

Możliwości zastosowania modelu SWAT w zlewniach leśnych

Potential applications of the SWAT model in forest catchments

Piotr Mroczek 

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

e-mail: P.Mroczek@ibles.waw.pl

Abstract. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) is a physical hydrological model for assessing the impact of land management on the water balance, erosion and pollution in catchment areas. It was developed by the United States Agricultural Research Service (USDA-ARS) and Texas A&M AgriLife Research and was initially used mainly for large areas (e.g. Mississippi and Missouri rivers), but over time it has also been applied in Europe, where it has been successfully used to model smaller catchments. The model integrates spatial and hydrological data, enabling the prediction of processes such as surface runoff, percolation or evapotranspiration. Studies have shown the effectiveness of SWAT in modelling hydrological processes, although the model still needs to be refined for small forest catchments, especially in the context of flow dynamics under extreme hydrological conditions. In addition, the development of SWAT enables the modelling of interactions between the water and carbon cycles, making it a valuable tool for climate and land use change studies. The model can be successfully applied on relatively small, forested watersheds.

Słowa kluczowe: modelowanie hydrologiczne, numer krzywej, infiltracja

Keywords: hydrological modelling, curve number, infiltration

1. Wprowadzenie

Zlewnie leśne odgrywają kluczową rolę w funkcjonowaniu ekosystemów wodnych, wpływając na jakość wód, bilans wodny oraz dynamikę transportu osadów i składników odżywczych. Ze względu na swoją złożoność i silne powiązania między procesami hydrologicznymi, geomorfologicznymi i biologicznymi, badania prowadzone w zlewniach leśnych wymagają narzędzi umożliwiających integrację danych przestrzennych, meteorologicznych i użytkowania terenu. Jednym z najbardziej wszechstronnych i powszechnie stosowanych narzędzi w tym zakresie jest model SWAT (ang. *Soil and Water Assessment Tool*) (Arnold i in. 1998). Pozwala on na długookresowe modelowanie przepływu wody, erozji gleb, transportu osadów oraz zanieczyszczeń w badanych zlewniach. Jego złożona budowa oraz zdolność do uwzględniania warunków naturalnych i antropogenicznych czyni go szczególnie przydatnym w analizach zlewni leśnych, które charakteryzują się dużą zmiennością sezonową oraz silnym wpływem warunków siedliskowych i struktury roślinności na obieg wody i materii. Model ten z uwagi na swoją złożoność wymaga bardzo dużej liczby danych wej-

ściowych, co czyni go narzędziem trudnym do zastosowania dla stosunkowo niewielkich obszarowo zlewni leśnych.

2. Model SWAT

Model SWAT jest od ponad 30 lat rozwijany przez United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service i Texas University. Pierwsze zastosowania modelu SWAT dotyczyły głównie dużych obszarów, jak np. dorzecze Missisipi (Arnold 1999; Jha i in. 2006). Obecnie model ten stosowany jest zarówno w opracowaniach mało i wielkoskalowych, jednak zastosowanie modelu dla dużych zlewni jest częściej spotykane dla obszarów z Ameryki Północnej i Azji (Janjić, Tadić 2023).

Z czasem SWAT znalazł grupę zwolenników wykorzystujących model w badaniach dla obszaru Europy, co pokazały liczne materiały konferencyjne m.in. TWRI (2003), EAWAG (2005) oraz UNESCO-IHE (2007). Pierwotnie model został stworzony dla potrzeb obszarów rolniczych, jednak już wersja SWAT 2005 pozwalała na symulację wzrostu drzewostanów od sadzonek do wieku dojrzałego (Gassman i in. 2007). Model SWAT integruje dane przestrzenne charakteryzujące daną zlewnię z rozpro-

Wpłynęło: 24.02.2025 r., zrecenzowano: 25.03.2025 r., zaakceptowano: 19.05.2025 r.

szonymi parametrami hydrologicznymi w celu przewidzenia procesów hydrologicznych, tj. spływu powierzchniowego, perkolacji, przepływu warstwy wodonośnej, ewapotranspiracji oraz symulowania przepływu wody w kanałach (Wu, Xu 2006). Z procesami hydrologicznymi ściśle powiązany jest, również obieg węgla, dlatego należy wyjaśnić jego dynamikę hydrologiczną oraz biochemiczną (Bosch, Hewlett 1982; Canton i in. 2010). Dla przykładu odnotowano negatywny związek pomiędzy odsetkiem pokrycia zlewni przez las a wielkością przepływu (Brown i in. 2015) przypisywany wysokim poborom wody w procesie ewapotranspiracji zachodzącej w drzewostanach. Na przestrzeni lat do badań nad interakcją węgla, wody i składników odżywczych w glebie w naziemnych ekosystemach opracowano i zastosowano liczne modele numeryczne (Delire, Foley 1999; Entekhabi, Eagleson 1989). Wśród tych modeli SWAT był szeroko stosowany w celu oceny wpływu działań antropogenicznych i zmian klimatu w cyklach biogeochemicznych (El-Khoury i in. 2015), hydrologii dynamicznej (Leta i in. 2015; Faramarzi i in. 2015) i zanieczyszczeń środowiska (Baffaut 2015; Holvoet i in. 2008) w skali zlewni jak i znacznie większej dotyczącej obszerniejszego regionu.

Model ten choć pierwotnie został projektowany z myślą o dużych zlewniach rolniczych, znajduje rosnące zastosowania także dla stosunkowo niewielkich obszarowo zlewni leśnych.

Do budowy modelu potrzebny jest szeroki zakres danych, w tym dane przestrzenne, dane meteorologiczne, dane hydrologiczne oraz informacje o sposobie prowadzonej gospodarki zarówno rolnej jak i leśnej na badanej zlewni. Modelowanie przewidziane jest w kilku następujących po sobie etapach. Na początek przygotowuje się dane przestrzenne, które są podstawowym komponentem modelu. Niezbędny jest numeryczny model terenu (NMT), który umożliwia w pierwotnej fazie modelowania wyznaczenie granic zlewni, kierunku spływów, nachylenia terenu oraz umożliwia wygenerowanie sieci cieków głównych (ang. *streams*) oraz kanałów spływowych (ang. *channels*). Do cieków głównych zalicza się cieki całoroczne, kanały spływowe reprezentowane przez obiekty liniowe, którymi spływa woda do cieku głównego. Na podstawie danych z NMT oraz wygenerowanej sieci cieków możliwe jest wyznaczenie strefy dolinowej (ang. *landscape analysis*) wzdłuż cieków i kanałów spływowych. Strefa ta uwzględnia obszary ze zwiększoną wilgotnością, jest to strefa przyrzeczna (ang. *riparian zones*) w obszarze doliny rzecznej, co związane jest w tych obszarach ze zwiększoną akumulacją osadów i składników organicznych. Wyznaczenie tej strefy umożliwia w kolejnych krokach precyzyjne obliczenie bilansu wodnego oraz analizę przemieszczania się z pól składników odżywczych (w tym azotu i fosforu).

Kolejnym etapem w budowie modelu jest stworzenie jednostek jednorodnych hydrologicznie (ang. *HRU – Hydrological Response Unit*). Jednostki te dla danej zlewni tworzy się w oparciu o dane przestrzenne dla gleb oraz wcześniej przetworzone dane z NMT (m.in. granice zlewni, sieć hydrograficzna, nachylenia stoków, gleby). Dzięki takiemu podziałowi każde pojedyncze HRU posiada unikatowe wartości hydrologiczne (parametr CN, współczynnik spływu powierzchniowego), glebowe

(głębokość gleby, uziarnienie, przepuszczalność), biologiczne (roślinność wraz z podaniem parametrów dla ich sezonowego wzrostu) oraz zarządzania (rodzaje pokrycia terenu np.: las, łąka, tereny zurbanizowane, zabiegi rolnicze lub leśne). Jednostka ta charakteryzuje się jednorodnymi właściwościami fizycznymi określanymi przez typ gleby, rodzaj pokrycia terenu oraz stopień nachylenia terenu. Jest to podstawowa jednostka obliczeniowa, dla której model symuluje procesy hydrologiczne, transport osadów i składników organicznych. Dla wykorzystania w pełni właściwości modelu, tj. do uruchomienia kalibracji i walidacji, dane wejściowe uzupełnia się o pomiary przepływów w cieku wodnym, temperaturę, opady, jak również stężenia azotanów czy fosforu. Dzięki tym danym można dostroić parametry modelu, by osiągnąć możliwie najlepsze dopasowanie do warunków rzeczywistych. Owe dostrojenie odbywa się za pomocą kalibracji, która jest procesem dostosowywania parametrów modelu tak, aby symulowane wyniki (np. przepływy, stężenie azotu lub sedymentacji) jak najlepiej odpowiadały danym obserwacyjnym w wybranym okresie historycznym. Walidacja z kolei polega na sprawdzeniu, czy skalibrowany model działa poprawnie w innym okresie czasu, który nie był używany podczas kalibracji.

Istotną funkcjonalnością SWAT jest symulowanie procesów hydrologicznych, które obejmuje spływ powierzchniowy oszacowany za pomocą krzywej SCS lub równania infiltracji Green-Ampt. W modelu SWAT metoda Curve Number (SCS-CN), wykorzystywana jest jako empiryczne podejście do szacowania odpływu powierzchniowego. Metoda ta zalecana jest dla średnich (od 10 km² do 100 km²) i dużych obszarowo zlewni (powyżej 100 km²) oraz w sytuacjach ograniczonej dostępności danych glebowych, natomiast metoda Green-Ampt, znajduje zastosowanie w małych, jednorodnych zlewniach oraz w analizach wymagających precyzyjnego odwzorowania krótkotrwałych i intensywnych zdarzeń opadowych. Jeśli dane glebowe są szczegółowe i zlewnia jest mała lub jednorodna, zaleca się używanie metody Green-Ampt (precyzyjna analiza infiltracji), w przypadku, kiedy występuje brak dokładnych danych lub zlewnia jest większa i zróżnicowana, polecaną metodą jest SCS-CN, dzięki której otrzymuje się szybsze choć uproszczone obliczenia.

3. Przegląd możliwości zastosowania modelu SWAT

Amatya i in. (2008) przedstawił możliwości kalibracji oraz walidacji modelu hydrologicznego SWAT dla trzeciorzędowej zlewni Turkey Creek (7,26 ha) zlokalizowanej na obszarze Parku Narodowego Francis Marion w obszarze przybrzeżnym Karoliny Południowej Stanów Zjednoczonych Ameryki. Wysokość terenu w obszarze zlewni kształtuje się pomiędzy 3,6–14 m nad średnim poziomem morza (ang. *above mean sea level*). Zlewnia pokryta jest w 88% przez bór sosnowy tworzony przez dwa gatunki: sosnę łuczycową (*Pinus taeda* L.) oraz sosnę długoigielną (*Pinus palustris*), 10% pokrywają obszary podmokłe i wody, 2% powierzchni pokrywają obszary

rolnicze, drogi oraz tereny otwarte. We wrześniu 1989 roku przez obszar zlewni przeszedł Huragan Hugo, który prawie doszczętnie zniszczył drzewostany. Większość powierzchni leśnej zdominowana jest obecnie przez lasy mieszane z niewielką ilością starodrzewia, znaczną część zajmują drzewostany w fazie odnowienia w wieku około 17 lat. Na terenie zlewni największy obszar zajmują gleby słabo osuszone gliniaste oraz mieszane, mniejszy udział mają natomiast gleby piaszczyste. W obszarze zlewni prowadzona jest gospodarka leśna mająca na celu przywrócenie naturalnie występującej na tym terenie sosny długoi-gielnej oraz związanego z tym gatunkiem drzewa dzięcioła skromnego (*Picoides borealis*) zagrożonego wyginięciem. Od roku 1984 nieprzerwanie prowadzone są pomiary mające na celu zbieranie informacji o opadach oraz spływie powierzchniowym. Kalibracja modelu bazuje na: danych GIS, dwuletnich (2005 – mokry rok oraz 2006 – suchy rok), wielkościach przepływów oraz danych klimatycznych. Walidacja modelu nastąpiła dla roku 2007. W przedmiotowym artykule autorzy określili wielkość wpływu konkretnego typu gospodarki gruntami na hydrologię i jakość wody w zlewni. Do tego celu została wyznaczona dokładna granica zlewni, dzięki zastosowaniu odpowiednich danych przestrzennych tj. numerycznego modelu terenu (NMT), ortofotomapy, danych wektorowych cieków wodnych, dodatkowo zmodyfikowanych przez rewizję terenową, zwłaszcza dla niewielkich cieków i kanałów dopływowych będących słabo rozpoznawalnymi na danych przestrzennych. Stworzony model cieków w kolejnym etapie został sparametryzowany z danymi przestrzennymi, glebami oraz informacją o pokryciu terenu dla jednorodnych jednostek hydrologicznych (HRU) wraz z danymi dotyczącymi opadów oraz danymi klimatycznymi. Dane o pokryciu terenu zostały uzyskane z digitalizacji zdjęcia lotniczego w skali 1:1500. Do parametryzacji modelu użyto również danych glebowych oraz danych o ewaporacji, przesiąkaniu oraz ruchu poziomym wody w obrębie poszczególnych warstw gleby. Model wykorzystuje również dane o porowatości gleby, przewodności hydraulicznej w celu określenia współczynnika opóźnienia przepływu. Dane glebowe oraz pokrycia terenu zostały użyte do określenia parametru CN (ang. *Curve number*) dla każdej jednostki hydrologicznej – HRU. Jak pokazują autorzy bazując na limitowanych danych pomiarowych z okresu dwóch lat oraz danych uzyskanych z poprzednich prac, model SWAT potrafi przewidzieć procesy przepływu w obrębie zlewni leśnej. Model SWAT nie był jednak w stanie dokładnie uchwycić dynamiki przepływu w obrębie ekosystemu leśnego w okresie dużego nasycenia wód gruntowych oraz w okresach bardzo suchych. W zlewni Turkey Creek lasy stanowią 88%, co jest porównywalne z typowymi małymi zlewniami leśnymi w Polsce, gdzie dominują kompleksy leśne. Podobnie jak w Polsce, przeważają gatunki iglaste (głównie sosna), co wpływa na procesy hydrologiczne, zwłaszcza ewapotranspirację i infiltrację na glebach piaszczystych.

Stosunkowo nieduża obszarowo zlewnia, podobnie jak ma to miejsce w zlewniach na terenie Polski charakteryzuje się niską odpornością na suszę. Ze względu na niewielki rozmiar, zlewnie te szybko reagują na opady – zarówno w postaci gwałtownych wezbrań, jak i gwałtownego spadku przepływu w czasie suszy. Retencja powierzchniowa na takich obszarach jest również bardzo niska ze względu na silnie przepuszczalne gleby (głównie piaski), większość opadu infiltruje w głąb, co znacznie ogranicza odpływ powierzchniowy.

Niektórzy autorzy zauważyli potrzebę udowodnienia przydatności modelu SWAT dla małych zlewni (Meaurio i in. 2015). Główny autor wraz z zespołem ocenił zdolność SWAT do symulacji procesów hydrologicznych w zlewni Aixola zlokalizowanej w centralnej części Kraju Basków (północna Hiszpania) w prowincji Gipuzkoa. Jako przykład autorzy pokazali tendencję modeli do niedoszacowania spływu dla sezonów mokrych oraz przeszacowanie dla sezonów suchych dla małych zlewni. Analizowana zlewnia zajmuje niewielki obszar 4,6 km², na jej obszarze znajdują się dwa główne strumienie, stąd może być ona podzielona na dwie różne mniejsze zlewnie o powierzchni 1,1 km² (Txulo) oraz 3,5 km² (Elgeta). Dla potrzeb modelowania zebrane zostały informacje o opadach, temperaturze powietrza, natężeniu przepływu oraz przewodnictwie elektrycznym mierzonym na kilku sondach¹ zainstalowanych w różnych miejscach na rzece. Dzięki zebrany danym z sonarów określono natężenie przepływu dla zlewni Aixiola. Wyniki pokazały, że mniejsza zlewnia Txulo ma większą zdolność regulacji od większej zlewni Elgeta. W przypadku, kiedy dane o przewodnictwie elektrycznym nie zostały uwzględnione, SWAT zawsze symulował większe natężenie przepływu w zlewni Elgeta. Analiza dla tak małej zlewni pokazuje jak istotne jest dobranie wysokiej jakości danych wejściowych takich jak gleba, dodatkowo uzupełnionych danymi o przewodnictwie elektrycznym, co pozwala dokładniej określić natężenie przepływu.

Zlewnia Aixola w Hiszpanii wykazuje szereg cech wspólnych z małymi zlewniami leśnymi w Polsce – podobna skala, struktura zlewni, przewaga powierzchni zalesionej oraz trudności w modelowaniu hydrologicznym przy pomocy SWAT. Badania Meaurio i in. (2015) podkreślają kluczowe znaczenie wysokiej jakości danych wejściowych, co jest również istotne w kontekście polskich badań nad hydrologią małych zlewni leśnych. Dodatkowe parametry, takie jak przewodnictwo elektryczne lub bardziej szczegółowa klasyfikacja gleb, powinny być uwzględniane w celu lepszej reprezentacji warunków hydrologicznych.

Inny kontekst badań wykazali Yang i Zhang (2016), którzy analizowali symulację ewapotranspiracji, produktywność pierwotną netto (ang. *net ecosystem productivity*, NEP), wymianą netto ekosystemów (ang. *net ecosystem exchange*, NEE) oraz biomasę roślinności dla dziesięciu siedlisk przyrodniczych znajdujących się w różnych stanach na terenie USA. Autorzy

¹ Sonda do pomiaru przewodnictwa elektrycznego (z ang. EC – electrical conductivity) to urządzenia służące do określania zdolności wody do przewodzenia prądu elektrycznego, co jest pośrednią miarą stężenia rozpuszczonych soli (jonów) w wodzie. Pozwala identyfikować dopływy o różnym pochodzeniu (np. woda gruntowa vs. opadowa). Za pomocą tych danych ocenia się pochodzenie zanieczyszczeń (np. z pól uprawnych, ścieków, naturalnie wypływających minerałów). W modelu SWAT dane te wykorzystywane są do rozróżnienia przepływów (powierzchniowy, gruntowy)

sprawdzili przydatność modelu do symulowania dynamiki lasu. W swojej pracy udoskonaliли model SWAT poprzez dodanie kilku nowych parametrów oraz modyfikację już istniejących w celu poprawienia jego wydajności. Na podstawie porównania pomiędzy ulepszoną wersją SWAT oraz pomiarami uzyskanymi z wieży badawczej podjęte zostały dyskusje nad dalszym kierunkiem badań w celu poprawy parametryzacji modelu i reprezentacji obiegu wody i węgla w lasach.

Badania Yang i Zhang (2016) pokazały rozszerzony potencjał modelu SWAT nie tylko jako narzędzia hydrologicznego, ale również jako modelu ekosystemowego zdolnego do symulowania obiegu wody, węgla i biomasy w lasach. Takie podejście może być bardzo użyteczne także w polskich zlewniach leśnych, gdzie wysokie zużycie wody przez drzewa (ewapotranspiracja) istotnie wpływa na ograniczenie odpływu. Polska praktyka modelowania zlewni leśnych wciąż w dużej mierze koncentruje się na bilansie wodnym – integracja podejścia Yang mogłaby stanowić istotne rozszerzenie badań dla warunków polskich. Ponadto w przedmiotowej publikacji pokazana jest możliwość rozszerzenia modelu o nowe parametry, co w pewnym stopniu pokazuje, że model ten ma zdolność rozbudowy o nowe źródła danych wcześniej nie uwzględniane. Dla badań nad zlewniami leśnymi z obszaru Polski oznacza to możliwość wykorzystania danych z Leśnej Mapy Numerycznej oraz Systemu Informatycznego Lasów Państwowych. Odpowiednia parametryzacja tych danych do formatu rozumianego przez model zapewne zajęłaby dużo czasu, wymagałoby to zaangażowania wielu specjalistów z zakresu m.in. siedliskoznawstwa leśnego, hodowli oraz gleboznawstwa. Jednakże tak szczegółowa parametryzacja zlewni leśnej oraz typów pokrycia terenu uwzględniającego poszczególne typy siedliskowe lasu, wiek drzewostanów oraz zabiegi hodowlane mogłaby wygenerować bardzo dużą liczbę jednostek jednorodnych hydrologicznie, co mogłoby być problematyczne dla kalibracji i walidacji takiego modelu. Dopóki jednak nie zostanie to sprawdzone, trudno jest ocenić wyniki modelowania w SWAT z wykorzystaniem tak precyzyjnych danych.

4. Wnioski i podsumowanie

Większość prac oraz analiz z wykorzystaniem modelu SWAT koncentruje się na ekosystemach rolniczych. Niewiele jest prac, które pokazują zastosowanie modelu SWAT w ekosystemach leśnych. Model ten pozwala na kompleksowe modelowanie procesów hydrologicznych, uwzględnia wpływ użytkowania terenu i zmian klimatycznych, a także dobrze integruje dane przestrzenne, co jest istotne w zróżnicowanych warunkach topograficznych Polski. Wszechstronność i dostępność tego modelu na licencji oprogramowania open-source czyni go przydatnym i powszechnie dostępnym narzędziem. Z drugiej jednak strony, model ma pewne ograniczenia – szczególnie w przypadku małych zlewni leśnych, gdzie może niedoszacowywać przepływy w okresach mokrych i przeszacowywać w suchych. Ponadto SWAT wymaga dużej ilości dokładnych danych wejściowych. Model nie odwzorowuje w pełni specyfiki procesów leśnych, takich jak sezonowa ewapotranspiracja,

a jego kalibracja może być trudna bez długich szeregów danych hydrologicznych, co zwiększa niepewność wyników. Nie zmienia to jednak faktu, iż model ten znajduje szerokie zastosowanie nie tylko w zagadnieniach hydrologicznych, jest również pomocny przy generowaniu sieci rzecznej, do obliczania bilansu wodnego oraz różnego rodzaju wskaźników hydrologicznych, co daje podstawy do wykorzystania tego modelu do stosunkowo małych obszarowo zlewni leśnych.

Konflikt interesów

Autor deklaruje brak potencjalnych konfliktów.

Źródła finansowania badań

Fundusz Statutowy IBL. Projekt: Wykorzystanie modelowania hydrologicznego do określania potencjalnej produktywności drzewostanów, nr. 901504.

Literatura

- Amatya D.M., Haley E.B., Levine N.S., Callahan T.J., Radecki-Pawlik A., Jha M.K. 2008. Calibration and validation of the SWAT model for a forested watershed in coastal South Carolina. *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), 2008 ASABE Annual International Meeting*, Rhode Island Convention Center, Providence, Rhode Island.
- Arnold J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R. 1998. SWAT: A conceptual, continuous-time model for large area hydrologic modeling and assessment. *Journal of The American Water Resources Association*, 34(2), 337–345.
- Arnold J.G., Allen P.M. 1999. Automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from streamflow records, *Journal of the American Water Resources Association* 35(2): 411–424.
- Baffaut C., John Sadler E., Ghidry F., Anderson S.H. 2015. Long-term agroecosystem research in the Central Mississippi River Basin: SWAT simulation of flow and water quality in the Goodwater Creek Experimental Watershed, *Journal of Environmental Quality* 44: 84–96. DOI: <http://doi.org/10.2134/jeq2014.02.0068>.
- Bosch J.M., Hewlett J.D. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration, *Journal of Hydrology* 55: 3–23.
- Brown S., Versace V., Lester R., Walter M. 2015. Assessing the impact of drought and forestry on streamflows in south-eastern Australia using a physically based hydrological model, *Environmental Earth Science* 74: 6047–6063. DOI: <http://10.1007/s12665-015-4628-8>.
- Canton, M., Anschutz, P., Coynel, A., Polsenaere, P., Aubry, I., Poirier, D. 2010. Nutrient export to an Eastern Atlantic coastal zone: first modeling and nitrogen mass balance, *Biogeochemistry* 107: 361–377. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10533-010-9558-7>.
- Delire C., Foley J.A. 1999. Evaluating the performance of a land surface/ecosystem model with biophysical measurements from contrasting environments, *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 104: 16895–16909.
- EAWAG. 2005. Proc. 3rd International SWAT Conference. Zurich, Switzerland: Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology. <https://>

- swat.tamu.edu/docs/swat/conferences/2005/SWAT%20Book%203rd%20Conference.pdf (dostęp 1.06.2025)
- El-Khoury A., Seidou O., Lapen D.R., Que Z., Mohammadian M., Sunohara M., Bahram D. 2015. Combined impacts of future climate and land use changes on discharge, nitrogen and phosphorus loads for a Canadian river basin, *Journal of Environmental Management* 151: 76–86. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.12.012>.
- Entekhabi D., Eagleson P.S. 1989. Land Surface Hydrology Parametrization for Atmospheric General Circulation Models Including Subgrid Scale Spatial Variability, *Journal of Climate* 2. DOI: <https://doi.org/doi:10.1175/1520-0442>.
- Faramarzi M., Srinivasan R., Iravani M., Bladon K.D., Abbaspour K.C., Zehnder A.J., Goss G.G. 2015. Setting up a hydrological model of Alberta: data discrimination analyses prior to calibration, *Environmental Modelling and Software* 74: 48–65.
- Gassman P.W., Reyes M.R., Green C.H., Arnold J.G. 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions, *Transaction of the ASABE* 50 (40): 1211–1250. DOI: <http://doi.org/10.13031/2013.23637>.
- Holvoet K., van Griensven A., Gevaert V., Seuntjens P., Vanrolleghem P.A. 2008. Modifications to the SWAT code for modelling direct pesticide losses, *Environmental Modelling and Software* 23: 72–81. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.05.002>.
- Janjić J., Tadić L. 2023. Fields of Application of SWAT Hydrological Model – A Review, *Earth* 4: 331–344. DOI: <https://doi.org/10.3390/earth4020018>.
- Jha M., Arnold J.G., Gassman P.W., Giorgi F., Gu R. 2006. Climate change sensitivity assessment on upper Mississippi river basin steamflows using SWAT, *Journal of the American Water Resource Association* 42(4): 997–1015. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb04510.x>.
- Leta O.T., Nossent J., Velez C., Shrestha N.K., van Griensven A., Bauwens W. 2015. Assessment of the different sources of uncertainty in a SWAT model of the River Senne (Belgium), *Environmental Modelling & Software* 68: 129–146. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.02.010>.
- Meaurio M., Zabaleta A., Uriarte J.A., Srinivasan R., Antigüedad I. 2015. Evaluation of SWAT models performance to simulate streamflow spatial origin. The case of a small forested watershed, *Journal of Hydrology* 525: 326–334. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.050>.
- TWRI. 2003. SWAT 2003: Proc. 2nd Intl. SWAT Conference. TWRI Technical Report No. 266. College Station, Tex.: Texas Water Resources Institute, Texas A&M University. <https://swat.tamu.edu/docs/swatconferences/2003/2ndswatconfproceeding.pdf> (dostęp 1.06.2025)
- UNESCO-IHE. 2007. 4TH International SWAT conference: Book of abstracts. Delft, Netherlands: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Institute for Water Education. <https://swat.tamu.edu/docs/swat/conferences/2007/docs/BOOK%20OF%20ABSTRACTS%20final.pdf> (dostęp 1.06.2025)
- Yang Q., Zhang X. 2016. Improving SWAT for simulating water and carbon fluxes of forest ecosystems, *Science of The Total Environment* 569–570: 1478–1488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.238>.
- Wu K., Xu Y.J. 2006. Evaluation of the applicability of the SWAT model for coastal watersheds in southeastern Louisiana, *Journal of the American Water Resource Association* 42(5): 1247–1260.