

*Gabriel Jeż, Paweł Jokić, Zygmunt Maksymiuk, Sławomir Mela,
Jacek Teodorski*

**WPŁYW KOPALNI WĘGLA BRUNATNEGO „BEŁCHATÓW”
NA STOSUNKI WODNE MAŁEJ ZLEWNI NIZINNEJ**

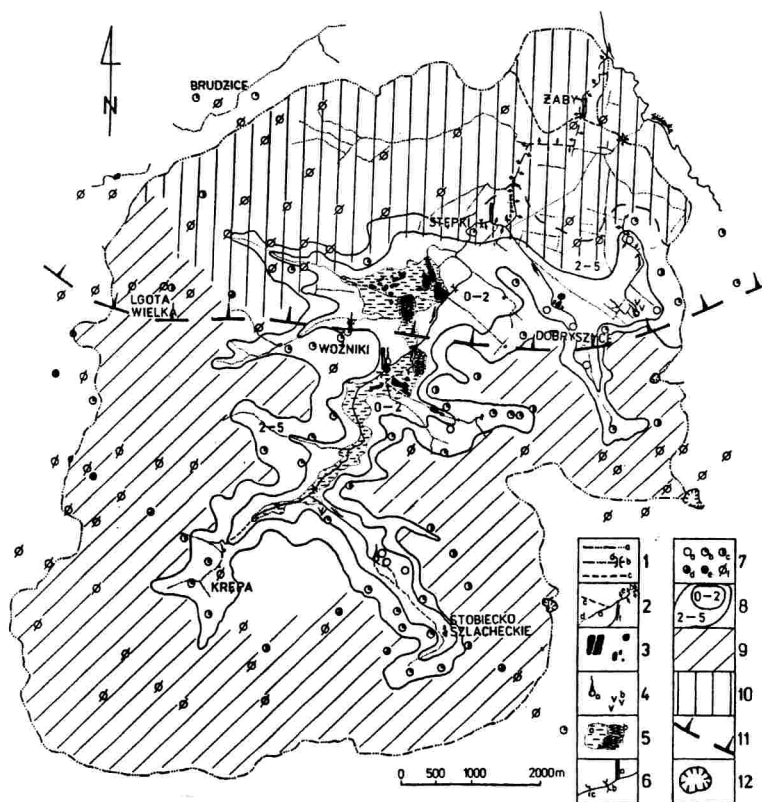
**THE INFLUENCE OF THE BROWN COAL MINE „BEŁCHATÓW”
ON WATER CONDITIONS OF A SMALL LOWLAND BASIN**

W artykule autorzy zmierzają do przedstawienia wpływu antropopresji na mechanizm obiegu wody w zlewni Kręcicy. Ukazano kierunki i siłę zmian warunków wodnych w latach 1981–1989. Szczegółowej analizie poddano zmiany sieci hydrograficznej, wód podziemnych i odpływu. Podjęto również próbę analizy bilansu wodnego zlewni. Przeprowadzone badania dowiodły, że wyraźna zmiana w sposobie obiegu wody w zlewni nastąpiła w 1983 r. Należy zatem uznać, iż od tego momentu charakter krążenia wody w dorzeczu istotnie zależy od działalności człowieka.

Problematyka przemian hydrologicznych zachodzących pod wpływem antropopresji, podjęta przez zespół pracowników Zakładu Hydrologii i Gospodarki Wodnej UŁ w 1980 r., nawiązuje do Międzynarodowego Programu Hydrologicznego. W programie tym, wśród licznych zagadnień wymagających pilnego rozwiązania, wskazuje się na potrzebę oceny wpływu urbanizacji i uprzemysłowienia na ustrój hydrologiczny i jakość wody. Szczególną uwagę zwraca się na badania cyklu hydrologicznego i zmiany bilansu wodnego zlewni małych i średniej wielkości.

W Polsce środkowej regionem, gdzie zachodzą intensywne zmiany hydrologiczne, wywołane działalnością człowieka, jest Bełchatowski Okręg Przemysłowy. Do szczegółowych badań wytypowano tu zlewnię Kręcicy (62 km²), wyposażoną w trzy posterunki wodowskazowe (Woźniki, Stępki, Żaby), stację meteorologiczną, osiem posterunków opadowych i dziewięć posterunków obserwacji wód podziemnych (rys. 1).

Poza podstawowymi, terminowymi obserwacjami hydrometeorologicznymi na założonej sieci posterunków, program badawczy obejmował: coroczne kartowanie hydrograficzne, opracowanie mapy litologicznej z przekrojami hydrogeologicznymi, systematyczne pomiary natężenia przepływów, badania przepuszczalności wodnej utworów powierzchniowych i wilgotności



Rys. 1. Mapa hydrograficzna zlewni Kręcicy, stan z lipca-sierpnia 1990 r.

1 – działki wodne: a – dział wodny III rzędu, b – dział wodny IV rzędu, c – dział wodny zamykający zlewnię do wodowskazu w Żabach; 2 – sieć rzeczna: a – cieki stałe, b – cieki sporadycznie wysychające, c – cieki okresowe, d – cieki epizodyczne, e – cieki irygujące, f – kierunek płynięcia wody; 3 – zbiorniki wód stojących – stawy i wypełnione wodą wyrobiska potorfowe; 4 – źródła: a – źródło właściwe, b – wyciek; 5 – mokradła: a – okresowe, b – stałe; 6 – zagospodarowanie cieków: a – wodowskaz, b – jaz ruchomy, c – zastawka; 7 – występowanie zwierciadła wody podziemnej w przedziałach głębokości: a – 0–2 m, b – 2–5 m, c – 5–10 m, d – 10–15 m, e – > 15 m, f – studnie suche; 8 – izarytmy „izobaty” wydzielaające obszary o różnych głębokościach do wody; 9 – obszar występowania poziomu wodonośnego pod gliną lub w utworach o charakterze materiału zwałowego: żwirowo-piaszczysto-gliniastego (aktualnie wymuszony wskutek odwodnienia kopalni); 10 – obszar występowania I płytkiego poziomu wodonośnego, aktualnie wyschniętego w wyniku odwodnienia; 11 – zasięg lejów depresyjnego; 12 – wyrobiska: żwirownie i piaskownie

Fig. 1. Hydrographic map of the Kręcica basin; July–August 1990

1 – watersheds: a – third order, b – fourth order, c – closed basin to river gauge in Żaby; 2 – river network: a – permanent, b – sporadic drying, c – intermittent, d – episodic, e – irrigating, f – direction of flow; 3 – ponds and excavations filled water; 4 – springs: a – perennial, b – seeps; 5 – crrs: a – perennial, b – intermittent; 6 – river's instruments: a – gauge, b – weir, c – valve; 7 – depth of water table: a – 0–2 m, b – 2–5 m, c – 5–10 m, d – 10–15 m, e – > 15 m, f – dried wells; 8 – isobaths; 9 – area of water-bearing level under clay or connected with glaciifluvial drift (at present is dry); 10 – area of the first shallow water-bearing level, actually dried; 11 – range of cone of depression; 12 – gravel and sand pits

gruntów. Poprzez rejestrację aktualnych stosunków wodnych i analizę danych pomiarowych zmierzano do ukazania zachodzących przemian warunków wodnych. Szczególną uwagę zwrócono na zmiany sieci hydrograficznej, wód podziemnych i zmiany odpływów. Badania te pozwoliły na wypracowanie formuły bilansu wodnego zlewni podlegających antropopresji.

OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ZLEWNI

Kręcica jest pierwszym lewobrzeżnym dopływem Widawki, odwadniającym wschodnią część Wysoczyzny Sulmierzyckiej. Północna część jej systemu znajduje się w zasięgu oddziaływania leja depresyjnego Kopalni Węgla Brunatnego „Bełchatów”.

Zasadniczymi elementami podłoża trzeciorzędowego i czwartorzędowego zlewni są jurajskie struktury antyklinalne o przebiegu osi NW–SE, rozdzielone synklinami kredowymi o analogicznym przebiegu (Błaszkievicz i in. 1968, Biernat 1971). Podłoże mezozoiczne w wielu miejscach przykryte jest osadami trzeciorzędowymi o niewielkiej miąższości. Bezpośrednio na utworach kredowych, a miejscami trzeciorzędowych, zalegają utwory czwartorzędowe, reprezentowane przez gliny zwałowe, piaski gliniaste oraz piaski i żwiry.

W rzeźbie badanego obszaru najwyraźniej rysują się wzgórza morenowe. Ciąg tych wzniesień wyznacza południową granicę zasięgu zlodowacenia środkowopolskiego stadiału warty i przebiega łukiem wzdłuż linii działu wodnego, ograniczającego zlewnię Kręcicy od południa i południowego wschodu (Domosławska-Baraniecka, Skompski 1967, Baraniecka, Sarnacka 1971).

Zlewnia Kręcicy ma charakter niecki otwartej ku północnemu wschodowi, uformowanej przez lokalny jezior lodowcowy powstały na skraju lobu Widawki (Baraniecka, Sarnacka 1971, Krzemiński 1974). Potwierdza to amfiteatralny układ form wypukłych i sposób ułożenia glin zwałowych, które tworzą zwarty monolit o miąższości 14–17 m, wypełniający całą zlewnię. Gliny przykryte są licznymi płatami osadów fluwioglacjalnych.

Współczesny obraz budowy geologicznej i rzeźby powierzchni zlewni Kręcicy jest wynikiem modelowania starszego podłoża przez procesy erozji i akumulacji w późniejszych okresach historii czwartorzędu, do holocenu włącznie (Maksym iuk 1980).

Charakter i rozmieszczenie utworów powierzchniowych warunkuje występowanie pasowego układu stref infiltracji (Burchard, Jokieli 1984). Analiza potencjalnych możliwości infiltracyjnych warstwy 1,5 m p.p.t. wykazała, że na przeważającym obszarze zlewni dominują utwory o dobrej

przepuszczalności (48,9% powierzchni zlewni). Głównymi rejonami ich występowania są północna i południowa część zlewni oraz fragmenty części środkowej. Utwory słaboprzepuszczalne (41,45% powierzchni zlewni) dominują zaś w północno-wschodniej, środkowej oraz południowej części zlewni. Utwory o bardzo słabej przepuszczalności, w postaci glin ciężkich i ilów, pojawiają się najczęściej na zachodzie. Łączna ich powierzchnia wynosi 4,5% powierzchni zlewni.

Naprzemianległość serii glin zwałowych i rozdzielających je osadów żwirowo-piaszczystych stwarza dogodne warunki piętrowego występowania wód podziemnych (Maksymiuk 1980). W zlewni Kręcicy stwierdzono występowanie co najmniej dwóch poziomów wodonośnych piętra czwartorzędowego (Jokiel, Maksymiuk, Zawadzka 1985). Pierwszy poziom – naglinowy – związany jest na wysoczyznach z piaskami morenowymi i osadami fluwioglacjalnymi, a w dolinach rzecznych z osadami aluwialnymi i organicznymi. Występuje on najczęściej do głębokości 4 m p.p.t. W okresie przedinwestycyjnym głębokość występowania zwierciadła wody poziomu naglinowego kształtowała się w granicach od 2 m p.p.t. w strefach krawędziowych dolin rzecznych do 5–8 m p.p.t. na wysoczyznach. Sprzyjało to tworzeniu się w dolinach rzecznych obszarów podmokłych i mokradeł stałych. Drugi poziom wodonośny stwierdzono w osadach piaszczysto-żwirowych pod glinami morenowymi zlodowacenia środkowopolskiego na głębokości 8–15 m p.p.t. Z badań wynika, iż głęboko wcięte doliny rzeczne górnej i środkowej Kręcicy mają z nim pośredni związek, polegający najczęściej na oddolnym zasilaniu osadów wypełniających kopalne rozcięcia dolinne. Zwierciadło wody tego poziomu jest napięte i nie współkształtne z rzeźbą terenu. Prowadzi to do lokalnej niezgodności działów wodnych: powierzchniowego i podziemnego. W zlewni występują też wody śródglinowe, gromadzące się w soczewkach piaszczystych i żwirowych oraz w lokalnych spiaszczeniach glin morenowych.

Liczne źródła i wysięki, jakie w okresie przedinwestycyjnym występowały w zlewni, zasilane były z pierwszego poziomu wodonośnego. Znaczne powierzchnie dna doliny Kręcicy i dolin pobocznych zajmowały mokradła stałe. Największy ich kompleks stwierdzono w centralnej części dorzecza między Woźnikami a Stępkami. W jego zasilaniu mają swój udział także wody poziomu podglinowego.

Sieć rzeczna systemu Kręcicy wywodzi się z fazy kataglacjalnej stadium warty zlodowacenia środkowopolskiego (Krzemiński 1974, Maksymiuk 1980). Kręcica bierze początek pod Stobieckiem Szlacheckim, z podmokłości położonych w dnie doliny u stóp wału moren czołowych. W początkowym biegu, aż do połączenia z lewym dopływem spod Krępy, struga ma spadek 4,1‰, co sprawia, że już na 3 km biegu posiada wyraźnie wykształcone koryto, prowadzące w okolicach Młynka Wierzbickiego

13 dm³ · s⁻¹ wody. Po przyjęciu ciekę spod Krępy, Kręcica wkracza w wyraźnie wykształconą, wypełnioną torfami dolinę o kierunku SW–NE, który zachowuje aż do ujścia. Do wodowskazu w Woźnikach, zamykającego górny bieg rzeki, średni jej spadek wynosi 3,2‰. Poniżej Woźnik rzeka wpływa na obszar rozległej, nieckowatej formy o charakterze zastoiska. Wyraźnie maleje spadek, a w korycie pojawia się roślinność utrudniająca odpływ. Owo nieckowate obniżenie (torfowisko) stanowi rodzaj węzła hydrograficznego, do którego koncentrycznie spływają ciekę drenujące obszary wysoczyznowe. Obszar ten pocięty jest rowami odwadniającymi. W początkowym okresie badań (1983 r.) występowały tu liczne, wypełnione wodą i zarastające, wyrobiska po eksploatacji torfów.

Na 10 km biegu Kręcicy zlokalizowano wodowskaz w Stępkach. Nieco poniżej rzeka przyjmuje jeden z większych dopływów (ciek spod Białej Góry). Dalej płynie szeroką, słabo zarysowaną doliną. Koryto ma charakter żłobu o stromych brzegach i silnie zarastającym dnie. Na 12,5 km biegu znajduje się zamykający zlewnię wodowskaz w Żabach. Średni spadek rzeki do Żab wynosi 2,14‰. W okresie przedinwestycyjnym na odcinku między Stępkami i Żabami Kręcica przyjmowała jeszcze dwa znaczące dopływy. Warto dodać, iż na całej długości rzeka jest uregulowana.

Badana zlewnia leży w strefie przejściowej od klimatu nizin środkowopolskich do klimatu wyżyn Polski południowej (Dubaniewicz, Zawadzka 1985). Przebieg i wielkość podstawowych elementów meteorologicznych, zarówno w układzie rocznym jak i wieloletnim, posiada właściwości typowe dla warunków klimatycznych dorzecza Widawki. Średnie zachmurzenie nieba w roku wynosi 59–70%; jest więc bliskie przeciętnej dla Polski. Podobnie kształtuje się usłonecznienie (39% usłonecznienia możliwego). Temperatura powietrza zbliżona jest do temperatur Polski środkowej. W Kaszewicach średnia roczna jej wartość w okresie 1976–1989 wyniosła 7,4°C. Najniższe średnie miesięczne temperatury notowano w styczniu, najwyższe w czerwcu.

Opady atmosferyczne cechuje zróżnicowanie przestrzenne, ale ich struktura jest podobna do obserwowanej w całym regionie (Jokiel, Maksymiuk, Zawadzka 1985). W okresie 1951–1989 roczne sumy opadów wahały się od 402 do 900 mm. Największą częstością odznaczały się przedziały sum opadowych 550–600 mm, a więc w zakresie opadu normalnego dla obszaru Polski środkowej.

W zlewni Kręcicy dominują grunty orne – około 80% powierzchni (Burchard, Jokiel 1984). Znacznie mniejszy obszar pokrywają pastwiska – około 12%. Pozostała część zajęta jest przez inne rodzaje pokrycia terenu, między innymi lasy, tereny zabudowane i nieużytki. Zlewnia ma zatem charakter typowo rolniczy.

ZMIANY HYDROLOGICZNE W OKRESIE 1981—1990

Od 1975 r., tj. od podjęcia prac związanych z budową KWB „Bełchatów”, rozpoczęto odwadnianie górotworu. Efektem odwadniania jest rozwój leja depresyjnego wokół odkrywki udostępniającej złoża. Jego oddziaływanie przejawia się wyraźnymi, z każdym rokiem pogłębiającymi się zmianami warunków hydrologicznych i hydrogeologicznych (Maksymiuk, Moszczyńska 1981, Jokiel, Maksymiuk, Zawadzka 1985, Jokiel, Maksymiuk 1986, 1988). Objawiają się one wysychaniem mokradeł i źródeł, zanikiem wód w studniach gospodarskich (wyjątek stanowią wody zawieszone na glinach) oraz stopniowym, aż do całkowitego zaniku włącznie, zmniejszaniem się przepływów w ciekach.

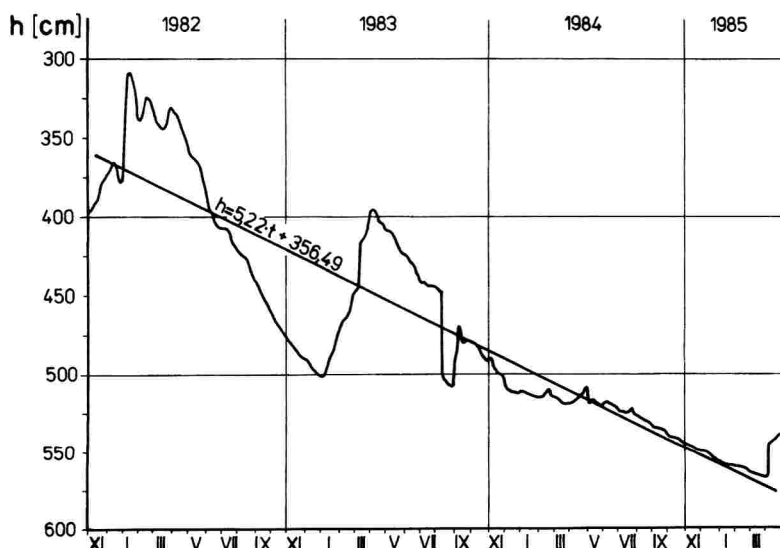
Rozwijający się lej depresyjny, zgodnie z obliczeniami IMGW, już w 1980 r. objął swym zasięgiem 9% powierzchni zlewni. Pierwszym przejawem zmian hydrologicznych było postępujące zmniejszanie się powierzchni mokradeł. Ich wysychanie rozpoczęło się w dolnej części zlewni, położonej najbliżej wkopu udostępniającego złoża. W latach 1982–1985 zasięg istniejących tam mokradeł kurczył się intensywnie, aż do ich całkowitego zaniku. W pozostałej części dorzecza, poza granicami leja depresyjnego, obserwowano oscylacje zasięgu podmokłości. Rytm oscylacji był zgodny z przebiegiem zasilania atmosferycznego. Powierzchnie mokradeł w kolejnych latach zajmowały: w 1981 r. – 9,3 km², w 1982 r. – 8,6 km², w 1983 r. – 3,7 km², w 1984 r. – 4,4 km² oraz w 1985 r. – 5,1 km². Najmniejszą powierzchnię zanotowano w 1983 r., tj. w okresie suszy atmosferycznej. W 1984 r., w związku ze wzrostem zasilania, zasięg mokradeł powiększył się wyraźnie, zaś po 1985 r. zmiany przybrały charakter jednokierunkowy – ciągłego wysychania. W 1990 r. mokradła stwierdzono tylko na torfowisku centralnej części zlewni. W sierpniu tegoż roku na mokradłach okresowych zwierciadło wody podziemnej występowało na głębokości 1 m p.p.t. Zajmowały one w tym czasie powierzchnię zaledwie 1,7 km² (rys. 1).

Drugim – po zaniku mokradeł – przejawem zachodzących zmian było i jest wysychanie studzien, wynikające z obniżania się zwierciadła wód podziemnych. Systematyczne obserwacje (tygodniowe) płytkich wód podziemnych w studniach w Stobiecku Szlacheckim, Galonkach, Woźnikach i Brudzicach wykazały, iż dynamika poziomu ich zwierciadła zgodna jest z rytmem zasilania atmosferycznego. Wysokie stany notowano w okresie roztopów wiosennych, zaś niskie jesienią i zimą. Sezonowy rytm zmian w studniach, z niewielką tendencją malejącą, notowano do 1983 r. włącznie (Jokiel, Maksymiuk 1986). Począwszy od 1983 r. rytm ten zaczął się różnicować. W dolnej części zlewni zmiany sezonowe zanikają (rys. 2). Zaznacza się natomiast wyraźne i jednostajne obniżanie się poziomu wody. W kolejnych latach notuje się zanik wody w coraz głębszych studniach, reprezentujących I poziom wodonośny dolnej części zlewni (rys. 1). Dla

przykładu, studnia w Brudzicach o głębokości ponad 6 m całkowicie wyschła jesienią 1989 r. W ocenie autorów zjawiska te pozostawały w związku z rozwijającym się lejem depresyjnym kopalni.

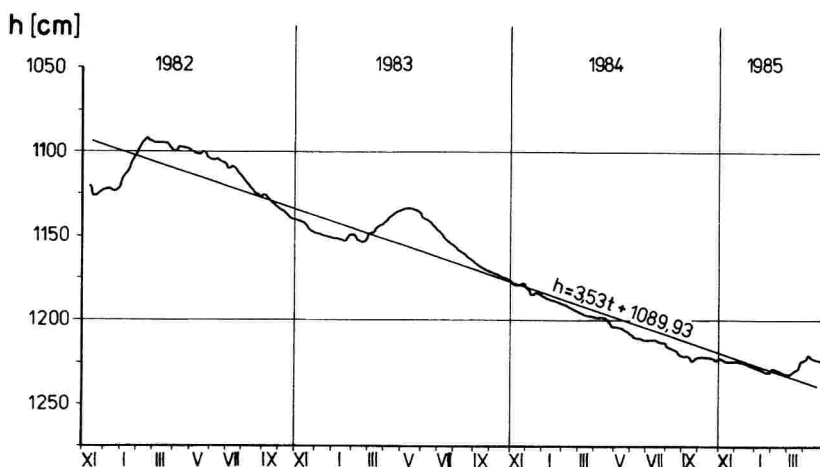
Drugi poziom wodonośny obserwowano w studniach w Wierzbicy i Lgocie Wielkiej (rys. 3). Poza typowym dla tego poziomu rytmem wahań, charakteryzującym się znacznym przesunięciem w czasie kulminacji zwierciadła wody w stosunku do maksymalnego zasilania roztopowego, zanotowano wyraźny, jednokierunkowy trend malejący, który pojawił się już w pierwszych latach pracy kopalni (J o k i e l, M a k s y m i u k, Z a w a d z k a 1985). W odniesieniu do tego poziomu oddziaływanie KWB „Bełchatów” zaznacza się nieco dalej na południe niż w przypadku poziomu naglinowego. W chwili obecnej, ponad 15-letni proces odwadniania kopalni doprowadził do całkowitego wyschnięcia większości studzien czerpiących wodę z II poziomu wodonośnego (rys. 1).

Konsekwencją obniżania się zwierciadeł wód podziemnych jest nie tylko wysychanie mokradel, lecz także cieków. Obserwacje terenowe przeprowadzone latem 1990 r. wykazały zanik przepływów nie tylko w ciekach dolnej części zlewni, tj. Kręcicy poniżej Stępek, Strugi „Zalesickiej” czy bezimiennego cieku spod Brudzic, lecz także w centralnej i górnej części zlewni. Wyjątek stanowi Kręcica, choć i ona znacznie skróciła swój bieg; aktualnie prowadzi wodę na odcinku od źródeł koło Młynka Wierzbickiego do Stępek. W lewym jej dopływie, uprzednio biorącym początek na południe od Krępy, w 1990 r. wodę w korycie zarejestrowano dopiero około 1 km na północ od Krępy.



Rys. 2. Wykres stanów wód podziemnych w studni w Brudzicach

Fig. 2. Variability of groundwater level at Brudzice



Rys. 3. Wykres stanów wód podziemnych w studni w Wierzbicy

Fig. 3. Variability of groundwater level at Wierzbica

TENDENCJE I RYTM ZMIAN ODPLYWU W LATACH 1981–1989

Proces odpływu rzeczny, jako zjawisko geofizyczne, podlega określonym prawidłowościom. Jedną z jego cech charakterystycznych jest duża zmienność w czasie z wyraźną cyklicznością sezonową, roczną, oraz z mniej lub bardziej wyraźnie zaznaczonym rytmem wieloletnim. Opis tego złożonego procesu, ze względu na obiektywną niemożność uwzględnienia wszystkich czynników, które go kształtują, wymaga użycia modelu stochastycznego (losowego). Podstawowym warunkiem poprawności uzyskanych wyników jest jednorodność ciągów pomiarowych wykorzystanych w obliczeniach. Proces odpływu charakteryzuje się z reguły niejednorodnością czasową, związaną ze zmiennością w czasie czynników na niego wpływających. Prowadzi to do niestacjonarności zjawiska, rezultatem czego jest zmiana w czasie średniej i wariancji. W przypadku zmian odpływów dokonujących się pod wpływem antropopresji, niestacjonarność staje się rezultatem niejednorodności apriorycznej.

Już pobieżna analiza wykresów przebiegu odpływów ze zlewni Kręcicy (rys. 4) pozwala na wyodrębnienie trzech składników: trendu, wahań sezonowych i zakłóceń przypadkowych. Przez trend szeregu czasowego przepływu rozumiemy pewną, wyrównaną linię wyznaczającą zasadniczy kierunek rozwoju badanego zjawiska. Wahania sezonowe są wahaniami o okresie rocznym. Mogą one być stałe lub zmienne. Zarówno odpływ całkowity, jak

i podziemny cechowała tendencja spadkowa. Nakładające się na trend wahania sezonowe charakteryzują się tym, że w miesiącach zimowo-wiosennych obserwuje się wzrost odpływu, a w miesiącach letnio-jesiennych spadek. Zakłócenia tej prawidłowości są zakłóceniami przypadkowymi i nieregularnymi; najwyraźniej zaznaczyły się one w roku 1984.

Model niestacjonarnego procesu stochastycznego z trzema wyróżnionymi składnikami można przedstawić w postaci:

$$H(t) = P(t) + S(t) + U(t) \quad (1)$$

gdzie:

$H(t)$ – odpływ w momentach czasu t ,

$P(t)$ – ciągła i nielosowa funkcja dyskretnej zmiennej czasowej t ; trend procesu stochastycznego,

$S(t)$ – ciągła i nielosowa funkcja dyskretnej zmiennej czasowej t ; składnik sezonowy.

$U(t)$ – rzeczywisty proces stacjonarny o średniej równej zero.

Zakładając, że trend jest liniowy, a składnik sezonowy stały, kształtowanie się odpływu ze zlewni w latach 1981–1989 można opisać modelem szeregu czasowego z periodycznym składnikiem sezonowym i liniową funkcją trendu postaci (Zieliński 1979):

$$H(t) = \sum_{k=1}^m a_{ok} \cdot Q_{kt} + a_1 t + u_t \quad (t = 1, \dots, n > m + 1) \quad (2)$$

gdzie:

$$a_{ok} = a_o + d_k \quad (k = 1, \dots, m = 12), \quad a_o = m^{-1} \cdot \sum_{k=1}^m a_{ok},$$

a_{ok} – składnik sezonowy,

d_k – odchylenie sezonowe od linii trendu,

Q_{kt} – zmienna przyjmująca wartość 1, gdy $t \equiv k(|m|)$ oraz 0 w pozostałych przypadkach,

a_1 – współczynnik kierunkowy prostej regresji,

t – dyskretna zmienna czasowa,

u_t – składnik losowy.

Weryfikacji modelu dokonano badając dopuszczalność modelu ze względu na R^2 , wyrazistość modelu, istotność parametrów strukturalnych, symetrię, losowość, stacjonarność i autokorelację składnika losowego (Bartosiewicz 1989).

Uzyskano następujące modele zmian odpływu całkowitego i podziemnego w zlewni Kręcy w latach 1981–1989:

$$H_c(t) = -0,094t + \sum_{k=1}^{12} a_{ok} Q_{kt} + u_t \quad (3)$$

gdzie:

$$a_{ok} = [6,1; 10,2; 12,5; 9,9; 11,9; 8,0; 6,0; 5,0; 3,4; 4,2; 3,8; 4,4],$$

H_c – odpływ całkowity (miesięczny wskaźnik odpływu),

$$H_g(t) = -0,044t + \sum_{k=1}^{12} a_{ok} Q_{kt} + u_t \quad (4)$$

gdzie:

$$a_{ok} = [5,9; 6,7; 7,6; 6,4; 7,9; 6,3; 3,6; 3,7; 2,5; 2,8; 3,2; 3,7],$$

H_g – odpływ podziemny (miesięczny wskaźnik odpływu).

Współczynniki kierunkowe prostej regresji w obu przypadkach okazały się istotne na poziomie $\alpha = 0,05$ (błędy standardowe współczynników kierunkowych wynoszą odpowiednio: 0,018 i $9,75 \cdot 10^{-3}$, test t-Studenta odpowiednio: -5,07 i -4,48). Równania te dowodzą wyraźnej malejącej tendencji odpływu całkowitego (około $0,1 \text{ mm} \cdot \text{miesiąc}^{-1}$) i podziemnego (około $0,04 \text{ mm} \cdot \text{miesiąc}^{-1}$). Daje to odpowiednio 6 i 2,6 mm w ciągu całego badanego okresu.

Odpływ całkowity wykazywał sezonowy wzrost od grudnia do kwietnia i spadek od maja do listopada. Maksimum odpływu notowano w styczniu, drugorzędne w marcu, minimum w lipcu, drugorzędne we wrześniu. Sezonowy rozkład odpływu podziemnego wykazywał podobne cechy. Wzrost odpływu podziemnego obserwowano od listopada do kwietnia, spadek od maja do października. Maksima i minima odpływu podziemnego występowały w tych samych terminach, ale zwraca uwagę zamiana miesięcy z pierwszo- i drugorzędnym maksimum. Maksimum odpływu całkowitego w styczniu może być pewnym zaskoczeniem. Jednakże gdy weźmiemy pod uwagę warunki termiczne zimą badanego okresu okaże się, iż dodatnie temperatury powietrza były dość powszechne. Częste i nagłe odwilże przy lokalnym przemarzaniu warstwy przypowierzchniowej gruntu powodowały duże zasilanie cieków, zwłaszcza drogą powierzchniową. Z tego również powodu styczniowe maksimum odpływu podziemnego jest mniejsze od marcowego.

Stopień dopasowania modeli do danych empirycznych okazał się stosunkowo niski (współczynniki determinacji odpowiednio: 0,46 i 0,48). Analizując wykresy odpływów zaobserwowanych i teoretycznych, obliczonych na podstawie modeli (rys. 4), można stwierdzić, że największe różnice w przebiegu krzywych empirycznej i teoretycznej dotyczą głównie pierwszej części badanego okresu. Można to tłumaczyć w dwojaki sposób. Po pierwsze, początkowe lata charakteryzowały się anormalnymi warunkami odpływu (susza atmo-

sferyczna i hydrologiczna lat 1982 i 1983), co powodowało znaczne zaburzenie struktury sezonowej. W takim przypadku bardziej odpowiedni powinien okazać się model uwzględniający zmienną sezonowość. Po drugie, można założyć, że dadzą się wyróżnić dwa okresy, w których czynniki decydujące o warunkach odpływu były różne. Jeżeli tak, to większą losowość odpływu w pierwszych latach można wiązać ze zmiennością zasilania atmosferycznego, natomiast bardziej deterministyczny charakter odpływu po 1984 r. – z odwadnianiem KWB „Bełchatów”. Tej drugiej tezy postaramy się dowieść w dalszej części opracowania.

Jedną z podstawowych miar stosowanych w hydrologii jest współczynnik odpływu. Wyraża on udział danej formy odpływu w wielkości zasilania atmosferycznego. Podobnie jak w przypadku odpływu całkowitego i podziemnego, podjęto próbę ustalenia zmian współczynników odpływu całkowitego i podziemnego i ich opisu. Uzyskano następujące modele (rys. 5):

$$C_c = -0,337t + \sum_{k=1}^{12} a_{ok} Q_{kt} + u_t \quad (5)$$

gdzie:

$$a_{ok} = [15,1; 15,6; 31,1; 47,0; 63,2; 25,3; 8,4; 7,1; 6,5; 7,1; 13,8; 19,3],$$

C_c – współczynnik odpływu całkowitego,

$$C_g = -0,193t + \sum_{k=1}^{12} a_{ok} Q_{kt} + u_t \quad (6)$$

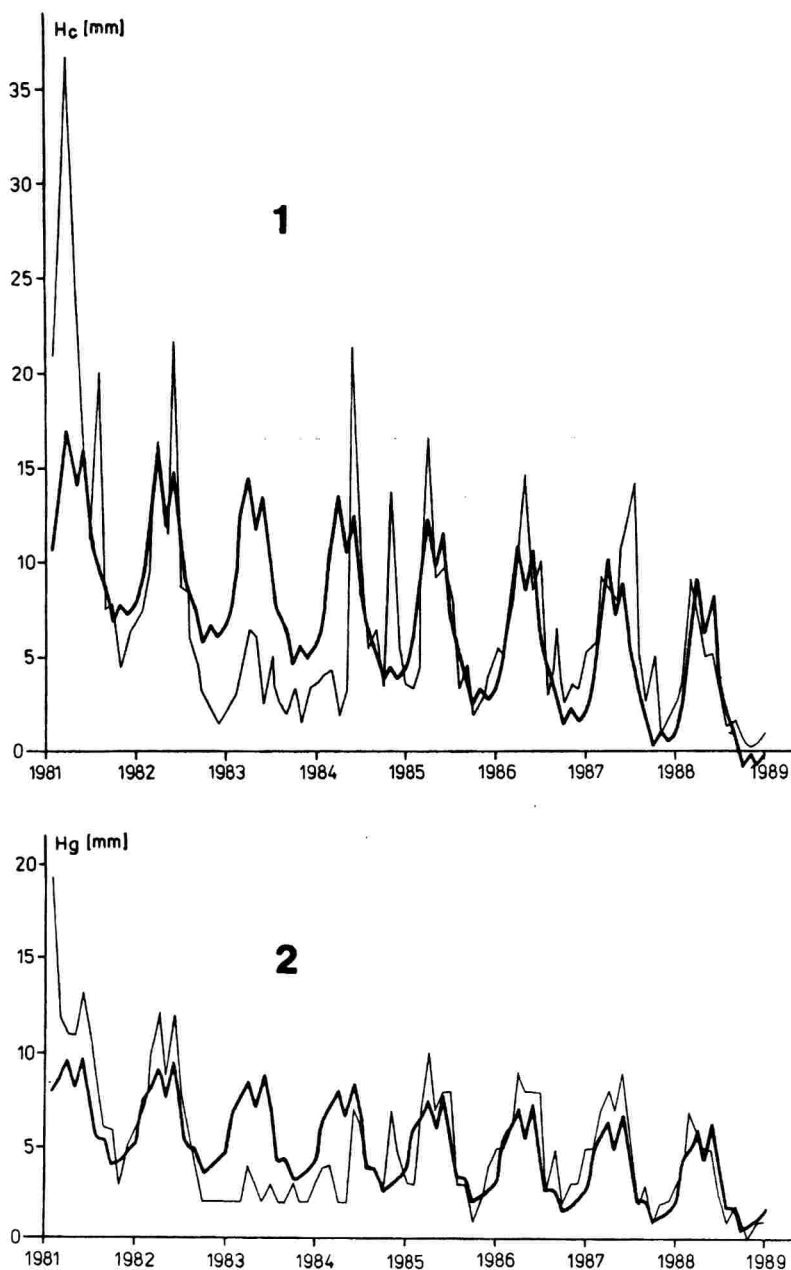
gdzie:

$$a_{ok} = [13,9; 11,0; 20,5; 28,7; 48,2; 20,8; 5,3; 5,3; 4,5; 5,3; 11,4; 16,8],$$

C_g – współczynnik odpływu podziemnego.

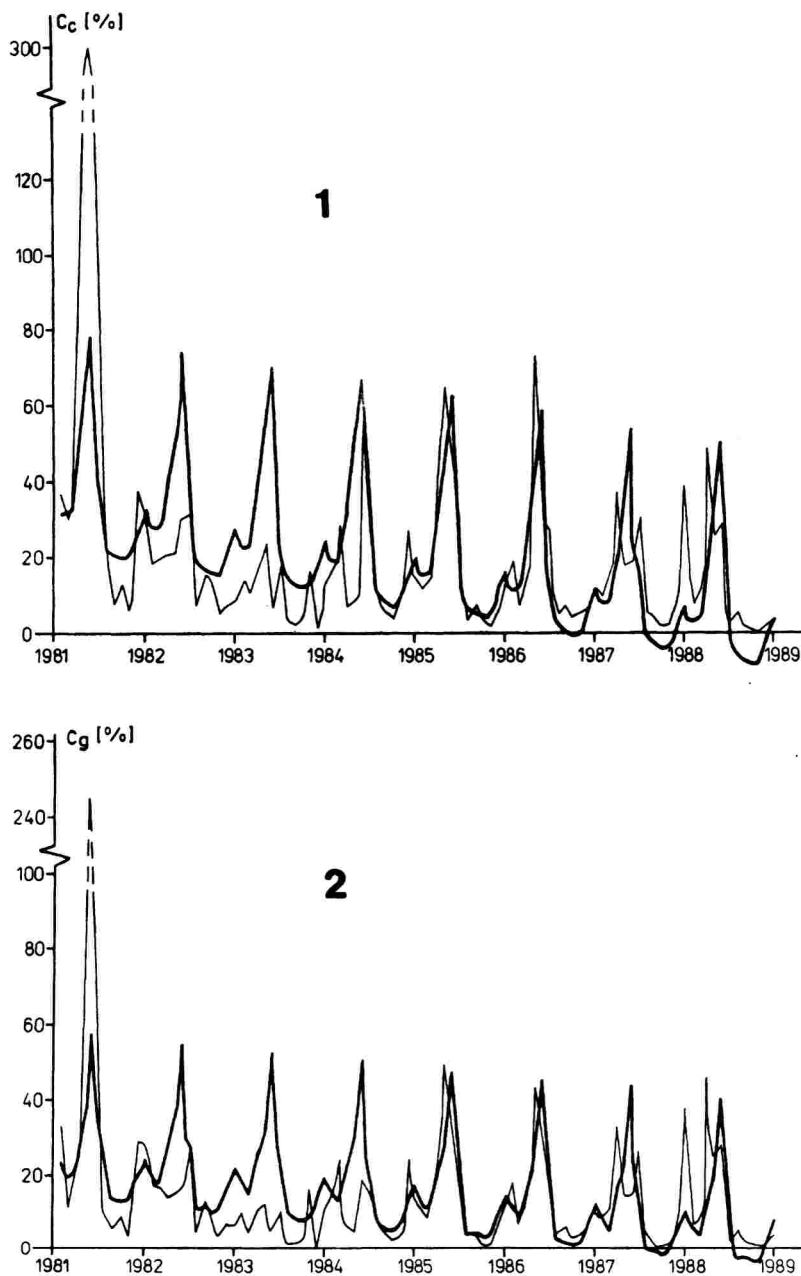
Współczynniki kierunkowe prostych regresji są istotne na poziomie $\alpha = 0,05$, test t-Studenta odpowiednio: 2,9 i -2,12 i wskazują, iż współczynniki odpływu podlegały stopniowemu zmniejszaniu, co wobec niewielkich zmian opadów świadczy o zmniejszaniu się odpływów. Sezonowa struktura jest identyczna: wzrost współczynników odpływu od stycznia do kwietnia, spadek od maja do grudnia, maksimum w marcu, minimum w lipcu. Wszystkie uwagi dotyczące stopnia dopasowania modeli do danych empirycznych odpływów całkowitego i podziemnego zachowują aktualność i w tym przypadku.

Zwraca uwagę fakt, iż linie modeli wyznaczają pewne umowne terminy „zerowania się” współczynników odpływu. Terminy te są oczywiście przybliżone. O ile jednak od lipca 1984 r. koryto Kręcicy w dolnym biegu wysychało na krótkie okresy, to pod koniec badanego wielolecia Kręcica w Żabach w czasie lata nie prowadziła już wody.



Rys. 4. Wykres chronologiczny empirycznych i teoretycznych miesięcznych wskaźników odpływu: 1 – całkowitego, 2 – podziemnego; pogrubiono funkcję modelu

Fig. 4. Observed and simulated, monthly depth flow: 1 – total flow, 2 – groundwater flow; thickened model's function



Rys. 5. Wykres chronologiczny empirycznych i teoretycznych miesięcznych współczynników odpływu: 1 – całkowitego, 2 – podziemnego; pogrubiono funkcję modelu

Fig. 5. Observed and simulated, monthly flow coefficients: 1 – total flow, 2 – groundwater flow; thickened model's function

Modele opisujące rzeczywistość mogą spełniać trzy zasadnicze funkcje: analityczno-opisową, diagnostyczno-kontrolną i prognostyczno-planistyczną. Najbardziej spektakularną funkcją modeli jest funkcja prognostyczna. Prognozowanie w warunkach szybko zachodzących zmian jest zadaniem bardzo trudnym. Jakkolwiek modele szeregów czasowych są powszechnie stosowane w predykcji, autorzy uważają, iż w tym konkretnym przypadku, z uwagi na nowe jakościowe zmiany w samej kopalni, przewidywanie dalszego rozwoju zjawisk z wykorzystaniem ustalonych zależności wymaga ostrożności.

BILANS WODNY ZLEWNI W LATACH 1981-1989

Zestawienie oznaczeń stosowanych w tekście:

- P – opad miesięczny skorygowany (mm),
- H_p – d wpływ ze strefy aeracji – odpływ powierzchniowy i podpowierzchniowy (mm),
- H_g – odpływ ze strefy saturacji – odpływ podziemny (mm),
- E_p – parowanie terenowe wyznaczone metodą Konstantinowa (mm),
- E_s – parowanie terenowe skorygowane (mm),
- Ra – retencja 1-metrowej warstwy aeracji (mm),
- Rs – retencja warstwy aeracji poniżej 1 m i warstwy saturacji (mm),
- Ra_{max} – maksymalna pojemność wodna 1-metrowej warstwy aeracji, utożsamiana z połową pojemnością wodną – PPW (mm),
- Ra_{min} – minimalny zapas wilgoci w 1-metrowej warstwie aeracji, utożsamiany z wilgotnością punktu wędnięcia – ZPW (mm),
- F – przesiąkanie do strefy saturacji (mm),
- t – średnia miesięczna temperatura powietrza (°C),
- * – retencja początkowa,
- ** – retencja końcowa.

STRUKTURA BILANSU WODNEGO

Podstawowym celem każdego bilansu wodnego zlewni jest ilościowa ocena jego składowych oraz określenie wzajemnych relacji między nimi. Z punktu widzenia gospodarki wodnej tego typu informacje są najważniejszą przesłanką pozwalającą ukierunkować obecne i przyszłe działania w celu zachowania lub poprawy stosunków wodnych w zlewni. W zlewniach o naturalnym cyklu hydrologicznym bilans wodny ma charakter *quasi*-stabilny, a występujące odchylenia w poszczególnych latach związane są z naturalnymi procesami atmosferycznymi. Inaczej, gdy bilans zestawiany jest dla zlewni

znajdującej się pod wpływem antropopresji. Na fluktuacje naturalne nakładają się wówczas procesy stymulowane działalnością człowieka. Szczególnie wyraźnie problemy te pojawiają się wtedy, gdy badana zlewnia „przechodzi” z obiegu naturalnego na skażony działalnością człowieka. Oddzielenie zmian wynikających z „szumu klimatycznego” od zmian antropogenicznych jest wówczas bardzo trudne. Dotyczy to w szczególności składowych bilansu obliczanych pośrednio, np. retencji.

Podstawowym celem prezentowanego bilansu wodnego jest uchwycenie zmian w stanie retencji związanych z rozwojem leja depresyjnego KWB „Bełchatów”. Z przedstawionych wyżej analiz wynika, iż zmiany te mają charakter ilościowy i dotyczą głównie retencji strefy saturacji oraz odpływu podziemnego.

Ideą bilansu jest prześledzenie stanu retencji zlewni Kręcicy w czasie i uchwycenie momentu, w którym doszło do radykalnego zaburzenia jej naturalnego cyklu hydrologicznego. Tak postawiony problem wymagał adaptacji stosowanych dotychczas rozwiązań.

Propozycja bilansowania, którą można nazwać „krok po kroku”, polega na zestawieniu bilansu dla kolejnych miesięcy, obliczaniu retencji na końcu każdego miesiąca i założeniu, iż retencionowane zasoby stają się retencją początkową dla następnego miesiąca. Metoda ta wydaje się najodpowiedniejsza, mimo że zawiera szereg uproszczeń i założeń wstępnych.

Proponowany sposób bilansowania zakłada dwudzielną strefę aktywnej wymiany oraz związany z tym podział odpływu na: podziemny (ze strefy saturacji) i powierzchniowy (ze strefy aeracji). Wydzielono zatem strefę przypowierzchniową (1-metrową), w której zachodzą procesy wymiany wody z atmosferą, w tym parowanie i transpiracja, oraz procesy odpływu powierzchniowego i podpowierzchniowego. Strefa dolna obejmuje tę część zlewni Kręcicy, w której udział wymiany z atmosferą jest zaniedbywalnie mały. Woda wprowadzana jest do niej wskutek przesiąkania, wyprowadzana zaś wskutek odpływu podziemnego lub, co w przypadku zlewni Kręcicy okazało się bardzo istotne, wskutek ucieczki do sfery apotamicznej. W efekcie bilans wodny prowadzony jest dla obu stref, przy uwzględnieniu jednak wzajemnych powiązań między nimi. Schemat sposobu bilansowania przedstawia się następująco:

1° Jeżeli $t > 0$

Strefa aeracji:

$$Ra_{\max} \geq Ra^{**} \geq Ra_{\min} \Rightarrow Ra^* + P = E_p + H_p + Ra^{**} \quad (a^1)$$

$$Ra^{**} < Ra_{\min} \Rightarrow Ra^* + P = E_s + H_p + Ra_{\min} \quad (b^1)$$

$$Ra^{**} > Ra_{\max} \Rightarrow Ra^* + P = E_p + H_p + F + Ra_{\max} \quad (c^1)$$

Strefa saturacji:

$$Ra^{**} \leq Ra_{\max} \Rightarrow Rs^* = H_g + Rs^{**} \quad (d^1)$$

$$Ra^{**} > Ra_{\max} \Rightarrow Rs^* + F = H_g + Rs^{**} \quad (e^1)$$

2° Jeżeli $t < 0$

Strefa aeracji:

$$Ra_{\max} \geq Ra^{**} \geq Ra_{\min} \Rightarrow \text{jak w schemacie (a')} \quad (a^2)$$

$$Ra^{**} < Ra_{\min} \Rightarrow \text{jak w schemacie (b')} \quad (b^2)$$

$$Ra^{**} > Ra_{\max} \Rightarrow Ra^* + P = E_p + H_p + Ra^{**} \quad (c^2)$$

Strefa saturacji:

$$Ra^{**} \leq Ra_{\max} \Rightarrow \text{jak w schemacie (d')} \quad (d^2)$$

$$Ra > Ra_{\max} \Rightarrow Rs^* = H_g + Rs^{**} \quad (e^2)$$

Jak łatwo zauważyć, warunkiem wstępnym podanej procedury bilansowania jest średnia temperatura miesiąca. Jeżeli $t < 0$ i $Ra^{**} > Ra_{\max}$ przyjmujemy, iż nadwyżka retencji gromadzona jest na powierzchni w postaci retencji śnieżnej i nie bierze udziału w zasilaniu strefy saturacji ($F = 0$). W tym przypadku retencja końcowa może być wyższa od przyjętego maksimum na poziomie PPW.

Wyjaśnienia wymagają również schematy (b') i (c'). Jeżeli uzyskany z równania zapas wody w strefie aeracji na końcu miesiąca „i” jest mniejszy niż przyjęte minimum na poziomie ZPW, korygowana jest wielkość parowania terenowego (E_g) do takiego poziomu, aby $Ra^{**} = Ra_{\min}$. Stąd zapas wody w strefie aeracji na początku miesiąca „i + 1” wynosi $Ra_{\min}$. W przypadku (c'), tj. w sytuacji gdy obliczona retencja końcowa przekracza $Ra_{\max}$, nadwyżka kierowana jest do strefy saturacji w postaci przesiąkania (F). Założenia te korespondują z poglądami J. Ostromęckiego (1973) i C. Somorowskiego (1965) i występują często w bilansach zestawianych metodą Thornthwaite'a-Mathera (Castany 1972, Kaniecki 1982).

Krótkiego wyjaśnienia wymagają także zastosowane w opracowaniu metody szacowania składowych bilansu.

P – opad skorygowany dla zlewni Kręcicy. Miesięczne wskaźniki opadu dla okresu 1981–1985 otrzymano na podstawie danych z ośmiu posterunków opadowych działających w tym czasie na obszarze zlewni. Dla lat 1986–1989 posłużono się równaniem związku między opadem na obszar zlewni a wskaźnikiem rejestrowanym na jednym – działającym dotychczas – posterunku opadowym w Dobryszycach. Równanie ustalono na podstawie danych z okresu 1981–1985: $P_z = 0,9855 \cdot P_D - 1,08$; $R = 0,98$; $T_k = 29,64$; $B_s = 6,06$; (P_z – miesięczny opad w zlewni, P_D – miesięczny opad w Dobryszycach, R – współczynnik korelacji, T_k – test korelacji Studenta, B_s – błąd standardowy szacunku zmiennej zależnej). Korektę opadów przeprowadzono metodą proponowaną przez K. Chomicza (1976).

H_p , H_g – odpływ powierzchniowy i podziemny. Ocenę obu form odpływu wykonano metodą genetycznego podziału hydrogramu przyjmując, iż w odpływie powierzchniowym zawarty jest spływ po powierzchni i odpływ podpowierzchniowy.

t – średnia miesięczna temperatura w zlewni. Dla lat 1981–1985 dane pochodzą ze stacji w Dobryszycach. W okresie późniejszym wykorzystano bardzo silny związek temperatur rejestrowanych na stacjach w Dobryszycach i Kaszewicach. Współczynnik kierunkowy równania regresji jest bardzo bliski jedności, co przy współczynniku korelacji równym 0,999 świadczy o braku jakichkolwiek różnic termicznych między obiema stacjami i stwarza możliwość oceny temperatury w Dobryszycach na podstawie danych z Kaszewic.

E_p – parowanie terenowe. Miesięczne sumy parowania terenowego uzyskano stosując metodę Konstantinowa przystosowaną do warunków Polski przez K. Dębskiego (1970). Do obliczeń w latach 1981–1985 wykorzystano dane ze stacji Dobryszyc. Dla tego samego okresu ustalono związek między parowaniem obliczonym na podstawie danych z Dobryszyc i Kaszewic: $E_p(D) = 1,062 \cdot E_p(K) - 1,726$; $R = 0,99$; $T_k = 53,5$; $B_s = 3,13$; $E_p(D)$ – parowanie terenowe w Dobryszycach, $E_p(K)$ – parowanie terenowe w Kaszewicach, pozostałe oznaczenia jw. Na podstawie równania regresji i danych z Kaszewic obliczono parowanie terenowe w Dobryszycach dla okresu 1986–1989.

Bilansowanie „krok po kroku” wymagało jeszcze wprowadzenia warunków początkowych i brzegowych, a zatem oceny początkowego stanu retencji oraz maksymalnej i minimalnej retencji strefy aeracji. Liczbowa wartość retencji początkowej strefy saturacji z punktu widzenia metody nie jest istotna, ważna jest bowiem relacja między stanem początkowym i końcowym. Przyjęto zatem początkową retencję strefy saturacji na poziomie 1000 mm.

Innych założeń wymagała ocena $R_{a_{min}}$ i $R_{a_{max}}$. Na podstawie szacunków podanych przez J. Ostrómskiego (1973), wyników badań uwilgotnienia strefy aeracji zlewni Kręcicy (Jeż, Jokieli 1990), jak również na podstawie mapy litologicznej zlewni (Jokieli, Maksymiuk, Zawadzka 1985), określono średnią ważoną polową pojemność wodną 1-metrowej warstwy aeracji zlewni Kręcicy oraz uwilgotnienie punktu wędnięcia. Wartości te są odpowiednio równe: 210 mm i 72 mm. Przyjęto jednocześnie, iż $R_{a_{max}} = PPW$, natomiast $R_{a_{min}} = ZPW$.

Pierwszym miesiącem bilansowym był styczeń 1982 r. Po uprzednich znacznych opadach śnieżnych i temperaturze grudnia utrzymującej się poniżej zera, nastąpił okres intensywnych roztopów, których przejawem był kilkunastokrotny wzrost odpływu całkowitego w zlewni. Uznano zatem, że stan retencji warstwy aeracji zbliżony był do stanu pełnego nasycenia ($R_{a_{max}}$). Tę też wartość przyjęto jako retencję początkową dla następnego miesiąca. W listopadzie i grudniu 1981 r. bilans zestawiono wstecz.

ZESTAWIENIE BILANSU WODNEGO

Zamieszczona poniżej tab. 1 prezentuje wyniki przeprowadzonego bilansowania zasobów wodnych w zlewni Kręcicy. Pomijając szczegółową analizę poszczególnych składowych stwierdzić wypada, iż w przebiegu składowych klimatycznych (opad, parowanie) nie zaznaczają się żadne istotne tendencje, mające charakter zmian trwałych. Średni opad skorygowany dla okresu 1982–1989 wynosi 614 mm, przy rozstępie 563 mm (1989) do 658 mm (1987). Reprezentuje on zatem wartości typowe dla tej części Polski środkowej i jest zbliżony do średniej wieloletniej (Maksymiuk 1980, *Atlas hydrologiczny Polski*, 1986, Chomicz 1986).

Parowanie terenowe wyznaczone metodą Konstantinowa wynosiło średnio 478 mm, przy rozstępie od 433 mm (1985) do 508 mm (1989). Wartości te są również mocno zbliżone do obliczonych dla wielolecia (Maksymiuk 1980, *Atlas hydrologiczny Polski*, 1986).

W poprzednim rozdziale wskazano na istotną tendencję malejącą odpływu, a zwłaszcza odpływu podziemnego. Wskaźniki odpływu całkowitego dość wyraźnie maleją od 192,5 mm (1982) do 38,8 mm (1989). Podobną tendencję wykazuje odpływ podziemny od 109,4 mm w 1982 r. do poniżej 35 mm w 1989 r., z tym, że zaznacza się wtórne minimum w roku 1984 (29,3 mm), związane ze zgrupowaniem lat relatywnie suchych (1982, 1983, 1984). Warto również zauważyć, iż systematycznie malały współczynniki odpływu całkowitego i podziemnego: odpowiednio od około 30% i 15% na początku okresu bilansowego do 10% i 8% w latach 1988–1989. Zagadnienia te szczegółowo omówiono wcześniej, trzeba jednak podkreślić, iż wartości te znajdują się znacznie poniżej normy podawanej dla obszarów Polski środkowej – 30% i 10–15% (Stachy, Biernat, Dobrzyńska 1979, Maksymiuk 1980, *Atlas hydrologiczny Polski*, 1986).

Przebieg uwilgotnienia strefy aeracji nie wykazuje również istotnej tendencji rozwojowej. Z danych zamieszczonych w tab. 1 wynika, iż znaczące przyrosty uwilgotnienia wiążą się z półrociami chłodnymi, choć nie zawsze dotyczą miesięcy wiosennych. Wynika to oczywiście ze zróżnicowanej pory roztopów. Największą nadwyżkę uwilgotnienia strefy aeracji zanotowano w roku 1987, kiedy to do strefy saturacji przesiąknęło około 199 mm wody. Rok 1984 charakteryzował się natomiast zerową wilgotnością przesiąkania. Jesienią 1983 r. wystąpił niewielki deficyt uwilgotnienia strefy aeracji, niemniej uznać można, że w świetle przeprowadzonych analiz w badanym okresie uwilgotnienie strefy aeracji było dostateczne i dość korzystnie rozłożone w cyklu rocznym. Sprzyjały temu niewątpliwie pojawiające się często wysokie opady letnie i jesienne. Warto zauważyć, iż w badanym wieloleciu udział opadów półrocza ciepłego w sumie rocznej przekraczał często 60%, czyli wartość typową dla tego regionu Polski.

Tabela 1

Bilans wodny zlewni Kręcicy po wodowskaz Żaby
w okresie 1 XI 1981 – 31 X 1989 r. (mm)

Water balance for the Kręcica basin to river gauge in Żaby
(1 XI 1981 – 31 X 1989); units are: mm

Okres bilansowana		Ra*	P	H _p	E _p	E _s	Ra**	F	Rs*	H _g	Rs**
Rok hydro- logiczny	miesiąc										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1982	XI	97	56	2	11	–	140	–	1031	19	1012
	XII	140	94	18	6	–	210	–	1012	12	1000
	I	210	52	26	10	–	226	–	1000	11	989
	II	226	16	13	11	–	218	8	989	11	978
	III	210	5	3	33	–	179	–	978	13	973
	IV	179	29	1	35	–	172	–	973	11	962
	V	172	86	13	67	–	178	–	962	8	954
	VI	178	88	2	77	–	187	–	954	6	948
	VII	187	58	2	90	–	153	–	954	6	942
	VIII	153	75	2	72	–	154	–	942	3	939
1983	IX	154	16	1	56	–	113	–	939	5	934
	X	113	21	1	23	–	110	–	934	6	928
	XI	110	40	0	14	–	136	–	928	7	921
	XII	136	58	1	8	–	185	–	921	10	911
	I	185	77	5	13	–	210	34	911	12	933
	II	210	55	3	9	–	253	–	933	9	924
	III	253	73	9	31	–	210	76	924	12	988
	IV	210	29	1	57	–	181	–	988	8	980
	V	181	104	3	83	–	199	–	980	6	974
	VI	199	33	1	69	–	162	–	974	4	970
1984	VII	162	22	1	68	–	115	–	970	2	968
	VIII	115	39	0	66	–	88	–	968	2	966
	IX	88	23	0	47	39	72	–	966	2	964
	X	72	25	0	26	25	72	–	964	2	962
	XI	72	22	1	13	–	80	–	962	2	960
	XII	80	39	2	12	–	105	–	962	2	958
	I	105	38	3	13	–	127	–	958	4	954
	II	127	26	3	12	–	138	–	954	3	951
	III	138	35	0	24	–	149	–	951	2	949
	IV	149	28	2	44	–	131	–	949	3	946
1984	V	131	79	1	73	–	136	–	946	2	944
	VI	136	77	0	78	–	135	–	944	2	942
	VII	135	82	1	67	–	149	–	942	3	939
	VIII	149	11	0	72	–	88	–	939	2	937
	IX	88	141	2	35	–	192	–	937	2	935
	X	192	25	0	35	–	185	–	935	3	932

Tabela 1(cd.)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1985	XI	185	25	0	10	–	200	–	932	4	928
	XII	200	16	1	12	–	203	–	928	4	924
	I	203	28	0	3	–	228	–	924	2	922
	II	228	35	1	5	–	257	–	922	2	920
	III	257	38	14	24	–	210	47	920	7	960
	IV	210	39	4	44	–	201	–	960	6	954
	V	201	52	2	75	–	176	–	954	4	950
	VI	176	118	2	67	–	210	15	950	4	961
	VII	210	100	1	75	–	210	24	961	3	982
	VIII	210	149	7	64	–	210	78	982	7	1053
	IX	210	20	1	35	–	194	–	1053	5	1048
	X	194	23	0	16	–	201	–	1048	3	1045
1986	XI	201	29	0	11	–	210	9	1045	3	1051
	XII	210	81	4	12	–	210	65	1051	7	1109
	I	210	40	6	10	–	234	–	1109	10	1099
	II	234	15	2	5	–	242	–	1099	7	1092
	III	242	25	2	28	–	210	27	1092	8	1111
	IV	210	30	1	53	–	186	–	1111	8	1103
	V	186	79	1	70	–	194	–	1103	3	1100
	VI	194	66	1	79	–	180	–	1100	3	1097
	VII	180	57	1	76	–	160	–	1097	1	1096
	VIII	160	131	1	73	–	210	7	1096	2	1101
	IX	210	65	0	32	–	210	33	1101	4	1130
	X	210	38	1	28	–	210	9	1130	5	1134
1987	XI	210	28	0	15	–	210	13	1134	5	1142
	XII	210	88	1	9	–	288	–	1142	6	1136
	I	288	66	2	2	–	350	–	1136	9	1127
	II	350	19	6	13	–	350	–	1127	8	1119
	III	350	29	1	14	–	364	–	1119	8	1111
	IV	364	37	2	45	–	210	144	1111	8	1247
	V	210	64	0	57	–	210	7	1247	3	1251
	VI	210	86	2	84	–	210	–	1251	5	1246
	VII	210	74	0	84	–	200	–	1246	2	1244
	VIII	200	68	1	58	–	209	–	1244	3	1241
	IX	209	50	0	38	–	210	11	1241	3	1249
	X	210	48	0	24	–	210	24	1249	5	1268
1988	XI	210	57	1	12	–	210	44	1268	5	1307
	XII	210	59	2	9	–	210	48	1307	7	1348
	I	210	23	1	16	–	210	6	1348	8	1346
	II	210	45	1	16	–	210	28	1346	7	1367
	III	210	59	2	23	–	210	34	1367	9	1392
	IV	210	19	2	41	–	186	–	1392	5	1387
	V	186	50	0	66	–	170	–	1387	2	1385
	VI	170	117	2	86	–	199	–	1385	3	1382
	VII	199	60	0	89	–	170	–	1382	1	1381

Tabela 1(cd.)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	VIII	170	95	0	74	–	191	–	1 381	2	1 389
	IX	191	27	0	41	–	177	–	1 379	2	1 377
	X	177	7	0	30	–	154	–	1 377	3	1 374
1989	XI	154	54	1	7	–	200	–	1 374	4	1 370
	XII	200	89	2	9	–	210	68	1 370	7	1 431
	I	210	14	0	15	–	209	–	1 431	6	1 425
	II	209	19	0	26	–	202	–	1 425	5	1 420
	III	202	18	0	35	–	185	–	1 420	5	1 415
	IV	185	91	0	49	–	210	17	1 415	2	1 430
	V	210	25	0	60	–	175	–	1 430	1	1 429
	VI	175	87	0	79	–	183	–	1 429	2	1 427
	VII	183	69	0	70	–	182	–	1 427	1	1 426
	VIII	182	47	0	73	–	156	–	1 426	0	1 426
	XI	156	22	0	33	–	122	–	1 425	1	1 424

Bardzo interesująco rysuje się obraz zmian retencji strefy saturacji. O ile rok 1982 można uznać za normalny, z typowym spadkiem retencji, aż do minimum jesienno, o tyle już w roku 1983, mimo niewielkich opadów i parowania na poziomie nieco powyżej przeciętnej, nastąpił wyraźny przyrost retencji. Rok 1984 wskutek suszy atmosferycznej zaznaczył się pewnym spadkiem retencjonowanych zasobów, ale już od następnego roku pojawia się stała tendencja wzrostu stanu retencji w strefie saturacji. Maksimum wystąpiło w grudniu 1989 r., osiągając wartość 1431 mm. Zauważmy, że wzrost ten występuje równolegle z systematycznym spadkiem odpływu podziemnego i obniżaniem się zwierciadła wody podziemnej w całej zlewni, aż do zaniku niektórych poziomów. Skłania to do twierdzenia, że przyrost retencji w strefie saturacji, poczynając od roku 1983, ma charakter pozorny i został wymuszony przez rozwój leja depresyjnego KWB „Bełchatów”. Obniżenie zwierciadła wody poziomu międzymorenowego, a w północnej części zlewni równoczesny zanik poziomów wierzchówkowych, spowodował zawieszenie koryt cieków nad strefą wahań horyzontów wodonośnych i ucieczkę przesiąkającej wody poza hydrologicznie czynną strefę zlewni. Jeżeli dodamy do tego ucieczkę wód allochtonicznych bezpośrednio z koryta Kręcicy (dolny bieg rzeki), jasnym wydaje się, iż przyrost retencji ma charakter pozorny i wynika z drenującego oddziaływania kopalni.

Dane meteorologiczne wskazują, iż bilans teoretyczny winien być zrównoważony. Można zatem przyjąć, iż całość przyrostu retencji w okresie badanych 8 lat, czyli około 400 mm zostało szczerpane wskutek odwadniania kopalni. Daje to przeciętną 50 mm rocznie i potwierdza wcześniejsze wnioski (Jokiel, Maksymiuk 1986). Warto zauważyć, że średni 8-letni wskaźnik odpływu podziemnego zlewni Kręcicy wynosi 55 mm. Jeżeli

dodamy do tego ilość wody szcerpywanej wskutek odwodnienia (50 mm), otrzymamy wartość 105 mm bardzo zbliżoną do normy odpływu podziemnego charakterystycznej dla tej części Polski środkowej.

Graficzny obraz zmian retencji strefy saturacji ilustruje rys. 6. Wykres ten dobitnie wskazuje, że rok 1983 był swego rodzaju przełomem w sposobie funkcjonowania zlewni. Zauważmy również, że zastosowany model trendu ze składową sezonową dość precyzyjnie oddaje przebieg stanu retencji po roku 1984. Model opisuje funkcja postaci:

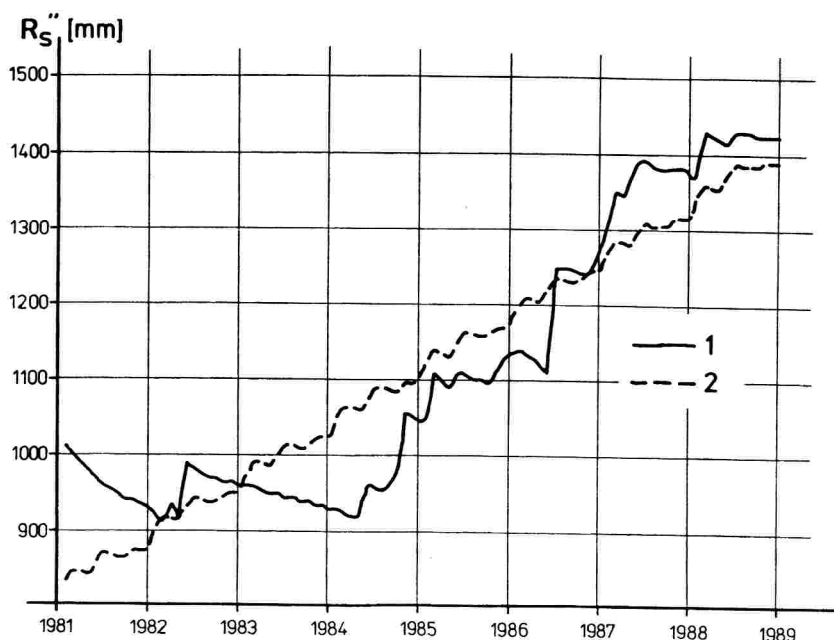
$$Rs^{**} = 6,111t + \sum_{k=1}^{12} a_{ok} q_{kt} + u_t \quad (7)$$

gdzie:

$$R^2 = 0,84,$$

$$Bs = 0,296,$$

$$a_{ok} = [1120; 1130; 1121; 1112; 1122; 1129; 1120; 1112; 1107; 1109; 1105; 1100].$$



Rys. 6. Wykres chronologiczny końcowych stanów retencji strefy saturacji
1 – wartości empiryczne, obliczone z równań bilansu; 2 – wartości teoretyczne

Fig. 6. Final values of retention in saturation zone

1 – empirical, 2 – simulated

Na zakończenie wypada podkreślić, że wszelkiego rodzaju prognozy bazujące na prostych ocenach trendów mogą przynieść rozczarowania. Przykładów można spotkać w literaturze wiele. Autorzy zwracają zatem uwagę, że prezentowane modele mają charakter statystyczny, posiadają więc wszelkie wady i ograniczenia właściwe hipotezom statystycznym, stąd prosta ekstrapolacja poza obszar materiału empirycznego może prowadzić niekiedy do ocen niezgodnych z fizyczną naturą procesów.

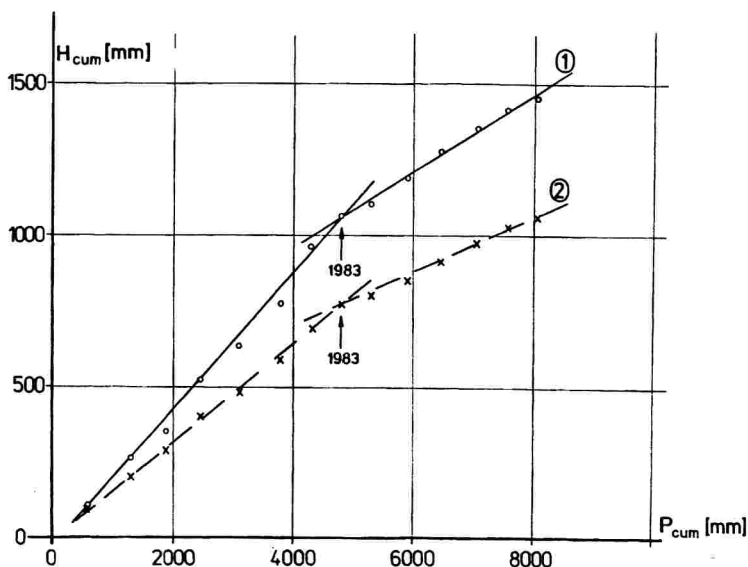
ZMIANY ODPIYU ZE ZLEWNI W OKRESIE 1976–1989

Systematyczne dane hydrometryczne z podstawowego wodowskazu w dorzeczu Kręcicy w Żabach datują się od 1975 r., a więc praktycznie od chwili rozpoczęcia odwadniania KWB „Bełchatów”. Większość dotychczasowych opracowań zmian stosunków wodnych w obrębie tej zlewni oparta była na materiałach własnych Zakładu Hydrologii i Gospodarki Wodnej UŁ, obejmujących okres od listopada 1981 r. do kwietnia 1985 r. Ich podstawowym celem, obok określenia kierunków i siły oddziaływania rozwijającego się leja depresyjnego, było uchwycenie przestrzennych różnic w obiegu wody w najbliższym sąsiedztwie kopalni. Z obszernej literatury wynika, że jakkolwiek wpływ leja depresyjnego w dolnej i środkowej części zlewni był zauważalny praktycznie od początku badań, to odpływ w części górnej w przeważającym stopniu był kształtowany przez czynniki naturalne.

Analiza zmian odpływu Kręcicy w latach 1976–1981 wykazała, że wpływ leja był jeszcze niezauważalny. Nie stwierdzono istotnej tendencji zarówno w odpływie podziemnym, jak i w odpływie powierzchniowym (Jeż 1983). W pracy tej postawiono również tezę, iż wpływ odwodnienia kopalni daje się zauważyć, gdy lej depresyjny obejmuje ponad 10% powierzchni zlewni.

Istniejąca obecnie już 14-letnia seria odpływów ze zlewni Kręcicy po Żaby skłoniła autorów do jej przeanalizowania pod kątem ustalenia momentu zakłócenia naturalnego obiegu wody. Do tego celu wykorzystano podwójne krzywe kumulacyjne rocznych opadów i odpływów (wykresy podwójnej masy), które zdaniem J. Dynowskiej, A. Jankowskiego i R. Soji (1985) są przydatne do określenia zmian wielkości odpływu spowodowanych antropopresją.

Skonstruowano dwie krzywe podwójnie kumulowane rocznych opadów i odpływów całkowitych oraz odpływów podziemnych (rys. 7). Oceny wpływu antropopresji na odpływ można dokonać przeprowadzając następujące rozumowanie. Jeżeli dwa zjawiska – opad i odpływ – wykazują jednokierunkową tendencję zmian i pozostają ze sobą w prostoliniowym związku regresyjnym, to zmiana tempa przyrostu lub spadku jednego z nich, w stosunku do tempa przyrostu lub spadku drugiego, jest wskazówką pojawienia się czynnika zakłócającego.



Rys. 7. Krzywe podwójne kumulowane rocznych opadów i wskaźników odpływu: 1 – całkowitego, 2 – podziemnego

Fig. 7. Double mass curves of annual precipitation and flow: 1 – total flow, 2 – groundwater flow

Z obydwu wykresów wynika, że do 1983 r. tempo zmian opadów i odpływów jest podobne. Po 1983 r. nastąpiła zmiana zależności opad – odpływ. Ponieważ z krzywej sumowej rocznych opadów w zlewni Kręcicy (nie zamieszczono jej w pracy) wynika, że nie nastąpiły istotne zmiany w zasilaniu zlewni, jedyną przyczyną zmiany nachylenia krzywych kumulacyjnych mogą być coraz mniejsze odpływy.

Powyższe rezultaty jeszcze raz dobitnie wskazują na 1983 r. jako moment zmiany mechanizmu obiegu wody w badanej zlewni. Naturalny układ stosunków opadowych, odpływu, strat i retencji, wynikający z przyrodniczych warunków obiegu wody, został zastąpiony układem stosunków wodnych będących wynikiem ukierunkowanej działalności człowieka. Odwodnienie złoża węgla brunatnego spowodowało obniżenie poziomów wód podziemnych i powstanie leja depresyjnego. Lej stopniowo rozwijał się i obejmował coraz większy obszar zlewni Kręcicy (od 8–9% w latach 1980–1982 do około 30% w 1990 r.) Prowadziło to do zmian w warunkach zasilania podziemnego i powierzchniowego cieków i pociągnęło za sobą infiltrację wody z koryt rzecznych. Większa część zlewni stała się bezodpływowa podziemnie i powierzchniowo.

UWAGI KOŃCOWE

Przedstawione w powyższym opracowaniu hydrologiczne skutki oddziaływania wielkiej inwestycji górniczej nie są zapewne ostateczne, zarówno z punktu widzenia ilościowego, jak i jakościowego. Badano bowiem jedynie wycinek obszaru objętego antropopresją, a i długość analizowanych serii pomiarowych była ograniczona. Mimo tych zastrzeżeń, wyprowadzone wnioski są jednoznaczne i dobitnie wskazują na kierunki i siłę przemian spowodowanych przez KWB „Bełchatów”. Trzeba wszakże podkreślić, iż proces przemian trwa nadal, a skutki jakie może wywołać nie zawsze dają się przewidzieć. W przyrodzie bowiem koincydencja wielu – z pozoru mało istotnych – zmian czy efektów wywołuje często poważne i trudne do przewidzenia skutki, niekoniecznie w dziedzinie, w której te drobne przemiany zachodzą.

W świetle przeprowadzonych badań należy stwierdzić, że zaistniałe zmiany w obiegu wody i bilansie wodnym zlewni Kręcicy mają charakter wielokierunkowy, choć wywodzą się z obniżenia stanu retencji wód podziemnych, poważnego ograniczenia podziemnego zasilania rzek i ucieczki wód podziemnych do strefy apotamicznej. Zanik stałego przepływu w ciekach, ucieczka wody z koryt, zanik mokradeł i „wypadanie” łąk przynosi z sobą wiele niekorzystnych skutków, poczynając od konieczności rozbudowania i przebudowania systemów melioracyjnych w zlewni, a kończąc na zmianach w sposobie gospodarowania na gruntach ornych. Nie wolno również pominąć zmian w ekosystemach, w tym zaniku niektórych gatunków roślin i zwierząt.

Warto podkreślić, iż stosunki wodne, podobnie jak warunki klimatyczne, należą do tych składników środowiska, które z uwagi na swą dynamikę są najbardziej podatne na oddziaływanie gospodarki człowieka. Jednocześnie skutki tych zmian są najszybciej odczuwane w całym środowisku geograficznym. Napis na starej studni w rumuńskim mieście Jassy: brzmi „Nieprzyjacielu, jeżeli zdobędziesz miasto nie niszczy tej studni. Pamiętaj, że woda z niej może przydać się również Tobie”. Myśl ta winna naszym zdaniem towarzyszyć wszelkim działaniom inwestycyjnym, jakie w przyszłości podjęte zostaną w Polsce.

Trzeba także zwrócić uwagę, że w niedalekiej przyszłości intensywność odwadniania złoże poważnie zmaleje, aż do całkowitego zaniku. W związku z tym nastąpić powinna stopniowa odbudowa zasobów wodnych zlewni Kręcicy. Proces „powrotu” zlewni do normalnego cyklu hydrologicznego jest w ocenie autorów równie interesujący jak proces antropogenizacji i może przynieść wiele ciekawych wniosków naukowych i praktycznych. Istnieje więc konieczność dalszego prowadzenia badań na tym terenie. Nie wolno bowiem zatracić tak rzadko pojawiającej się szansy prześledzenia pełnego cyklu przemian antropogennych w zlewni.

LITERATURA

- Atlas hydrologiczny Polski*, 1986, Wyd. Geol., Warszawa.
- Baraniecka M. D., Sarnacka Z., 1971, *Stratygrafia czwartorzędu i paleogeografia dorzecza Widawki*. Inst. Geol., Biul., 254.
- Bartosiewicz S., 1989, *Ekonometria*. PWE, Warszawa.
- Biernat S., 1971, *Budowa geologiczna i ukształtowanie podłoża kenozoiku w rejonie Bełchatowa*. Inst. Geol., Biul., 254.
- Błaszkiwicz A., Cieśliński S., Dąbrowska Z., Karczewski Ł., Kopik J., Malinowska L., 1968, *Zarys stratygrafii i tektoniki południowej części niecki łódzkiej (rejon Bełchatowa)*. Kwart. Geol., 12.
- Burchard J., Jokiel P., 1984, *Warunki infiltracji wód opadowych w małej zlewni na obszarze Bełchatowskiego Okręgu Przemysłowego*. Stud. Reg., 7–8.
- Castany G., 1972, *Poszukiwanie i eksploatacja wód podziemnych*. Wyd. Geol., Warszawa.
- Chomicz K., 1976, *Opady rzeczywiste w Polsce (1931–1960)*. Przegl. Geofiz., 1.
- Dębski K., 1970, *Hydrologia*. Arkady, Warszawa.
- Domosławska-Baraniecka M. D., Skompski S., 1967, *Deglacjacja lobu Widawki*. Kwart. Geol., 11.
- Dubaniewicz H., Zawadzka A., 1985, *Główne cechy klimatu Bełchatowskiego Okręgu Przemysłowego*. [W:] *Zmiany w środowisku przyszłego BOP. Stan z okresu przedinwestycyjnego i wstępnej fazy pracy elektrowni*, PWN, Warszawa–Łódź.
- Dynowska I., Janowski A. T., Soja R., 1985, *Metody oceny wpływu gospodarczej działalności człowieka na odpływ*. Folia Geogr., Ser. geogr. phys., Kraków, 17.
- Jeż G., 1983, *Zmiany odpływu rzek regionu bełchatowskiego w latach 1976–1981*. Maszynopis w Zakł. Hydrologii i Gospodarki Wodnej UŁ.
- Jeż G., Jokiel P., 1990, *Uwilgotnienie warstwy aeracji małej zlewni z obszaru BOP w aspekcie warunków środowiskowych*. Wyd. UŁ, Łódź.
- Jokiel P., Maksymiuk Z., 1986, *Trendy odpływu i stanów wód podziemnych w zlewni Kręcicy*. [W:] *II Zjazd Geografów Polskich*. Wyd. UŁ, Łódź.
- Jokiel P., Maksymiuk Z., 1988, *Wpływ kopalni odkrywkowej „Bełchatów” na zmiany odpływu*. Dok. Geogr., 4.
- Jokiel P., Maksymiuk Z., Zawadzka A., 1985, *Obieg wody w małej zlewni na obszarze BOP*. Maszynopis w Zakł. Hydrologii i Gospodarki Wodnej UŁ.
- Kaniecki A., 1982, *Pojemność retencyjna i zmienność zasobów wodnych małej zlewni nizinnej (na przykładzie dorzecza Wrześnicy)*. Wyd. UAM, Ser. geogr., 26.
- Krzemiński T., 1974, *Geneza młodoplejstoczeńskiej rzeźby glacialnej w dorzeczu środkowej Warty*. Acta Geogr. Lodz., 33.
- Maksymiuk Z., 1980, *Formy alimentacji rzek i ich rola w bilansie wodnym na przykładzie dorzecza Widawki*. Acta Geogr. Lodz., 42.
- Maksymiuk Z., Moszczyńska J., 1981, *Zmiany hydrologiczne w obszarze oddziaływania KWB „Bełchatów”*. [W:] *Wpływ działalności gospodarczej na stosunki wodne regionu łódzkiego. Materiały IX Ogólnopolskiej Konferencji Hydrograficznej Łódź 28–29 IX 1981*. Wyd. UŁ, Łódź.
- Ostromięcki J., 1973, *Podstawy melioracji nawadniających*. PWN, Warszawa.
- Somorowski C., 1965, *Zasoby wilgoci gruntowej w bilansie wodnym zlewni rzecznych*. Wyd. SGGW–AR, 6.

- Stachy J., Biernat B., Dobrzyńska I., 1979, *Odptyw rzek polskich w latach 1951–1980*. Mat. Bad. IMGW, 6.
- Zieliński Z., 1979, *Metody analizy dynamiki i rytmiczności zjawisk gospodarczych*. PWN, Warszawa.

Instytut Geografii Fizycznej
i Kształtowania Środowiska
Uniwersytetu Łódzkiego

Artykuł złożono do druku w 1993 r.

SUMMARY

Research on hydrological changes caused by man has been carried out in the Kręcica basin ($A = 62$ sq km), situated in the Bełchatów region (Fig. 1). Three river gauges, a meteorological station, 8 precipitation stations and 9 groundwater observation wells were established within the study area. Hydrometeorological observations and measurements were carried out regularly and the groundwater level was checked once a week. In addition to basic hydrometeorological monitoring, the study involved: annual hydrographic mapping, preparation of lithological map with hydrogeological sections, regular flow rate measurement, examination of ground permeability and moisture.

The main aim of the study was to grasp moment of the changes in hydrological characteristics, especially of hydrographic network, groundwater and discharge. The research led to the establishment of a formula of water balance of a basin disturbed by man.

The basic aim of the formula, was to pinpoint in water retention following the development of a cone of depression created by the brown coal mine in Bełchatów. The analyses presented in this paper indicate, that the changes are quantitative and concern retention in saturation zone and groundwater flow (Tab. 1). The result also revealed the moment when a radical disturbance of the natural hydrological cycle in the study area occurred.

Analyses of climatological features (precipitation, evapotranspiration) have not indicated significant permanent changes. However a significant reduction has been identified when discharge, in particular groundwater discharge (Fig. 4) and a discharge coefficient (Fig. 5) were considered. Explicit changes of retention in saturation zone have also been found (Fig. 6). The results show that the 1983 was crucial in the functioning of the basin. This conclusion has been confirmed by doubly mass curves of annual precipitation and total flow and groundwater flow (Fig. 7). It has been found that decrease in flow caused changes of inclination of the curves.

Natural structure precipitation, flow water losses and retention have been replaced by a pattern created by intentional human activity. The mine drainage, has led to the lowering of groundwater levels and to the development of cone of depression. The cone of depression is increasing gradually and comprises a growing part of the Kręcica basin (8–9% in 1980–1982, 30% in 1990). It has led to changes of ground and surface alimentation of watercourses and has caused water escape from river channels. Most of the study area has become one without surface and groundwater flow.

The hydrological changes caused by the mining enterprise, and presented here, are certainly not complete. It should be stressed that the changes are continuing and although their direction is known, the effects cannot be predicted accurately.