnych komponentów do biomasy całkowitej wyznacza się z ich równań, z parametrami zależnymi od krain przyrodniczo leśnych gatunku wiodącego. Zapewnia to solidny punkt startowy i pozwala precyzyjniej śledzić zmiany biomasy niż w prostszych modelach. Równania Boudewyn i in. opracowano dla Kanady.

Poza Kanadą parametry nie są bezpośrednio stosowalne, więc trzeba je odtworzyć dla lokalnych warunków. Wymagają też licznych powierzchni próbnych, co bywa wąskim gardłem przy adopcji modelu i wpływa na dokładność (Bernier i in. 2010). CBM-CFS3, CO2FIX i CASMOFOR bazują na przyroście objętości pnia z tablic i relacjach alometrycznych, ale CBM-CFS3 używa bardziej zróżnicowanych danych i pełniejszego podziału na pule. CO2FIX i CASMOFOR są prostsze. EFISCEN operuje na macierzach wieku i zapasu. W CBM-CFS3 mieszane drzewostany odwzorowuje się przez udziały gatunków, co ułatwia reprezentację zróżnicowania (Kim i in. 2015). EFIMOD jest modelem skupiającym się na pojedynczych drzewach. Drzewostan to siatka, w której każde drzewo ma pozycję. Konkurencja o światło jest modelowana przez „strefy cienia”, a konkurencja o azot przez nakładające się „strefy odżywiania”. Wzrost i śmiertelność są liczone na poziomie drzewa, a procedury pozwalają różnicować alokację biomasy w zależności od tego, czy ogranicza je światło czy azot.

Tabela 2. Porównanie modeli obiegu węgla w lasach, na podstawie Kim i in. 2015 oraz wiedzy autorów

Table 2. Comparison of forest carbon cycle models, based on Kim et al. 2015 and the authors' knowledge

Klasyfikacja Classification	CBM-CFS3	CO2FIX	EFISCEN	CASMOFOR	EFIMOD
Opis ogólny General description	Model budżetu węgla w lesie Forest carbon budget model	Środowisko modelowania do ilościowej oceny sekwestracji węgla w ekosystemach leśnych A modeling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems	Model prognozowania zasobów leśnych Forest resource projection model	Model sekwestracji węgla dla zalesień Carbon sequestration model for forestations	Model do ilościowej oceny sekwestracji węgla w ekosystemach leśnych A model for the quantitative assessment of carbon sequestration in forest ecosystems.
Struktura ogólna (moduły) Overall structures (modules)	10 pul biomasy i 11 pul martwej materii organicznej 10 biomass pools and 11 DOM pools	Sześć głównych modułów: biomasa; gleba; produkty; bioenergia; finansowy; rozliczanie węgla Six main modules: biomass; soil; products; bioenergy; financial; carbon accounting	Generator macierzy, symulator macierzy, moduł glebowy Matrix generator, matrix simulator, soil module	Pule: powietrze, biomasa, martwa materia organiczna, produkty drzewne, gleba, drewno opałowe, rozkładające się produkty drzewne Pools: air, biomass, dead organic matter, wood products, soil, fuelwood, decomposing wood products	4 główne moduły: biomasa, gleba, klimat, różnorodność biologiczna Four core modules: biomass, soil, climate, biodiversity.
Biomasa nadziemna Aboveground biomass	○	○	○	○	○
Biomasa podziemna Belowground biomass	○	○	○	○	○
Martwa materia organiczna Dead organic matter	○	○	×	○	○
Dynamika gleby Soil dynamics	○	Yasso	Yasso	○	ROMUL
Dynamika na poziomie drzewostanu Stand-level dynamics	○	○	×	○	BioCalc
Dynamika na poziomie krajobrazu Landscape-level dynamics	○	CO2Land	○	○	SCLISS
Emisja CO₂ CO ₂ emission	○	○	○	○	○
Emisja CH₄ CH ₄ emission	○	○	×	×	○
Emisja CO CO emission	○	○	×	×	○
Emisja N₂O N ₂ O emission	×	○	×	×	○
Niemetanogenne związki organiczne Non-methanogenic organic compounds	×	○	×	×	×

Opis: ○ zawiera; × nie zawiera

Description: ○ contains; × does not contain

Roczny przyrost każdego drzewa dzieli się na pięć komponentów: pień, gałęzie, ulistnienie/igły, korzenie drobne i korzenie grube. Zapasy grubizny obliczane są z wysokości i pierśnicy równaniem objętości używanym w EFIMOD, a następnie łączonym z alokacją przyrostu do komponentów (Shanin i in. 2014). Moduł wzrostu drzew połączony jest z modelem ROMUL opisującym dynamikę materii organicznej gleby. ROMUL wyróżnia trzy główne pule: ściółkę/leśną warstwę organiczną, humus nie stabilny w poziomach mineralnych i humus stabilny w poziomach mineralnych; wyznacza też pulę mineralnego N dostępnego dla drzew. Tempo rozkładu zależy od temperatury, wilgotności oraz składu chemicznego resztek (Chertov i in. 2001). W odróżnieniu od modeli kohortowych (CO2FIX) i macierzowych (EFISCEN), EFIMOD operuje na pojedynczych drzewach i przestrzeni, dzięki czemu jawnie symuluje konkurencję o światło i azot oraz bilans C/N na styku drzewo – gleba w jednym schemacie. Podsumowanie dotyczące wzrostu w modelach znajduje się w Tabeli numer 3.

2.3 Charakterystyka modeli pod względem parametrów śmiertelności drzewostanu

Śmiertelność drzewostanu odnosi się do tempa, w jakim zamierają drzewa w drzewostanie. Zrozumienie i modelowanie

tego procesu ma kluczowe znaczenie dla oceny zdrowia lasów, produktywności i dynamiki ekosystemów leśnych. Analizy śmiertelności drzewostanów często mają na celu określenie warunków, w których drzewostany mogą osiągnąć normalną, oczekiwaną długość życia, zwykle zgodną z tablicami zasobności (Nilsson i in. 1992). W modelu EFISCEN śmiertelność jest wyrażana jako ułamek rzeczywistej objętości stojącej (maksymalnie do 10%). Stosowana do lasów, które nie są poddane cięciom sanitarnym ani ścięte oraz nie zostały niedawno przerzedzone (tj. tych, które nie otrzymały przyspieszenia wzrostu w wyniku niedawnych prac gospodarczych). Ogólnie zakłada się, że śmiertelność jest niska, zwłaszcza jeśli drzewostany są zarządzane (Schelhaas i in. 2016, 2007). Podobnie model CO2FIX i CASMFOR, gdzie śmiertelność to ułamek biomasy stojącej. Dodatkowo parametr ten można dostosować uwzględniając stosunek rzeczywistej biomasy do maksymalnej biomasy (Kim i in. 2015; Schelhaas i in. 2004). Model EFIMOD wykazuje śmiertelność drzewostanów poprzez: pozyskanie, pożary i gradacje owadzie (największy transfer węgla do puli detrytusowej) (Bhatti i in. 2009). Naturalna śmiertelność drzewostanów, interpretowana przez model EFIMOD, jest niższa w rzadkich drzewostanach. Na śmiertelność drzew wpływa liczba najbliższych drzew – gęstość drzewostanów (Shanin i in. 2012). Model CBM-CFS3 daje możliwość skalowania

Tabela 3. Zestawienie dotyczące wzrostu w poszczególnych modelach, na podstawie Kim i in. 2015 oraz wiedzy autorów
Table 3. Summary of growth across individual models, based on Kim et al. 2015 and the authors' knowledge

Model wzrostu Growth model	CBM-CFS3 Tempo przyrostu miąższości strzał na podstawie tablic zasob- ności oraz z użyciem zależności allometrycz- nych Growth rate of stem volumes from yield table, and use allometric rela- tionship	CO2FIX Tempo przyrostu miąższości strzał na podstawie tablic zasobności oraz z użyciem zależności allometrycznych Growth rate of stem volumes from yield table, and use al- lometric relationship	EFISCEN Bieżący roczny przy- rost miąższości na jednostkę powierzchni według macierzy Current annual area increment of volume per matrix	CASMOFOR Tempo przyrostu miąższości strzał na podstawie tablic zasobności oraz z użyciem zależności allometrycznych Growth rate of stem volumes from yield table, and use allome- tric relationship	EFIMOD Tempo przyrostu miąższości strzał na podstawie ta- blic zasobności oraz z użyciem zależności allome- trycznych Growth rate of stem volumes from yield table, and use al- lometric relation- ship
Klasyfikacja biomasy nadziemnej i podziemnej Classification of aboveground biomass and belowground biomass	○	○	×	○	○
Drzewostany mieszane Mixed-species stands	○	○	×	○	○
Przydatność handlowa Merchantability	○	×	×	×	×
Algorytm wygładzania krzywej (gdy mała lub brak miąższości handlowej) A curve-smoothing algorithm (when little or no merchantable volume)	○	×	×	×	×
Klasyfikacja wzrostu biomasy (przyrost pul) Biomass growth classification (pools increment)	10 (drewno handlowe, inne drewno, ulistnie- nie/igłowie, korzenie drobne, korzenie grube – dla każdego: liściaste i iglaste) 10 (merchantable, other wood, foliage, fine roots, coarse roots for each hardwood, softwood)	4 (strzała [z korą], ulistnienie/igłowie, gałęzie, korzenie) 4 (stem [including bark], foliage, branches, roots)	Całkowity przyrost miąższości według macierzy Total volume increment per matrix	3 (strzała [wraz z gałęziami], liście, korzenie) 3 (stem [including branches], leaves, roots)	5 (strzała, gałęzie, liście/igły, korzenie drobne, korzenie grube) 5 (stem, branches, foliage, fine roots, coarse roots)

Uwaga: ○ uwzględniono; × nie uwzględniono
Note: ○ included; × not included

śmiertelności drzewostanów od 5–95% poprzez naturalne zaburzenia tj. pożary czy gradacje owadzie. Dodatkowo użytkownik ma możliwość tworzenia własnych macierzy zamierania drzewostanów w modelu (dotyczy to również innych zaburzeń w drzewostanie) (Kull i in. 2019). Podsumowanie dotyczące śmiertelności w modelach znajduje się w Tabeli numer 4.

2.4 Charakterystyka modeli pod względem parametrów rozkładu martwej materii organicznej oraz modelowania węgla w glebach leśnych

Martwa materia organiczna (ang. *death organic material*) odnosi się do nieożywionego materiału organicznego w ekosystemie, który obejmuje martwe drewno, ściółkę i inne rozłożone szczątki roślinne i zwierzęce. Jest kluczowym składnikiem obiegu węgla i dynamiki składników odżywczych. EFISCEN interpretuje martwą materię organiczną poprzez naturalną śmiertelność, która przyczynia się do powstania martwego drewna stojącego, a po upadku staje się częścią martwej materii organicznej (dalej MMO). Elementy MMO to pozostałości po ścińce drzew, opad igliwia/liści, gałęzi do ściółki w wyniku naturalnego obiegu i naturalnej śmiertelności. W modelu frakcjonowanie i rozkład leżącego martwego drewna są modelowane jako redukcja masy (Schelhaas i in. 2016; 2007). EFISCEN oraz CO2FIX zawierają wbudowany dynamiczny moduł węgla w glebie o nazwie YASSO. Moduł ten jest integralną częścią ogólnej architektury modelu (Masera i in. 2003; Schelhaas i in. 2016; 2007). Model EFIMOD zawiera ROMUL (*model of soil organic matter dynamics*), który jest modelem specjalnie zaprojektowanym do dynamiki materii organicznej gleby. ROMUL jest modelem dynamiki materii organicznej gleby opartym na założeniu, że w trakcie rozkładu i humifikacji materii organicznej gleby zachodzi zmiana zespołów destruentów (Chertov i in. 2001).

Ilość i skład gatunkowy destruentów zależą od właściwości biochemicznych resztek organicznych oraz warunków hydrotermicznych. W ten sposób możliwe jest obliczanie współczynników tempa rozkładu jako funkcji biochemicznych, opadu ściółki, temperatury gleby i jej wilgotności. Model CO2FIX określa ilość wejściową martwej materii organicznej, która pochodzi z wartości podanych przez użytkownika: igliwie, liście, gałęzie (wyrażonych w t C ha⁻¹ rocznie). Źródła te obejmują śmiertelność naturalną, śmiertelność wynikającą z zabiegów gospodarczych oraz pozostałości po wyrębie (Masera i in. 2003). W modelu CASMOFOR oraz CO2FIX można wykorzystać studia przypadków oraz opinie ekspertów do określenia wskaźników śmiertelności (Somogyi, 2019). CASMOFOR nie modeluje rozkładu MMO w glebie, w związku z tym rozkład opisany jest wyłącznie przez rozpad MMO (Kim i in. 2015; Somogyi 2019). Ilość uwolnionego węgla szacuje się na podstawie ilości MMO pomnożonej przez szybkość rozkładu oraz szybkości rozpadu związku organicznego. CASMOFOR modeluje rozkład w stosunkowo prosty sposób, bez uwzględniania dynamiki MMO w glebie, a zmiany przepływu węgla nie mogą być uchwycone z wystarczającą precyzją, w przeciwieństwie do innych modeli. CBM-CFS3 posiada strukturę przedziałów (pul) zgodne z charakterystyką DOM (MMO) (Kurz i in. 2009; Liski i in. 2001). CBM-CFS3 posiada zróżnicowane pule do szacowania tempa rozkładu, które zależą od czasu i temperatury zarówno w częściach nadziemnych, jak i podziemnych. Dodatkowo różne zmienne dotyczące struktury i typu drzewostanów oraz przepływów węgla (*C fluxes*), które szacują obrót biomasy, mogą przedstawiać przepływ węgla w procesach rozkładu i zasobach glebowych w sposób bardziej realistyczny (Kim i in. 2015). Podsumowanie dotyczące modeli glebowych znajduje się w Tabeli numer 5.

Tabela 4. Zestawienie dotyczące śmiertelności w poszczególnych modelach, na podstawie Kim i in. 2015 oraz wiedzy autorów
Table 4. Summary of mortality across individual models, based on Kim et al. 2015 and the authors' knowledge

	CBM-CFS3	CO2FIX	CASMOFOR	EFISCEN	EFIMOD
Śmiertelność zależna od zagęszczenia drzewostanu Mortality by stand density	○	○	○	○	○
Śmiertelność w wyniku zaburzeń Mortality by disturbances	○	○	○	○	○
Częściowa śmiertelność wskutek opadu liści, igliwia Partial mortality due to leaf and needle litterfall	○	○	○	○	○
Klasyfikacja częściowej śmiertelności Classification for partial mortality	6 (drewno handlowe [iglaste lub liściaste], pozostałe drewno [iglaste lub liściaste], ulistnienie/igły [iglaste], ulistnienie/liście [liściaste], korzenie drobne [iglaste lub liściaste], korzenie grube [iglaste lub liściaste]) / 6 (merchantable stemwood [softwood or hardwood], other wood [softwood or hardwood], foliage [softwood], foliage [hardwood], fine roots [softwood or hardwood], coarse roots [softwood or hardwood])				
	3 (gałęzie, ulistnienie, korzenie) / 3 (branches, foliage, roots)				
	3 (drewno, liście, korzeń) / 3 (wood, leaves, root)				
	3 (gałąź, ulistnienie, korzeń) / 3 (branch, foliage, root)				
	5 (strzała, gałęzie, liście/igły, korzenie drobne, korzenie grube) / 5 (stem, branches, foliage leaves/needles, fine roots, coarse roots)				
Długowieczność (maksymalny wiek dla każdego gatunku) Longevity (maximum age for each species)	×	○	×	○	○

Uwaga: ○ uwzględniono; × nie uwzględniono
Note: ○ included; × not included

2.5 Charakterystyka modeli pod względem zaimplementowanych macierzy oddziaływań zaburzających

EFISCEN został opracowany dla lasów równowiekowych, gospodarowanych. Odchylenia od tej sytuacji (np. lasy różnowiekowe, niegospodarowane oraz systemy gniazdowe) sprawiają, że zastosowanie modelu może być mniej dokładne. Ponadto model obecnie nie nadaje się do symulacji gatunków drzew szybko rosnących o bardzo krótkiej rotacji, ze względu na 5-letni krok czasowy. Jednak przeprowadzono obiecujące testy z krokiem rocznym. Model może obsłużyć niewielkie wyłączenia powierzchni leśnej, ale nie nadaje się do analizy problemów związanych z wylesianiem na dużą skalę (Schelhaas i in. 2007). System modelowy EFIMOD został zaprojektowany do oceny dynamiki ekosystemów leśnych w skali lokalnej (drzewostanu). Parametry początkowe modelu określa się ręcznie, tj. poprzez wprowadzanie bezpośrednio przez użytkownika lub z plików wejściowych. Zarządzanie scenariuszami (w tym trzebieże, nasadzenia i pożary) realizowane jest w podobny sposób (Shanin i in. 2016). W CO2FIX można symulować pożary, odnowienia odroślowe, wiatrolomy, szkody od szkodników i chorób, zmiany klimatu oraz pozyskanie. Symulacja przebiega w scenariuszach z wybranymi kohortami, z wykorzystaniem modułu glebowy Yasso. Wyniki są prezen-

towane według typu zakłócenia (Schelhaas i in. 2004). Trzebież w CO2FIX sterowana jest wiekiem, intensywnością i alokacją usuniętej biomasy. Pożar symuluje się w sekcjach trzebieży, a jego intensywność odwzorowuje odsetek usuniętych drzew. Klasyfikacja alokacji usuniętych drzew jest szczegółowa, co ułatwia opis zmian w kohortach. Uszkodzenia od wiatru modelowane są podobnie. Można też zaprojektować scenariusz, w którym szkody od owadów dotyczą wyłącznie ulistnienia lub gałęzi, modyfikując tablice wzrostu pnia (Kim i in. 2015). CASMOFOR obejmuje trzebieże i rębnie zupełne jako procesy zakłóceń. Do wyznaczania terminu i intensywności tych działań używa średnich wartości wieku i klasy siedliskowej. W porównaniu z innymi modelami, wbudowane są tylko trzy kategorie zakłóceń: zmiany klimatu, rębnie zupełne i trzebieże, co ogranicza sposób szacowania wpływu zakłóceń na dynamikę węgla (Somogyi 2019). W CBM-CFS3 można symulować wpływ zakłóceń, dynamikę po zakłóceniu, zasoby węgla i zalesienia lub wylesienia poprzez moduł zmiany użytkowania gruntu (Kurz, Apps 1999; Kurz i in. 2009; Kull i in. 2019). Główne elementy zakłóceń są sklasyfikowane jako: elementy kontroli, oddziaływania, dynamiki po wystąpieniu zakłócenia i rozliczanie zmian w użytkowaniu gruntów. Takie uporządkowanie pozwala zastosować zaburzenia i metodycznie symulować zmiany zasobów i sekwestracji C. CBM-CFS3

Tabela 5. Zestawienie dotyczące modeli glebowych, na podstawie Kim i in. 2015 oraz wiedzy autorów

Table 5. Summary of soil models, based on Kim et al. 2015 and the authors' knowledge

	CBM-CFS3	Yasso	CASMOFOR	ROMUL
Struktura Structure	Cztery nadziemne pule DOM (bardzo szybka, szybka, średnia, wolna), trzy podziemne pule DOM (bardzo szybka, szybka, wolna) Four aboveground DOM pools (very fast, fast, medium, slow), three belowground DOM pools (very fast, fast, slow)	Kompartmenty rozkładu według składu chemicznego (ekstrakty, celulozy, związki ligninopodobne, humus 1, humus 2) Decomposition compartment by chemical composition (extractives, celluloses, lignin-like compounds, humus 1, humus 2)	Rozpad martwej materii organicznej w trzech kompartmentach (liście, pnie/lodygi, korzenie) Break-down of dead organic matter in three compartments (leaves, stems, roots)	Pule: warstwa organiczna (ściółka), zmienny humus poziomów mineralnych, stabilny humus poziomów mineralnych; rozkład zależny od temperatury i wilgotności Pools: organic horizon (litter), labile humus in mineral horizons, stable humus in mineral horizons; decomposition depends on temperature and moisture.
Dane wejściowe Input				
Temperatura powietrza Air temperature	○	○	×	○
Opady Precipitation	×	○	×	×
Początkowe zasoby C w glebie Initial soil C stock	×	○	×	○
Ilość ścióły Litter amount	○	○	×	○
Wilgotność Moisture	×	○	×	○
Wyniki Output				
Całkowite zasoby C Total C stock	○	○	○	○
Strumień C C flux	○	×	×	○
Emisja CO₂ CO ₂ emission	○	○	○	○

Uwaga: ○ uwzględniono; × nie uwzględniono

Note: ○ included; × not included

wyróżnia się elastycznością: w sterowaniu, oferuje opcje dla wielu typów zakłóceń, zmianę częstotliwości, kryteria przestrzenne, cechy drzewostanu, reguły kolejności oddziaływań na drzewostan. Model umożliwia też obsługę pul w macierzach zakłóceń. Wpływ zakłóceń modeluje się macierzą, która definiuje proporcje transferu C między pulami, domyślnie dostępnych jest 234 takich macierzy (Kull i in. 2019). Dodatkowo obejmuje coroczne zakłócenia naturalne, takie jak śmiertelność drzewostanu wywołana przez owady oraz zakłócenia antropogeniczne m.in. rębnie zupełne, cięcia sanitarne po pożarze i cięcia częściowe (trzebieże). Dzięki elastycznym opcjom oraz sprawnym, dobrze zorganizowanym procedurom CBM-CFS3 efektywnie obsługuje zakłócenia zarówno na poziomie krajobrazowym, jak i drzewostanowym. Podsumowanie dotyczące zaburzeń znajduje się w Tabeli numer 6.

3. Podsumowanie i wnioski

CBM-CFS3, CASMOFOR, EFIMOD działają na poziomie drzewostanu i krajobrazu. CO2FIX pracuje tylko na drzewostanie.

EFISCEN jest odpowiedni dla modelowania na poziomie wielkoobszarowym - krajobrazu. W ujęciu struktury modeli: CBM-CFS3 skupia się na dynamice C z zakłóceniami i zmianą użytkowania gruntu. CO2FIX oferuje moduły pozwalające śledzić C w produktach, bioenergii i finansach. CASMOFOR definiuje zróżnicowane pule i procesy, szczególnie przydatne w zalesieniach. EFISCEN wykorzystuje macierz, więc łatwo scala scenariusze z wielu modeli i skaluje się do dużych krajobrazów. EFIMOD skupia się na najmniejszej jednostce jaką jest drzewo, ale jest skalowalny do poziomu krajobrazu. Wszystkie modele korzystają z empirycznych krzywych zasobności. Zasadniczo opierają wzrost na danych empirycznych, lecz inaczej go szacują. CBM-CFS3 ma bardziej szczegółowe komponenty oraz rozbudowane konwersje z objętości do biomasy. CO2FIX i CASMOFOR liczą wzrost z relacji alometrycznych opartych na przyroście pnia i całkowitej biomasy pojedynczych drzew. EFISCEN jedynie przesuwając odpowiadające powierzchnie o jedną klasę zapasu w górę. To rozwiązanie odpowiada modelowaniu wielkoobszarowemu. Całkowitą długość życia drzewostanów/drzew uwzględniają tylko CO2FIX, EFISCEN,

Tabela 6. Zestawienie dotyczące zaburzeń, na podstawie Kim i in. 2015 oraz wiedzy autorów

Table 6. Summary of disturbances, based on Kim et al. 2015 and the authors' knowledge

	CBM-CFS3	CO2FIX	CASMOFOR	EFISCEN	EFIMOD
Zaburzenia naturalne Natural disturbance					
Pożar lasu Wildfire	○	○	×	○	○
Śmiertelność drzewostanu spowodowana przez owady Insect-induced stand mortality	○	○	×	×	○
Wichura Windstorm	×	○	×	×	×
Zmiana klimatu Climate change	○	○	○	○	○
Zaburzenia antropogeniczne Anthropogenic disturbance					
Rębna zupełna Clear-cut logging	○	○	○	○	×
Pozyskanie sanitarne po pożarze Salvage logging following wildfire	○	×	×	○	○
Selektywna wycinka częściowa (trzebież) Partial selective logging (thinning)	○	○	×	×	×
Odnowienie odroślowe Coppice regeneration	×	○	×	×	×
Oddziaływania (parametry określające przepływ C między pulami lub poza ekosystem) Impacts (parameters that determine the transfer of C between pools or out of the ecosystem)	Macierz Matrix	Ustalane przez użytkownika Assigned by user	Zapisy historyczne Historical record	Ustalane przez użytkownika Assigned by user	Ustalane przez użytkownika Assigned by user
Domyślna macierz Matrix default	○				
Macierz wybierana przez użytkownika Matrix user selection	○				
Liczba domyślnych macierzy Number of default matrix	234				
Dynamika po zaburzeniu Post-disturbance dynamics	○	○	○	○	○
Rozliczanie zmian użytkowania terenu Land-use change accounting	○	○	○	○	×
Częściowa śmiertelność drzewostanu Partial mortality of stand	○	○	○	×	○

Uwaga: ○ uwzględniono; × nie uwzględniono

Note: ○ included; × not included

EFIMOD. CBM-CFS3 przyjmuje ją z maksymalnego wieku w tablicach wzrostu i zasobności. CASMOFOR ogranicza symulację do maksymalnie 240 lat. Rozkład i gleba: CBM-CFS3 ma szczegółowe nadziemne i podziemne pule MMO z różnymi czasami rozkładu. Yasso podobnie jak ROMUL uwzględnia zmienne czynniki ekologiczne, w tym opad, początkowy zapas C w glebie, ilość ściółki i wilgotność. Zakłócenia w CBM-CFS3 sterowanie i macierze oddziaływań są elastyczne, co zwiększa realizm dla zdarzeń naturalnych i antropogenicznych. CO2FIX potrafi zasymulować wiele typów zakłóceń w scenariuszu z dobranymi kohortami, co ułatwia opis detali nawet wewnątrz jednego drzewostanu.

Z uwagi na konkurencyjność modeli od prostych bilansowych (EFISCEN) po złożone (CBM-CFS3), każdy zespół badawczy lub instytucja rozwija swój i podkreśla jego zalety. W efekcie powstaje sytuacja, w której trudno wyłonić obiektywnie „najlepszy” model, bo każdy promowany jest jako najbardziej adekwatny do zadania, dla którego został stworzony. To z kolei rodzi ryzyko fragmentacji wiedzy i utrudnia budowanie wspólnej, spójnej metodologii monitorowania obiegu węgla. Brakuje uniwersalnych standardów oceny efektywności modeli, a praktyka badawcza sprzyja powstawaniu „szkół” skupionych wokół konkretnych rozwiązań. Na chwilę obecną wydaje się rozsądnym wykorzystanie oceny efektywności modeli poprzez połączenie miar statystycznych (RMSE, NSE, R^2) z oceną biologicznej zgodności procesów tj.: bilans węgla, cykle życiowe drzewostanów, reakcja na zaburzenia (Dou i in. 2018; Dou, Yang 2017).

Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak konfliktu interesów.

Źródła finansowania badań

Praca została sfinansowana w ramach realizacji usług badawczych zleconych przez Dyрекcję Generalną Lasów Państwowych pt.: „Opracowanie metod, ocena i monitoring zwiększania pochłaniania CO₂ w „Lasach Węglowych” oraz „Usługi ekosystemów leśnych – ocena potencjału i możliwości wykorzystania w kontekście lasów społecznych i cennych przyrodniczo”.

Wkład autorów

K.K. – koncepcja artykułu, przegląd literatury, przygotowanie tekstu, korekta tekstu; E.W.-F. – koncepcja artykułu, przygotowanie tekstu, korekta tekstu.

Literatura

- Alde H., P. Gonzalez, M. Gytarsky, T. Kurz W. A., Ogle S., Raison J., Schoene D., Ravindranath N. H., Elhassan N. G., Heath L. S., Higuchi N., Kainja S., Matsumoto M., Sanz Sánchez M. J., Somogyi Z. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Chapter 4: Forest Land. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies, Japan, ISBN: 4-88788-032-4. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_04_Ch4_Forest_Land.pdf (dostęp 09.10.2025)
- Bernier P.-Y., Guindon L., Kurz W.A., Stinson G. 2010. Reconstructing and modelling 71 years of forest growth in a Canadian boreal landscape: a test of the CBM-CFS3 carbon accounting model, *Canadian Journal of Forest Research* 40: 109–118. DOI: <https://doi.org/10.1139/X09-177>.
- Bhatti J., Chertov O., Komarov A. 2009. Influence of Climate Change, Fire, Insect and Harvest on Carbon Dynamics for Jack Pine in Central Canada: Simulation Approach with the EFIMOD Model, *The International Journal of Climate Change: Impacts and Responses* 1: 43–61. DOI: <https://doi.org/10.18848/1835-7156/CGP/v01i03/37265>.
- Boudewyn P.A., Song X., Magnussen, S., Gillis, M.D. 2007. Model-based, volume-to-biomass conversion for forested and vegetated land in Canada, Canadian Forest Service Pacific Forestry Centre, 124 s. ISBN: 978-0-662-46513-3.
- Braga C., Petrea S., Raul Radu G., Cucu A., Serban T., Zaharia A., Leca S. 2024. Carbon Sequestration Dynamics in Peri-Urban Forests: Comparing Secondary Succession and Mature Stands under Varied Forest Management Practices, *Land* 13(4): 492. DOI: <https://doi.org/10.3390/land13040492>.
- Cannell M. 1995. Forests and the Global Carbon Cycle in the Past, Present and Future. EFI Research Report 2. European Forest Institute, 66 s. ISBN: 952-9844-06-9.
- Chertov O., Komarov A., Nadporozhskaya M., Bykhovets S., Zudin S. 2001. ROMUL – A model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling, *Ecological Modelling* 138: 289–308. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00409-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00409-9).
- Chertov O., Komarov A., Loukianov A., Mikhailov A., Nadporozhskaya M., Zubkova E. 2006. The use of forest ecosystem model EFIMOD for research and practical implementation at forest stand, local and regional levels, *Ecological Modelling* 194(1): 227–232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.10.015>.
- Chertov O., Frolov P., Shanin V., Pripulina I., Bykhovets S., Geraskina A. 2025. A Model of the Ectomycorrhizal Contribution to Forest Soil C and N Dynamics and Tree N Supply Within the EFIMOD3 Model System, *Plants* 14(3): 417. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants14030417>.
- Dixon, R.K.K., Solomon, A., Brown, S., Houghton, R., Trexler, M., Wisniewski, J. 1994. Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems, *Science* 263: 185–190. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.263.5144.185>.
- Dou X., Yang Y. 2017. Modeling and Predicting Carbon and Water Fluxes Using Data-Driven Techniques in a Forest Ecosystem, *Forests* 8(12): 498. DOI: <https://doi.org/10.3390/f8120498>.
- Dou X., Yang Y., Luo J. 2018. Estimating Forest Carbon Fluxes Using Machine Learning Techniques Based on Eddy Covariance Measurements, *Sustainability* 10(1): 203. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10010203>.
- Eurostat 2025. Key figures on the EU in the world – 2025 edition. Eurostat, Luxembourg, 88 s. ISBN: 978-92-68-24003-8.
- Farquhar G.D., Fasham M.J.R., Goulden M.L., Heimann M., Jaramillo V.J., Kheshgi H.S., Le Quere C., Scholes R.J., Wallace D.W.R. 2001. Climate change 2001: The Scientific Basis IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, 237 s. ISBN: 0521-80767-0.
- Haszpra L., red. 2011. Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective. Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9950-1>.
- Kim H., Kim Y.-H., Kim R., Park H. 2015. Reviews of forest carbon dynamics models that use empirical yield curves: CBM-CFS3, CO2FIX, CASMOFOR, EFISCEN, *Forest Science and Technology* 11: 212–222. DOI: <https://doi.org/10.1080/21580103.2014.987325>.
- Komarov A., Chertov O., Zudin S., Nadporozhskaya M., Mikhailov A., Bykhovets S., Zudina E., Zoubkova, E. 2003. EFIMOD 2—a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems, *Ecological Modelling* 170(2): 2. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(03\)00240-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(03)00240-0).
- Konwencja 1992. Ramowa Konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu sporządzona w Nowym Jorku dnia 9 maja 1992 r., Dziennik Ustaw 53: 1258–1282. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU19960530238/O/D19960238.pdf> (dostęp 09.10.2025).

- Kull S.J., Rampley G.J., Morken S., Metsaranta J.M., Neilson E.T., Kurz W.A. 2019. Operational-scale Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector (CBM-CFS3) version 1.2: user's guide. Natural Resources Canada Canadian Forest Service Northern Forestry Centre, 376 s. ISBN: 978-0-660-29083-6.
- Kurz W., Dymond, C., White, T.M., Stinson, G., Shaw, C., Rampley, G., Smyth, C., Simpson, B., Neilson, E., Trofymow, J.A., Metsaranta, J., Apps, M.J. 2009. CBM-CFS3: A model of carbon dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards, *Ecological Modelling* 220: 480–504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.10.018>.
- Kurz, W.A., Apps, M.J. 1999. A 70-Year Retrospective Analysis of Carbon Fluxes in the Canadian Forest Sector. *Ecol. Appl.* 9, 526–547. DOI: 10.1890/1051-0761(1999)009[0526:AYRAOC]2.0.CO;2.
- Liski, J., Pussinen, A., Pingoud, K., Mäkipää, R., Karjalainen, T. 2001. Which rotation length is favourable to carbon sequestration?, *Canadian Journal of Forest Research* 31(11): 2004–2013. DOI: <https://doi.org/10.1139/x01-140>.
- Masera, O.R., Garza-Caligaris, J.F., Kanninen, M., Karjalainen, T., Liski, J., Nabuurs, G.J., Pussinen, A., de Jong, B.H.J., Mohren, G.M.J. 2003. Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach, *Ecological Modelling* 164: 177–199. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00419-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00419-2).
- Mohren, G.M.J., Caligaris, J.F.G., Masera, O., Kanninen, M., Karjalainen, T., Pussinen, A., Nabuurs, G.J. 1999. CO2fix for Windows: a dynamic model of the CO₂-fixation in forests; Version 1.2. IBN-Research report 99/3, Wageningen, 39 s. ISSN: 0928-6896.
- Nabuurs, G.J., Schelhaas M.J., Pussinen A. 2000. Validation of the European Forest Information Scenario Model (EFISCEN) and a Projection of Finnish Forests, *Silva Fennica* 34(2): 2. <https://www.silvafennica.fi/article/638> (dostęp 09.10.2025).
- Nadporozhskaya, M.A., Chertov O.G., Bykhovets S.S., Shaw C.H., Maksimova E.Y., Abakumov E.V. 2018. Recurring Surface Fires Cause Soil Degradation of Forest Land: A Simulation Experiment with the EFIMOD Model, *Land Degradation & Development* 29 (7): 2222–2232. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3021>.
- Nilsson, S., Sallnaes, O., Duinker P. 1992. Future Forest Resources of Western and Eastern Europe. The Parthenon Publishing Group, Lancaster, 509 s. ISBN: 978-1-85070-424-9.
- Pilli, R., Kull S.J., Blujdea V., Grassi G. 2018. The Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector (CBM-CFS3): Customization of the Archive Index Database for European Union Countries. Springer, 75(71). DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0743-5>.
- Protokół. 1997. Protokół z Kioto do Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu sporządzony w Kioto dnia 11 grudnia 1997 r., *Dziennik Ustaw* nr 203: 13427–13450. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20052031684/O/D20051684.pdf> (dostęp 09.10.2025).
- Porozumienie. 2015. Porozumienie Paryskie, *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej* L 282: 4–18. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:22016A1019\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:22016A1019(01)) (dostęp 09.10.2025).
- Rozporządzenie. 2018. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/841 z dnia 30 maja 2018 r. w sprawie włączenia emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych w wyniku działalności związanej z użytkowaniem gruntów, zmianą użytkowania gruntów i leśnictwem do ram polityki klimatycznoenergetycznej do roku 2030 i zmieniające rozporządzenie (UE) nr 525/2013 oraz decyzję nr 529/2013/UE, *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej* L 156/1: 1–25. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R0841> (dostęp 06.10.2025).
- Sallnäs O. 1990. A Matrix Growth Model of the Swedish Forest, *Studia Forestalia Suecica* 183 (23). ISSN: 0039-3150.
- Schelhaas M.-J., Eggers J., Lindner M., Nabuurs G.J., Päivinen R., Schuck A., Verkerk P.J., Werf D.C. van der Zudin S. 2007. Model documentation for the European Forest Information Scenario model (EFISCEN 3.1.3). Alterra and European Forest Institute, Wageningen and Joensuu, *Alterra report 1559 and EFI technical report* 26: 1–119. ISSN: 1566-7197. <https://edepot.wur.nl/31239> (dostęp 09.10.2025).
- Schelhaas M.J., Esch P.W., van Groen T.A., Jong B.H.J., de Kanninen M., Liski J., Masera O., Mohren G.M.J., Nabuurs G.J., Palosuo T., Pedroni L., Vallejo A., Vilén T. 2004. CO2FIX V 3.1 A modelling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems. Wageningen University and Research, Wageningen, *Alterra-rapport* 1068, 122 s. <https://edepot.wur.nl/43524> (dostęp 09.10.2025).
- Schelhaas M.-J., Nabuurs G.-J., Verkerk P.J. 2016. Description of the modelling approach of the European Forest Information Scenario model (EFISCEN 4.1). European Forest Institute, *Joensuu. Technical Report* 99, 49 s. https://efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2018/tr_99.pdf (dostęp 09.10.2025).
- Shanin V., Komarov A., Mäkipää R. 2014. Tree species composition affects productivity and carbon dynamics of different site types in boreal forests, *European Journal of Forest Research* 133: 273–286. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-013-0759-1>.
- Shanin V., Valkonen S., Grabarnik P., Mäkipää R. 2016. Using forest ecosystem simulation model EFIMOD in planning uneven-aged forest management, *Forest Ecology and Management* 378: 193–205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.041>.
- Shanin V.N., Komarov A., Bykhovets S. 2012. Simulation modelling for sustainable forest management: a case-study, *Procedia Environmental Sciences* 13, 535–549. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.044>.
- Somogyi Z. 2019. CASMOFOR - CARbon Sequestration MOdel for FORestations. <http://www.scientia.hu/casmoform/index.php> (dostęp 09.10.2025).
- Van-Camp L., Bujarrabal B., Gentile A.R., Jones R.J.A., Montanarella L., Olazabal C., Selvaradjou S.-K. 2004. Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection. EUR 21319 EN/6. 872 s. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC28868/EUR%2021319%20EN-6.pdf> (dostęp 09.10.2025).
- Verkerk P.J., Schelhaas M.J., Immonen V., Hengeveld G., Kiljunen J., Lindner M., Nabuurs G.J., Suominen T., Zudin S. 2017. Manual for the European Forest Information Scenario Model (EFISCEN). EFI Technical Report 99. https://efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2018/tr_99.pdf (dostęp 09.10.2025).
- Watson R.T., Noble I.R., Bolin B., Ravindranath N.H., Verardo D.J., Dokken D.J. (red.) 2000. Land Use, Land Use Change, and Forestry, a Special report of the IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 30 s. ISBN: 92-9169-114-3.
- Zwydak M., Błońska E., Lasota J. 2017. Akumulacja węgla organicznego w glebach różnych typów siedlisk leśnych, *Sylwan* 161(1): 62–70. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2016093>.