

dr Lech Śmietanski¹
mgr inż. Sławomir Filar¹
mgr Elżbieta Przytuła¹

OBRAZOWANIE 3D W MODELOWANIU PRZEPŁYWU WÓD PODZIEMNYCH – PRZYKŁADY DLA ZŁOŻA „ZŁOCZEW” I ZLEWNI BIEBRZY

<https://doi.org/10.18778/8220-655-5.03>

Streszczenie: W artykule poruszono zagadnienie zastosowania trójwymiarowego obrazowania dynamiki wód podziemnych w modelowaniu numerycznym na przykładzie odwodnienia złoża „Złoczew” i przepływu wód podziemnych w zlewni Biebrzy. Autorzy koncentrują swoją uwagę na modelowaniu symulatorem MODFLOW, najczęściej stosowanym w hydrogeologii. W pierwszym przykładzie modelowano przepływ wód podziemnych w celu określenia lokalizacji barier studni odwadniających, umożliwiających eksploatację złoża węgla brunatnego „Złoczew”. Po wykonaniu obliczeń modelowych wygenerowano obraz 3D uzyskanego zwierciadła wód podziemnych wraz ze stropem i spągami złoża. Położenie w przestrzeni 3D tych powierzchni względem siebie ilustruje skuteczność symulowanych barier odwadniających. W drugim przykładzie modelowano przepływ wód podziemnych, który został wykorzystany do oceny zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych w zlewni Biebrzy. Zbudowano 7-warstwowy model koncepcyjny (4 warstwy reprezentujące utwory przepuszczalne oraz 3 rozdzielające je warstwy utworów słabo przepuszczalnych), który następnie został przekształcony w 4-warstwowy model numeryczny z 3. warstwami słabo przepuszczalnymi odwzorowanymi poprzez parametr międzywarstwowego przesączania pionowego. Wynik symulacji w postaci obliczonych czterech powierzchni piezometrycznych, reprezentujących rozkład wysokości hydraulicznej w poszczególnych warstwach modelowych nie pokazuje relacji przestrzennej pomiędzy nimi. Aby pokazać tę zależność, autorzy przekształcili dane wyjściowe modelu do formatu, który można zwizualizować w 3D. Umożliwiło to zobrazowanie 3D wszystkich powierzchni piezometrycznych oraz relacji przestrzennej między nimi. Analiza tej zależności ukazuje szczegółowo złożoność systemu przepływu wód podziemnych zlewni Biebrzy i umożliwia identyfikację obszarów zasilania i drenażu.

Słowa kluczowe: modelowanie przepływu wód podziemnych, obrazowanie 3D, odwadnianie złóż węgla brunatnego, zasoby dyspozycyjne wód podziemnych.

Wprowadzenie

W artykule przedstawiono możliwości obrazowania trójwymiarowego (3D) dynamiki wód podziemnych w oparciu o model przepływu tych wód. Używany w artykule termin „przepływ wód podziemnych” oznacza ruch laminarny wód podziemnych zgodny z liniowym prawem Darcy. Z kolei termin „dynamika wód podziemnych” oznacza ruch wód podziemnych pod działaniem siły masowej jaką jest grawitacja.

Jest wiedzą podręcznikową w hydrogeologii, iż przepływ wód podziemnych w ziemskim polu grawitacyjnym ma charakter potencjalny i każdej cząsteczce wody można przyporządkować określoną wielkość energii potencjalnej wyrażającej zdolność tej cząsteczki do przemieszczania się. Wielkość tę wyraża zgodnie z teorią Bernoulliego wysokość hydrauliczna.

¹ Państwowy Instytut Geologiczny, Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa, lech.smietanski@gmail.com; slawomir.filar@pgi.gov.pl, ORCID 0000-0002-9803-5628; elzbieta.przytula@pgi.gov.pl, ORCID 0000-0002-2973-4273

Rozkład energii potencjalnej w strumieniu wód podziemnych jest więc tożsamy z rozkładem wartości wysokości hydraulicznej w przestrzeni objętej przepływem. Sens wysokości hydraulicznej mają rzędne zwierciadła wód podziemnych w warstwach wodonośnych o zwierciadle swobodnym oraz rzędne zwierciadła piezometrycznego dla warunków naporowych.

W artykule zwierciadło dla warunków zarówno swobodnych jak i naporowych, nazywane jest powierzchnią piezometryczną. Tym samym obrazowanie 3D dynamiki wód podziemnych można sprowadzić do obrazowania 3D powierzchni piezometrycznych.

Na tle licznych zastosowań obrazowania 3D jako efektywnego narzędzia badawczego w wielu dziedzinach wiedzy, w tym także w geologii, wyraźnie widoczny jest brak szerszego wykorzystania tego narzędzia w hydrogeologii dla trójwymiarowego obrazowania dynamiki wód podziemnych w modelowaniu przepływu tych wód. Autorzy koncentrują w artykule swoją uwagę na modelowaniu najczęściej stosowanym w krajowej i światowej hydrogeologii symulatorze MODFLOW, stworzonym przez amerykańską służbę geologiczną. Symulator ten, na przestrzeni ponad 30. lat, doczekał się kolejnych swoich wersji i jest „silnikiem numerycznym” w komercyjnych aplikacjach graficznych stosowanych do budowy modeli przepływu wód podziemnych. Istotną cechą modeli budowanych na bazie tego symulatora jest ich warstwowość. Użytkownik otrzymuje wynikowy obraz dynamiki wód podziemnych w postaci map hydroizohips osobno dla każdej warstwy modelu.

Tym samym w procesie modelowania za pomocą wcześniej wymienionego symulatora użytkownik nie otrzymuje obrazu 3D, co powoduje, iż pozbawiony jest możliwości szczegółowej trójwymiarowej analizy dynamiki wód podziemnych, co jest istotne np. dla oceny skuteczności projektowanego odwodnienia górniczego, czy wydzielenia stref zasilania i drenażu dla skomplikowanych systemów krążenia wód podziemnych w procesie ustalania zasobów tych wód.

Celem artykułu jest pokazanie możliwości praktycznego zastosowania obrazowania 3D do analizy dynamiki wód podziemnych w procesie modelowania ich przepływu na przykładzie złoża węgla brunatnego „Złoczew” oraz zlewni Biebrzy. Artykuł oparty jest na materiale jaki stanowią model odwodnienia złoża „Złoczew” (Śmiateński i in. 2013) i model przepływu regionalnego wód podziemnych w zlewni Biebrzy (Filar i in. 2018).

Dla trójwymiarowego obrazowania dynamiki wód podziemnych autorzy wykorzystują model typu TIN. Model ten jest stosowany w geodezji do budowy numerycznych modeli powierzchni terenu. Obliczone przez symulator przepływu wód podziemnych wartości wysokości hydraulicznej są danymi wejściowymi dla modelu TIN uruchamianego ze środowiska graficznego GMS 2.1 (GMS 2.1 User's Manual 1999).

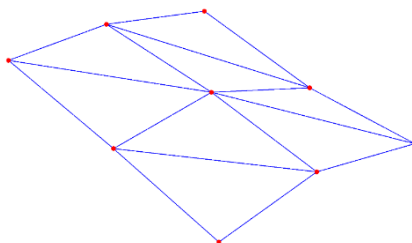
Zastosowana metoda obrazowania 3D – model TIN

Model TIN daną powierzchnię odwzorowuje za pomocą siatki trójkątów. Boki tych trójkątów są odcinkami łączącymi w przestrzeni 3D punkty o znanych współrzędnych (x, y, z). Współrzędne „x” i „y” to współrzędne węzłów siatki obliczeniowej modelu, natomiast współrzędna „z” reprezentuje wartość przypisaną do tego węzła. Wartość „z” może tu reprezentować np.

rzędną stropu lub spągu danej warstwy modelu lub obliczoną przez symulator przepływu wód wartość wysokości hydraulicznej. Trójkąty tworzone są w wyniku numerycznego procesu triangulacji.

W modelu TIN modelowana powierzchnia jest więc zbudowana z fragmentów płaszczyzn wyznaczonych przez poszczególne trójkąty.

Rycina 1 przedstawia wynik triangulacji dziewięciu punktów o określonych współrzędnych (x, y, z). Powstały fragment powierzchni 3D budują w tym przypadku fragmenty płaszczyzn wyznaczonych przez każdy z ośmiu przykładowych trójkątów.



Ryc. 1. Elementy trójkątne budujące powierzchnię trójwymiarową w modelu TIN

Modelowanie odwodnienia złoża węgla brunatnego „Złoczew”

Celem badań modelowych (ryc. 2) było ustalenie wielkości wydatku barier studni odwadniających, umożliwiającego dostęp do złoża węgla brunatnego „Złoczew” w poszczególnych etapach jego eksploatacji. Celem tych badań było także określenie zasięgu odwodnienia złoża.



Ryc. 2. Lokalizacja obszaru badań (dla złoża węgla brunatnego „Złoczew”)

Złoże węgla brunatnego „Złoczew” rozciąga się wąskim pasem o szerokości 1–1,5 km i długości ok. 10 km, o kierunku z południowego zachodu na północny-wschód. Od południowego zachodu złożo dochodzi do miejscowości Janów, od północnego-wschodu do miejscowości Kamionka. Odległość złoża od miejscowości Złoczew wynosi około 4 km w kierunku południowo-wschodnim.

Obszar modelu regionalnego jest położony w województwie łódzkim, a jedynie północno-zachodni fragment obszaru badań modelowych znajduje się w województwie wielkopolskim. Obszar znajduje się w zlewni Warty (II rzędu) oraz jej lewostronnego dopływu rzeki Prosną (zlewnia III rzędu). Wododział pomiędzy zlewnią Prosną i Warty biegnie z kierunku północnego przez środek obszaru, skręcając w jego centralnej części w kierunku południowo-zachodnim. Sieć rzeczna w obrębie obu zlewni jest dobrze rozwinięta. Średni opad z wielolecia 1981–2011 dla obszaru wynosi 597 mm/rok, a parowanie terenowe roczne jest rzędu 500–520 mm (Śmiałowski i in. 2013).

Zachodnią część obszaru badań obejmuje Nizina Południowowielkopolska, zaś wschodnią Wzniesienia Południowomazowieckie (Kondracki 2009).

Obszar modelu położony jest we wschodniej części monokliny przedsudeckiej, w granicach mniejszej jednostki tektonicznej, zwanej monokliną kalisko-złoczewską (Żelaźniewicz i in. 2011). W budowie zaznaczają się tektoniczne elementy blokowe zarówno wypiętrzone jak i zrzucone. Główne elementy blokowe zrzucone tworzą rów Złoczewa, który uformował się w wyniku ruchów tektonicznych w końcowym okresie kredy i w neogenie.

Utwory triasu, reprezentowane głównie przez ility, łowce i łupki piaszczyste występują jedynie w skrajnie południowo-zachodniej części obszaru modelu, poza strefą rowu Złoczewa. Na przeważającej części obszaru badań modelowych utwory jurajskie stanowią główny element piętra mezozoicznego. To kompleks piaszczysto-ilasto-mułowcowy (jura dolna), piaski, piaskowce żelaziste, mułowce (jura środkowa) i wapienie margliste (jura górna). Kredę reprezentują piaski (kreda dolna) oraz margle i ility, wapienie margliste i opoki (kreda górna). Osady paleogenu występują lokalnie, zachowały się w formie szczątkowej jedynie w północnej części obszaru badań modelowych. Występujące powszechnie osady neogenu są głównie reprezentowane przez miocen i pliocen.

Utwory czwartorzędowe są wykształcone w postaci osadów lodowcowych, wodnolodowcowych, rzecznych, jeziornych i eolicznych zaliczanych do zlodowaceń: południowo-polskiego, środkowopolskich (Odry i Warty) i północnopolskiego (Wisły) oraz interglacjałów: lubelskiego, mazowieckiego (wielkiego) i eemskiego, przykrytych osadami holocenu.

Strefa zapadliskowa rowu Złoczewa rozciąga się na długości ok. 10 km i szerokości 1–1,5 km. Jej głębokość przeciętnie wynosi 150–250 m, a maksymalnie w środkowej części przekracza 340 m. Rów poprzecinany jest licznymi uskokami poprzecznymi o kierunku SW-NE (ryc. 3). W strefie rowu utwory miocenu podzielone są na serię węglową o miąższości 95–138 m i serię nadwęglową o miąższości 120–165 m. W serii węglowej występują trzy ogniwa osadów z pokładami węgla o miąższościach od 16,0 do 35,6 m, przewarstwione gytiami, ksylitami i piaskami drobnymi. Seria nadwęglowa składa się z piasków drobnoziarnistych i pylastych przewarstwionych iłami ze szczątkami roślin i ksyliatów. Poza strefą rowu tektonicznego miocen reprezentują głównie piaski, mułki i ility, miejscami z przewarstwieniami węgla brunatnego. Pliocen wykształcony jest tu w serii ilasto-piaszczystej jako pstre ility poznańskie oraz piaski. Czwartorzęd w strefie rowu budują gliny zwałowe oraz piaski drobno- i średnioziarniste akumulacji wodnolodowcowej. Miąższość tych utworów jest zróżnicowana od 14,5 do

110,8 m. Geneza tych osadów związana jest ze zlodowaceniami środkowopolskimi (Odry, Warty).

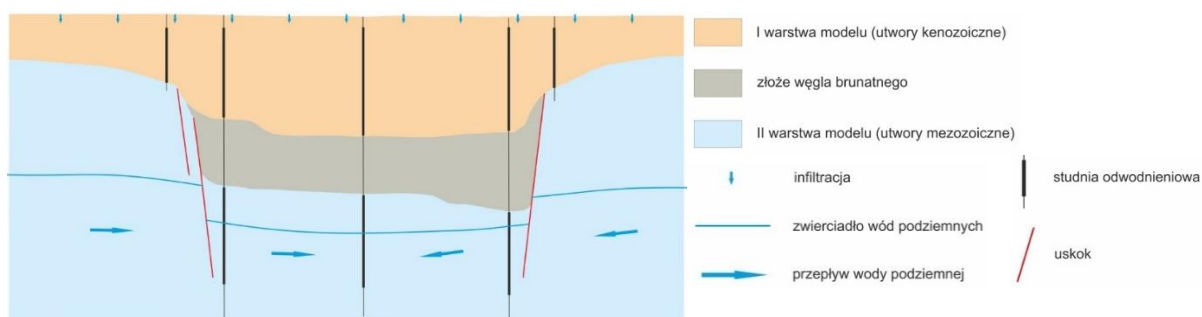
Główne użytkowe piętro wodonośne stanowią osady czwartorzędowe, natomiast piętro wodonośne o charakterze podrzędnym reprezentują utwory paleogenu, neogenu i mezozoiku. W utworach czwartorzędowych na analizowanym obszarze wyróżnione zostały dwa poziomy wodonośne: przypowierzchniowy i międzyglinowy. Poziom przypowierzchniowy w rejonie złoża „Złoczew” występuje w piaskach i żwirach rzecznych interglacjału eemskiego, zlodowacenia bałtyckiego i holocenu. Zasilanie poziomu odbywa się przez infiltrację opadów. Poziom ten nie jest eksploatowany studniami wierconymi, natomiast jest powszechnie ujmowany studniami kopanymi. Poziom międzymorenowy tworzą osady rzeczne interglacjału mazowieckiego oraz osady fluwioglacjalne i rzeczne, głównie piaski i żwiry. Poziom o miąższości w przedziale 10–20 m został ujęty licznymi studniami. Zwierciadło wody tego poziomu ma charakter napięty.

Występowanie wód w utworach miocenu jest związane z seriami piasków średnioziarnistych i drobnoziarnistych wypełniających rów Złoczewa. Wody występują tu głównie w piaskach drobnoziarnistych formacji adamowskiej, a poniżej głównego pokładu węgla w utworach piaszczystych formacji rawickiej. Miąższości tych utworów w kompleksie nadwęglowym (formacja adamowska) są znaczne – wynoszą średnio 96,5 m, osiągając maksymalnie 129 m. Udział utworów wodoprzepuszczalnych w profilu tego kompleksu sięga 70,0% (Paczyński i Sadurski red. 2007, Śmietański i in. 2013).

Wody podziemne piętra mezozoicznego występują w piaskach i piaskowcach jury dolnej i środkowej oraz w utworach węglanowych jury górnej tworzących strefę brzeżną monokliny przedsudeckiej, a także w utworach kredy dolnej i górnej, należących już do niecki łódzkiej (północno-wschodnia część obszaru badań modelowych).

Zasilanie wód podziemnych zachodzi w wyniku infiltracji opadów atmosferycznych do strefy wód przypowierzchniowych, przesączania przez osady słabo przepuszczalne do głębiej położonych poziomów wodonośnych. Drenaż wód podziemnych następuje poprzez systemy cieków, dopływów Prosnę i Warty.

Rycina 3 przedstawia model koncepcyjny przepływu wód podziemnych w rejonie złoża „Złoczew” w warunkach działania modelowanych barier studni odwadniających.



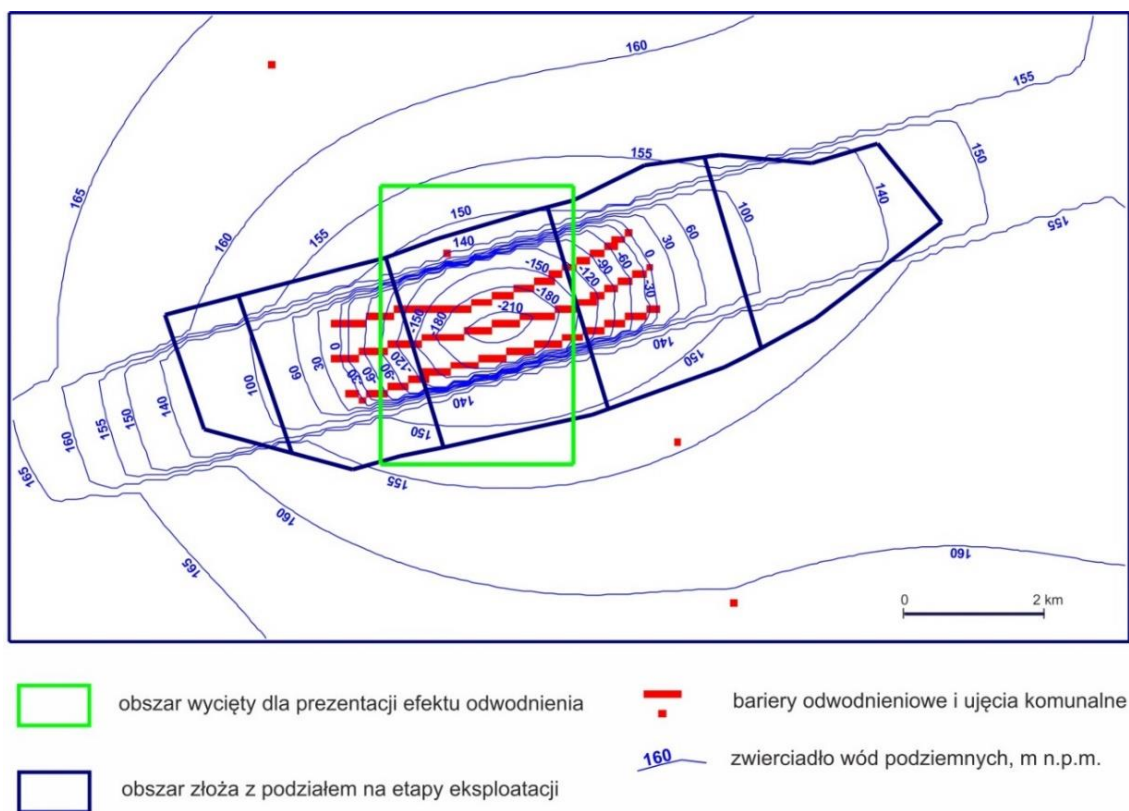
Ryc. 3. Model koncepcyjny przepływu wód podziemnych w warunkach odwadniania złoża

Źródło: Śmietański i in. 2013

Na podstawie modelu koncepcyjnego zbudowano 2-warstwowy model numeryczny. Na danym projektowanym etapie udostępniania złoża utwory kenozoiczne, tworzące I warstwę modelu, są osuszane nad złożem i w jego bliskim sąsiedztwie. Bariery odwodnieniowe osuszają bezpośrednio pod złożem strop górotworu mezozoicznego, odwzorowanego II warstwą modelu. Uskok, tworzący rów tektoniczny w którym złożo się znajduje, mają charakter barier słabo przepuszczalnych (Śmietański i in. 2013).

Na rycinie 4 przedstawiono wynik symulacji odwodnienia złoża na 3. etapie jego udostępnienia. Na tym etapie osuszana jest środkowa część złoża. Ustalona na modelu wydajność barier odwodnieniowych dla tego etapu wynosi $4\,085,04\text{ m}^3/\text{h}$. Obszar obejmujący złożo ma powierzchnię $144,0\text{ km}^2$ (ryc. 4) i stanowi centralny fragment modelu regionalnego o powierzchni $2\,508,6\text{ km}^2$ (ryc. 2).

Rycina 4 przedstawia obliczony rozkład wartości wysokości hydraulicznej w II warstwie modelu reprezentującej utwory mezozoiczne.



Ryc. 4. Obliczona przez symulator powierzchnia piezometryczna dla II warstwy modelu (utwory mezozoiczne) – symulacja 3-go etapu odwadniania złoża

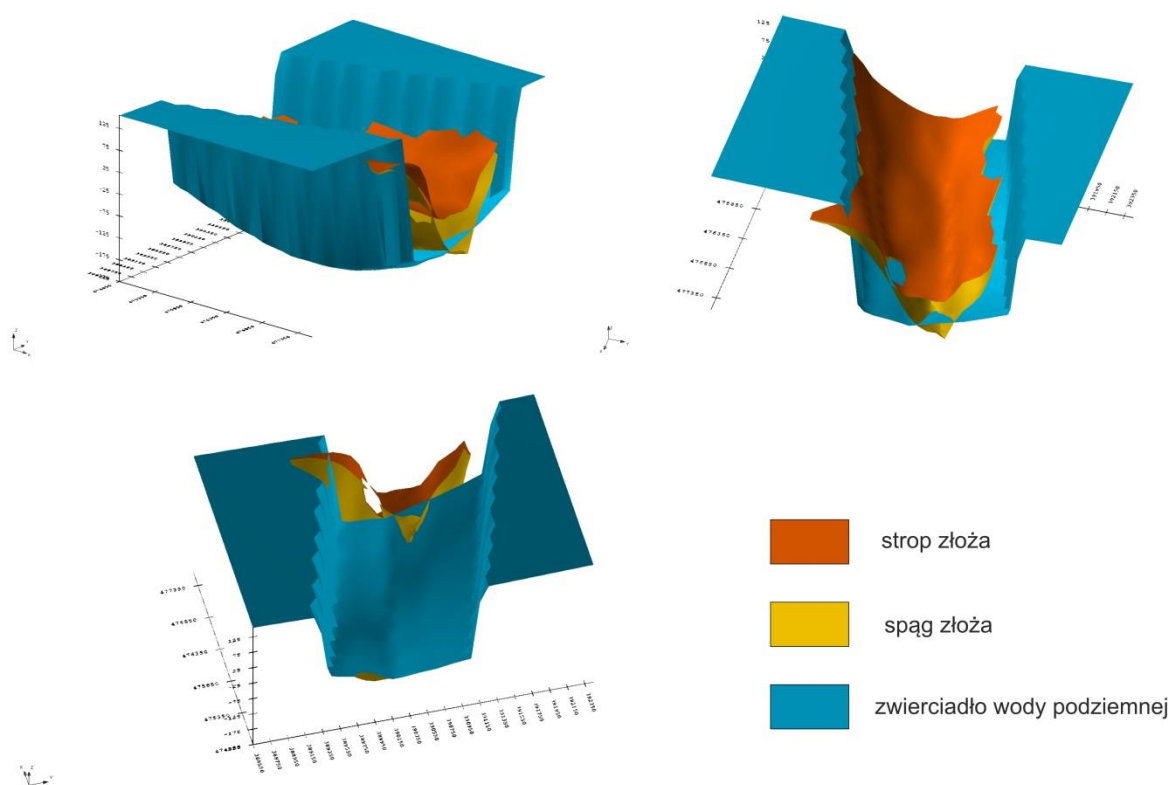
Dla zilustrowania w formie trójwymiarowej wyniku obliczeń dla tego etapu, dokonano „wycięcia” z modelu przepływu wód podziemnych powierzchni stropowej i spągowej złoża oraz obliczonej powierzchni piezometrycznej. Obszar „wycięty” oznaczony jest na ryc. 4 zieloną ramką. Proces „wycięcia” przeprowadzono przy użyciu autorskich programów TAB2TIN,

HDS2TIN i TIN_CLEAN napisanych w języku Fortran 95. Programy te umożliwiły zapisanie danych uzyskanych z symulatora przepływu wód podziemnych, jakim był program MODFLOW96, w formacie czytany przez moduł TIN środowiska graficznego GMS 2.1 dla przedstawienia ich w postaci trójwymiarowej (GMS 2.1 User's Manual 1999).

Rycina 5 przedstawia w układzie 3D wynik modelowania odwodnienia środkowej części złoża w postaci powierzchni piezometrycznej oraz stropu i spągu złoża. Wyraźnie widać, iż dla ustalonej wydajności barier odwodnieniowych dla 3-go etapu udostępniania złoża, bryła tego złoża jest praktycznie odwodniona.

Bardzo wyraźnie jest także widoczne hydrauliczne działanie uskoków, które uwzględniono na modelu jako bariery słabo przepuszczalne.

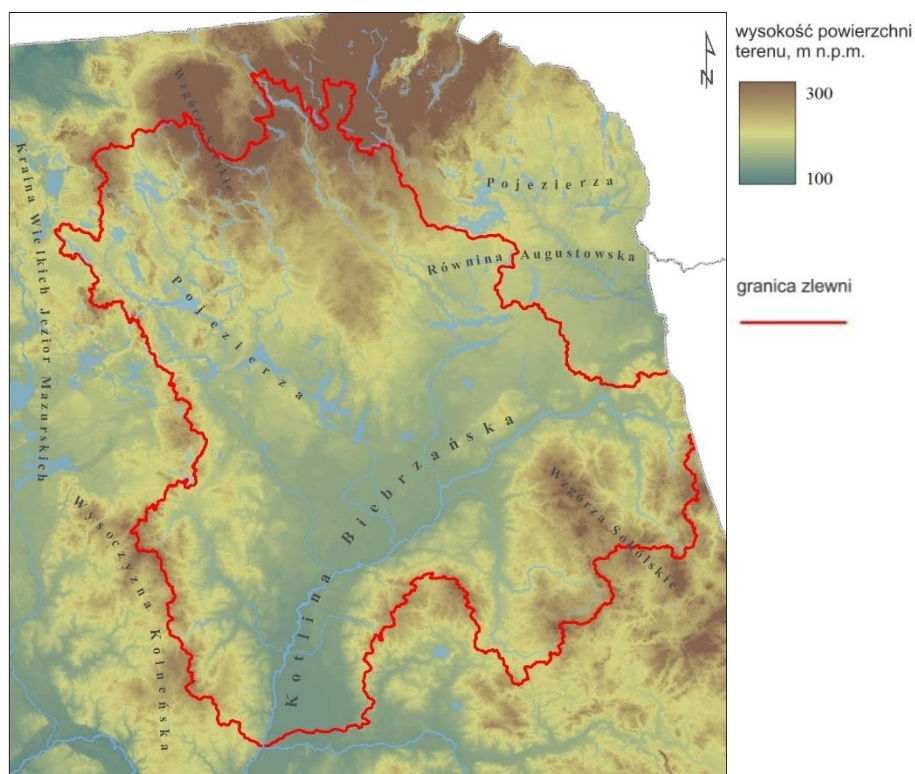
Obrazowanie 3D dynamiki wód podziemnych umożliwia wprost dokonanie oceny skuteczności projektowanego odwodnienia (ryc. 5), natomiast otrzymany bezpośrednio z symulatora dwuwymiarowy obraz dynamiki wód podziemnych nie pozwala na dokonanie takiej oceny (ryc. 4).



Ryc. 5. Obrazowanie 3D odwodnienia środkowej części złoża „Złoczew” – przewyższenie 5-krotne

Modelowanie przepływu wód podziemnych w zlewni Biebrzy

Badania modelowe przepływu wód podziemnych w zlewni Biebrzy (ryc. 6) wykonano w ramach sporządzania dokumentacji hydrogeologicznej dla ustalenia zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych na tym obszarze. Ustaleń zasobowych dokonano w oparciu o rozpoznanie



Ryc. 7. Szkic geomorfologiczny obszaru zlewni Biebrzy

Źródło: opracowanie własne

Wprost na podłożu krystalicznym spoczywa kompleks osadów mezozoicznych i kenozoicznych. Osady paleozoiku (piaskowce kambru, osady węglanowe ordowiku i osady marglisto ilaste syluru) występują lokalnie i mają silnie zredukowaną miąższość. Na przeważającej części obszaru badań nie występują również utwory triasu. Osady jury tworzą ciągłą pokrywę o zróżnicowanej miąższości. To kompleks piaskowcowy (jura dolna) oraz piaski z wkładkami ilastymi i seria węglanowa (jura górna). Kredę reprezentują piaski i piaskowce kwarcowo-glaukownitowe (kreda dolna) oraz margle, wapienie margliste, opoki i kreda pisząca (kreda górna). Osady paleogenu i neogenu są reprezentowane przez piaski z przewarstwieniami lignitu, mułowców oraz lokalnie węgla brunatnego. W wyniku zaburzeń glaciektonicznych i erozji powierzchnia stropu tych utworów jest bardzo urozmaicona.

Osady czwartorzędowe występują na obszarze całej zlewni Biebrzy. Największą miąższość, dochodzącą do 150–160 m, osiągają na obszarze Kotliny Biebrzy Środkowej i w zachodniej części Kotliny Biebrzy Górnej. Na pozostałym obszarze miąższość osadów wynosi ok. 120–130 m. Utwory czwartorzędowe są wykształcone w postaci osadów lodowcowych, wodnolodowcowych, rzecznych, jeziornych i zastoiskowych, zaliczanych do zlodowaceń: najstarszego (Narwi), południowopolskiego (Nidy, Sanu i Wilgi), środkowo-polskich (Odry i Warty) i północnopolskiego (Wisły) oraz interglacjałów: augustowskiego (podlaskiego), mazowieckiego (wielkiego) i eemskiego, przykrytych osadami holocenu.

W obszarze zlewni Biebrzy główne użytkowe piętro wodonośne stanowią osady czwartorzędowe, natomiast piętro wodonośne o charakterze podrzędnym reprezentują utwory paleogenu i neogenu. Duże deniwelacje terenu oraz bardzo urozmaicona rzeźba stropu podłoża podczwartorzędowego skutkują zmienną miąższością oraz dużym zróżnicowaniem hydrostrukturalnym piętra czwartorzędowego.

Profil osadów czwartorzędowych składa się z naprzemianległych warstw przepuszczalnych piaszczysto-żwirowych, słabo przepuszczalnych glin zwałowych i mułków oraz bardzo słabo przepuszczalnych iłów. Poziomy wodonośne paleogeńsko-neogeńskie często pozostają w więzi hydraulicznej z głębszymi poziomami czwartorzędowymi. Głębsze poziomy wodonośne są słabo rozpoznane, udokumentowane głębokimi otworami zlokalizowanymi jedynie w rejonach pozbawionych płytszych poziomów wodonośnych lub otworami badawczymi bez badań hydrogeologicznych.

Zasilenie wód podziemnych zachodzi w wyniku infiltracji opadów atmosferycznych do strefy wód przypowierzchniowych, a w wyniku przesączania przez osady słabo przepuszczalne do głębiej położonych poziomów wodonośnych. Drenaż wód podziemnych następuje poprzez systemy cieków i jezior, ewapotranspirację oraz w mniejszym stopniu poprzez odpływ lateralny. Na regionalny biebrzański system krążenia wód podziemnych składa się szereg systemów lokalnych wygenerowanych przez liczne ciek, będące dopływami Biebrzy. Zaznacza się silny drenujący charakter doliny Biebrzy w stosunku do obszarów wysoczyznowych. Wody podziemne w granicach basenu środkowego doliny Biebrzy spływają w kierunku południowo-zachodnim, a następnie w basenie dolnym przyjmują kierunek południowy, dążąc do głównej regionalnej bazy drenażu – Narwi (Filar i in. 2018).

Na rycinie 8 przedstawiono model koncepcyjny przepływu wód podziemnych na obszarze zlewni Biebrzy. Model koncepcyjny był podstawą do budowy modelu numerycznego przepływu wód podziemnych.

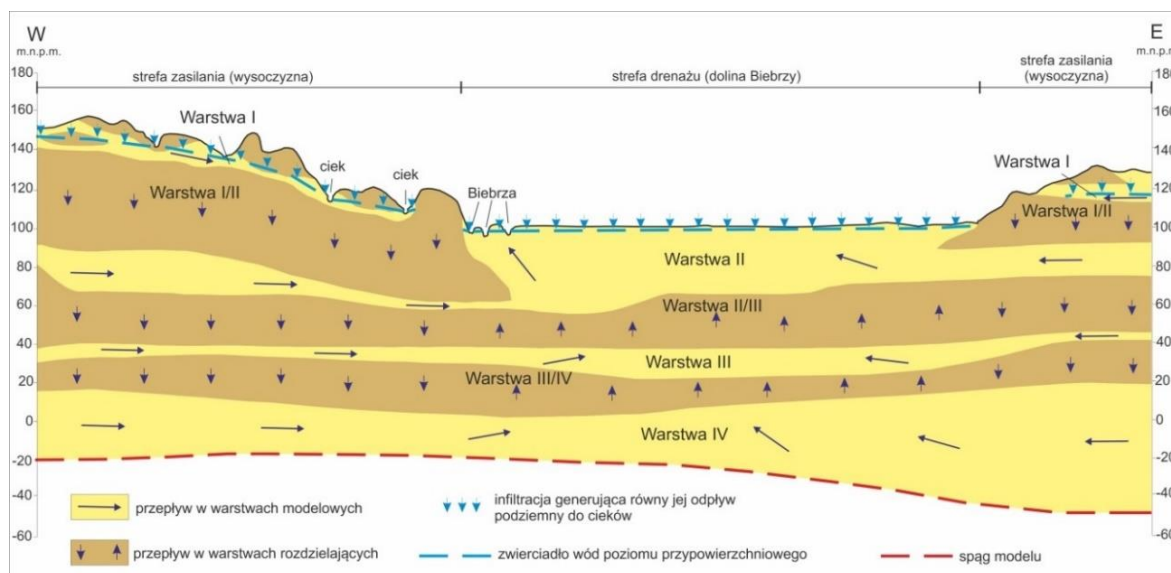
Wydzielono cztery warstwy modelowe reprezentujące przepuszczalne utwory, w tym trzy czwartorzędowe (warstwy I, II i III) oraz warstwę IV – czwartorzędowo-paleogeńsko-neogeńskie (ryc. 8). Warstwy te odwzorowano na modelu numerycznym przewodnością poziomą T . Warstwa I modelu zdefiniowana została na obszarach wysoczyznowych i nie występuje na obszarze doliny Biebrzy. Pozostałe warstwy modelowe II, III i IV obejmują cały obszar badań.

Rozdzielające warstwy słabo przepuszczalne I/II, II/III i III/IV (ryc. 8) nie są bezpośrednio warstwami modelu numerycznego, lecz są odwzorowane na tym modelu pośrednio parametrem międzywarstwowego przesączania pionowego, jakim jest przewodność pionowa T_z utworów słabo przepuszczalnych.

Po zdefiniowaniu warunków brzegowych wykonano kalibrację modelu programem PEST przy użyciu punktów pilotowych. W procesie kalibracji otrzymano pole wartości T i T_z , dla których suma kwadratów różnic pomiędzy pomierzonymi i obliczonymi rzędnymi zwierciadła wody podziemnej w studniach głębinowych na obszarze modelu osiąga minimum.

Dla zobrazowania trójwymiarowego powierzchni piezometrycznych obliczonych przez symulator przepływu wód podziemnych, jakim był MODFLOW96, wykorzystano programy

autorskie HDS2TIN i TIN_CLEAN przetwarzające dane wysokości hydraulicznej otrzymane z symulatora do formatu importowanego do modułu TIN środowiska graficznego GMS 2.1.



Ryc. 8. Model koncepcyjny przepływu wód podziemnych w zlewni Biebrzy

Źródło: opracowanie własne

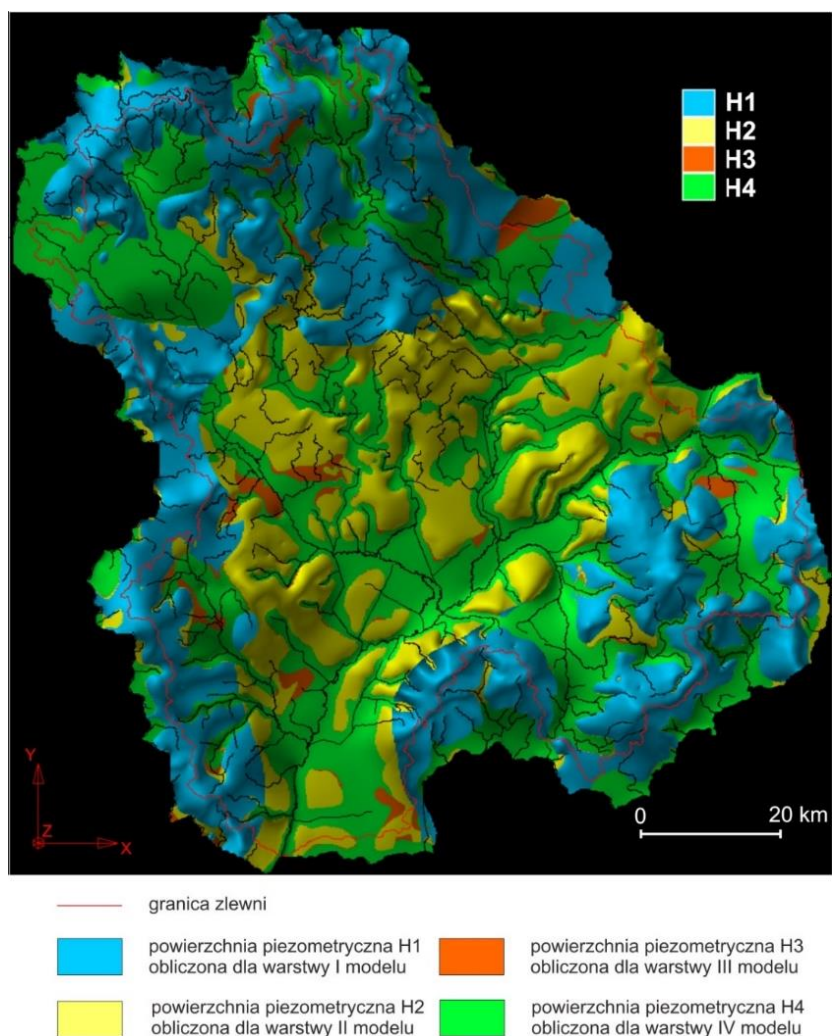
Wynik symulacji w postaci obliczonych czterech powierzchni piezometrycznych (H1, H2, H3 i H4), reprezentujących rozkład wysokości hydraulicznej w warstwach modelowych I, II, III i IV, przedstawiono w obrazowaniu 3D na ryc. 9 i 10. Wynik ten otrzymano dla symulowanego poboru wód podziemnych z obszaru badań wynoszącego $65\,198\text{ m}^3/24\text{h}$ wg. stanu na rok 2016 (Filar i in. 2018).

Na rycinach 9 i 10 kolorem niebieskim przedstawiono powierzchnię piezometryczną H1 obliczoną dla warstwy I modelu, zdefiniowanej na wysoczyznach otaczających dolinę Biebrzy. Kolorem żółtym, pomarańczowym i zielonym przedstawiono odpowiednio powierzchnie piezometryczne H2, H3 i H4 obliczone dla warstw II, III i IV modelu.

Układ powierzchni piezometrycznych na rycinach 9 i 10 przedstawia, w sensie zbudowanego modelu, system krążenia wód podziemnych w zlewni Biebrzy. Rysunki te pokazują, iż biebrzański system krążenia wód podziemnych składa się z szeregu systemów lokalnych związanych ze zlewniami cieków niższego rzędu niż Biebrza. I tak na obszarze wysoczyznowym będącym generalnie strefą zasilania, widocznych jest szereg lokalnych stref drenażu wód podziemnych związanych z głęboko wciętymi dolinami rzecznyymi. Z kolei w obszarze doliny Biebrzy będącej generalnie strefą drenażu widoczne są lokalne strefy zasilania poziomów wodonośnych odwzorowanych przez III i IV warstwę modelową.

Rycina 9 przedstawia powierzchnie piezometryczne widziane prostopadle do płaszczyzny XY. W danym punkcie obszaru modelu widoczna jest powierzchnia piezometryczna o największej rzędnej. Tym samym kolorystyczne zróżnicowanie obrazu będącego wynikiem nałożenia na siebie powierzchni H1, H2, H3 i H4 jest wyrazem przestrzennej struktury badanego systemu

krążenia wód podziemnych. Elementami tej struktury są przepływy międzywarstwowe przez utwory słaboprzepuszczalne oraz kierunki tych przepływów.



Ryc. 9. Obrazowanie 3D obliczonych powierzchni piezometrycznych H1, H2, H3 i H4 – widok prostopadły do płaszczyzny XY; przewyższenie 300-krotne

Źródło: opracowanie własne

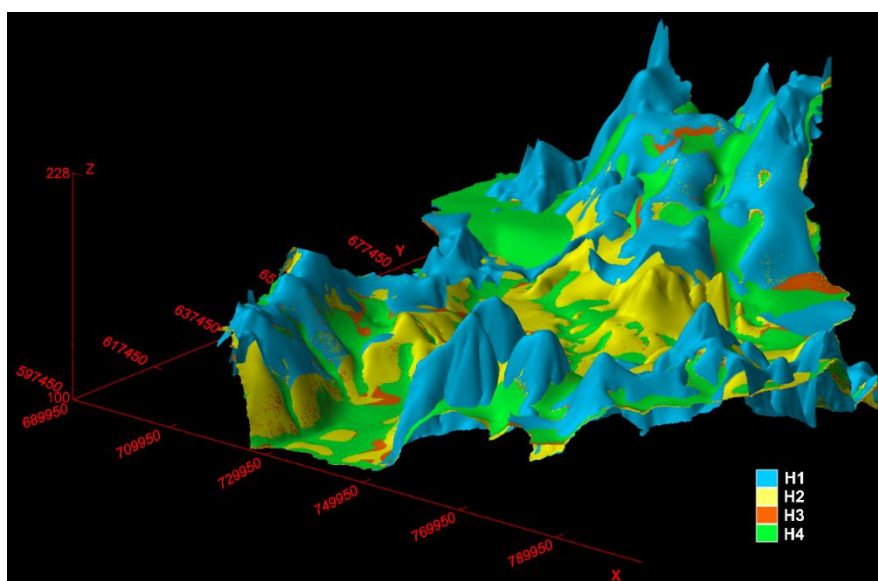
Tak więc obszary widoczne jako niebieskie to obszary wysoczyznowe, gdzie warstwa I zasila warstwę II, warstwa II zasila warstwę III, a warstwa III zasila warstwę IV. Z kolei w położonych na wysoczyźnie obszarach oznaczonych kolorem żółtym warstwa II zasila warstwę I, jednocześnie zasilając warstwę III, która z kolei zasila warstwę IV. W obszarach żółtych położonych w dolinie Biebrzy warstwa II zasila warstwę III, która zasila warstwę IV.

W obszarach oznaczonych kolorem pomarańczowym na wysoczyźnie – warstwa III zasila warstwę II, która zasila warstwę I. Ponadto warstwa III zasila tu jednocześnie warstwę IV. W dolinie Biebrzy w obszarze pomarańczowym warstwa III zasila warstwy II i IV.

Kolor zielony na wysoczyźnie wskazuje obszary, gdzie warstwa IV zasila warstwę III, warstwa III zasila warstwę II, a warstwa II zasila warstwę I. W dolinie Biebrzy kolor zielony oznacza, iż warstwa IV zasila warstwę III, która z kolei zasila warstwę II.

Obszary zielone to strefy drenażu, obszary widoczne jako niebieskie to wysoczyznowe obszary zasilania. Rejony żółte w dolinie Biebrzy to obszary zasilania, natomiast na wysoczyźnie to obszary drenażu warstwy II przez warstwy I i III.

W obszarach pomarańczowych warstwa III drenowana jest przez warstwy II i IV. Kształt granic poszczególnych obszarów na ryc. 9 jest miarą przestrzennego zróżnicowania systemu krążenia wód podziemnych w zlewni Biebrzy.



Ryc. 10. Obrazowanie 3D obliczonych powierzchni piezometrycznych H1, H2, H3 i H4 – widok z kierunku o azymucie 40° względem osi X i pod kątem 20° do płaszczyzny XY; przewyższenie 300-krotne; układ współrzędnych 1992 w płaszczyźnie XY; wartości na osi Z w metrach

Objaśnienia: na ryc. 9

Źródło: opracowanie własne

Przestrzenny obraz dynamiki wód podziemnych w zlewni Biebrzy może być wykorzystany dla ewentualnej rozbudowy sieci monitoringu wód podziemnych na tym obszarze.

Obrazowanie 3D pozwala „zobaczyć” dynamikę wód podziemnych z dowolnego kierunku. Przykładowo ryc. 10 to układ powierzchni piezometrycznych H1, H2, H3 i H4 widziany z kierunku o azymucie 40° względem osi X i nachyleniu 20° do płaszczyzny XY. Z tego kierunku łatwo dostrzec, szczególnie dobrze przy południowo-wschodniej granicy modelu, występowanie na wysoczyznach w dolinach cieków warunków subartezyjskich w warstwach II, III i IV.

Zwraca uwagę różnica morfologii pomiędzy poszczególnymi powierzchniami piezometrycznymi. Im głębszą warstwę modelu reprezentuje dana powierzchnia piezometryczna, tym

mniej charakteryzuje się zróżnicowaniem morfologicznym, co daje w efekcie mniejsze spadki hydrauliczne i tym samym mniejsze prędkości przepływu wód podziemnych niż w warstwie wyżej położonej. Świadczy to o mniejszej odnawialności zasobów wód podziemnych w dolnych warstwach badanego systemu wodonośnego niż w górnych warstwach tego systemu. Na podstawie określonej w procesie modelowania odnawialności wód podziemnych ustalone zostały ich zasoby dyspozycyjne.

Wnioski

- 1) Obrazowanie 3D dynamiki wód podziemnych w procesie modelowania ich przepływu jest praktycznym narzędziem, które można wykorzystać do analizy wyniku wykonanych symulacji.
- 2) W przypadku modelowania odwodnień górniczych obrazowanie 3D pozwala wprost ocenić skuteczność proponowanych wydatków barier odwodnieniowych.
- 3) W przypadku modelowania przepływu wód podziemnych w skali regionalnej w skomplikowanych na ogół systemach krążenia wód podziemnych, obrazowanie 3D pozwala wydzielić podstawowe elementy tych systemów jakimi są strefy zasilania i drenażu. Wydzielenie tych stref jest istotne dla rozdysponowania ustalonych zasobów tych wód.
- 4) Zdaniem autorów obrazowanie 3D wyników badań modelowych może być praktycznym uzupełnieniem typowego zestawu załączników graficznych w dokumentacji tych badań.

Bibliografia

- Filar S., Honczaruk M., Janik M., Józwiak K., Nidental M., Przytuła E., Starościak A., Szydło M., Śliwiński Ł., Węglarz D., 2018, *Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby dyspozycyjne wód podziemnych obszaru bilansowego zlewni Biebrzy*, NAG (nr inw. 8548/2019), PIG–PIB Warszawa.
- GMS 2.1 User's Manual*, 1999, Brigham Young University – Engineering Computer Graphics Laboratory, Provo, Utah 84602, USA.
- Kondracki J., 2009, *Geografia Regionalna Polski*, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Paczyński B., Sadurski A. (red.), 2007, *Hydrogeologia regionalna Polski, Tom I – Wody słodkie, Tom II – Wody mineralne, lecznicze i termalne oraz kopalniane*, PIG, Warszawa.
- Śmietański L., Filar S., Olesiuk G., Piasecka A., 2013, *Dokumentacja hydrogeologiczna określająca warunki hydrogeologiczne w związku z zamierzonym wykonaniem odwodnień w celu wydobywania węgla brunatnego ze złoża „Złoczew” w kategorii B+C₁, Część II. Numeryczny model filtracji wód podziemnych obszaru złoża węgla brunatnego „Złoczew”*, NAG (nr inw. 1457/2014), PIG–PIB, Warszawa.
- Woś A., 2010, *Klimat Polski w drugiej połowie XX wieku*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań.
- Żelaźniewicz A., Aleksandowski P., Buła Z., Karnkowski P. H., Konon A., Oszczytko N., Ślaczka A., Żaba J., Żyto K., 2011, *Regionalizacja tektoniczna Polski*, Komitet Nauk Geologicznych PAN, Wrocław: 60.