

Wielkość infiltracji w strefie aeracji rozwinętej na skałach krystalicznych Sudetów i Przedgórza Sudeckiego

Sylwester Kraśnicki¹



Infiltration rate within vadose zone developed on crystalline rocks in the Sudety Mountains and their Foreland.
Prz. Geol., 58: 146–153.

A b s t r a c t. The paper presents results of studies on groundwater recharge in the Sudety Mountains and their Foreland in hydrological years 2004–2006. Five locations were selected for detailed study with the aid of lysimeters installed permanently in the ground. The recorded infiltration was compared with precipitation and other hitherto gathered data. Precipitation data for the period from January 2004 to July 2005 were provided by the Institute of Meteorology and Water Management. The studies showed large variability of infiltration time series and water infiltration mainly in colder half of the year (November to April) in some of sampling points and rates of infiltration more or less equal throughout the whole year in other points. The obtained data show infiltration values to be higher in the Sudety Mountains than in their Foreland. The studies indicate decisive influence of climatic factors such as precipitation and mean annual temperature, on infiltration rates in this region.

Keywords: infiltration, vadose zone, Sudety Mountains and Foreland, crystalline rocks

Infiltracja wód opadowych w strefie aeracji jest ważnym procesem i elementem obiegu wody w przyrodzie. Zasilanie płytkich wód podziemnych odbywa się w głównej mierze tą drogą i proces ten ma istotny wpływ na kształtowanie się zasobów wód podziemnych. Ponadto wody infiltrujące przenoszą zanieczyszczenia, a między innymi od wielkości infiltracji zależy prędkość migracji zanieczyszczeń, jak i wielkość ich ładunku wnoszonego do wód podziemnych. Masywy górskie są obszarami o wyższej infiltracji niż otaczające je niżej położone obszary, z racji niższej średniej temperatury rocznej i wyższych opadów. Strefa aeracji obszarów górskich ma na ogół niewielką miąższość, co sprawia że zasoby wodne w skałach krystalicznych są szczególnie narażone na zanieczyszczenie (Duda i in., 2005).

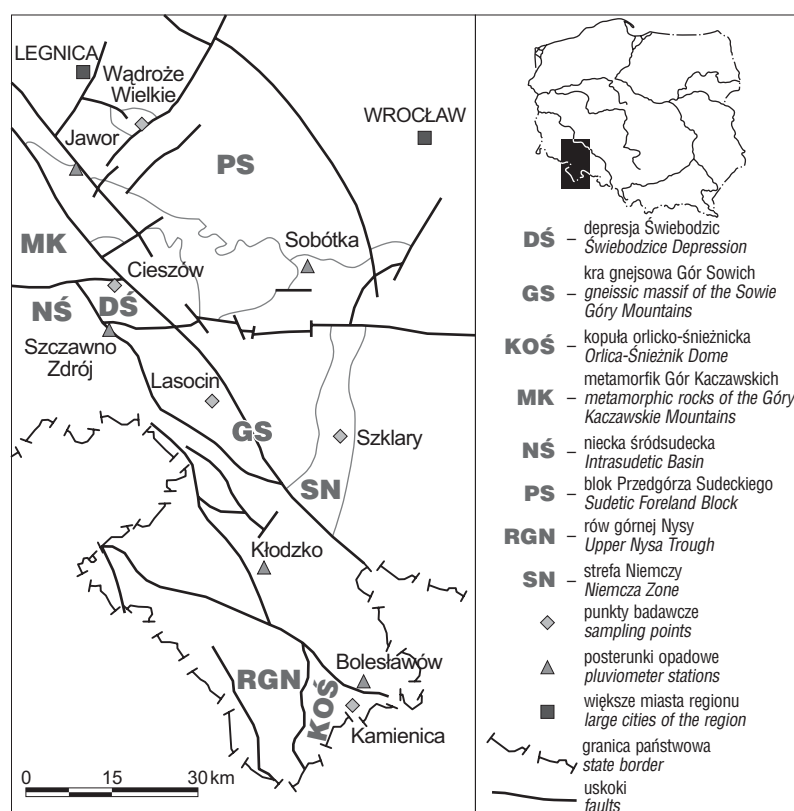
Celem tej publikacji jest opisanie wyników badań wielkości infiltracji prowadzonych przez autora w latach 2003–2006 na obszarze Sudetów i Przedgórza Sudeckiego oraz porównanie ich z wynikami osiągniętymi wcześniej przez innych badaczy na tym obszarze (Gregorczyk & Sawicki, 1992; Staśko, 1996; Paluch, 1997; Tarka, 1997; Staśko & Tarka, 2002).

Obszar i metody badawcze

W celu zbadania zależności wielkości infiltracji od wysokości nad poziomem morza założono punkty badawcze na Przedgórzu Sudeckim i kontynuowano badania na wcześniej założonych punktach w Sudetach. Zlokalizowano je w następujących miejscowościach: Wądroże Wielkie (blok Przedgórze Sudeckiego), Szklary (strefa Niemczy), Cieszów (depresja Świebodzic), Lasocin

(kra gnejsowa Gór Sowich) i Kamienica (kopuła orlicko-śnieżnicka) (ryc. 1, 2).

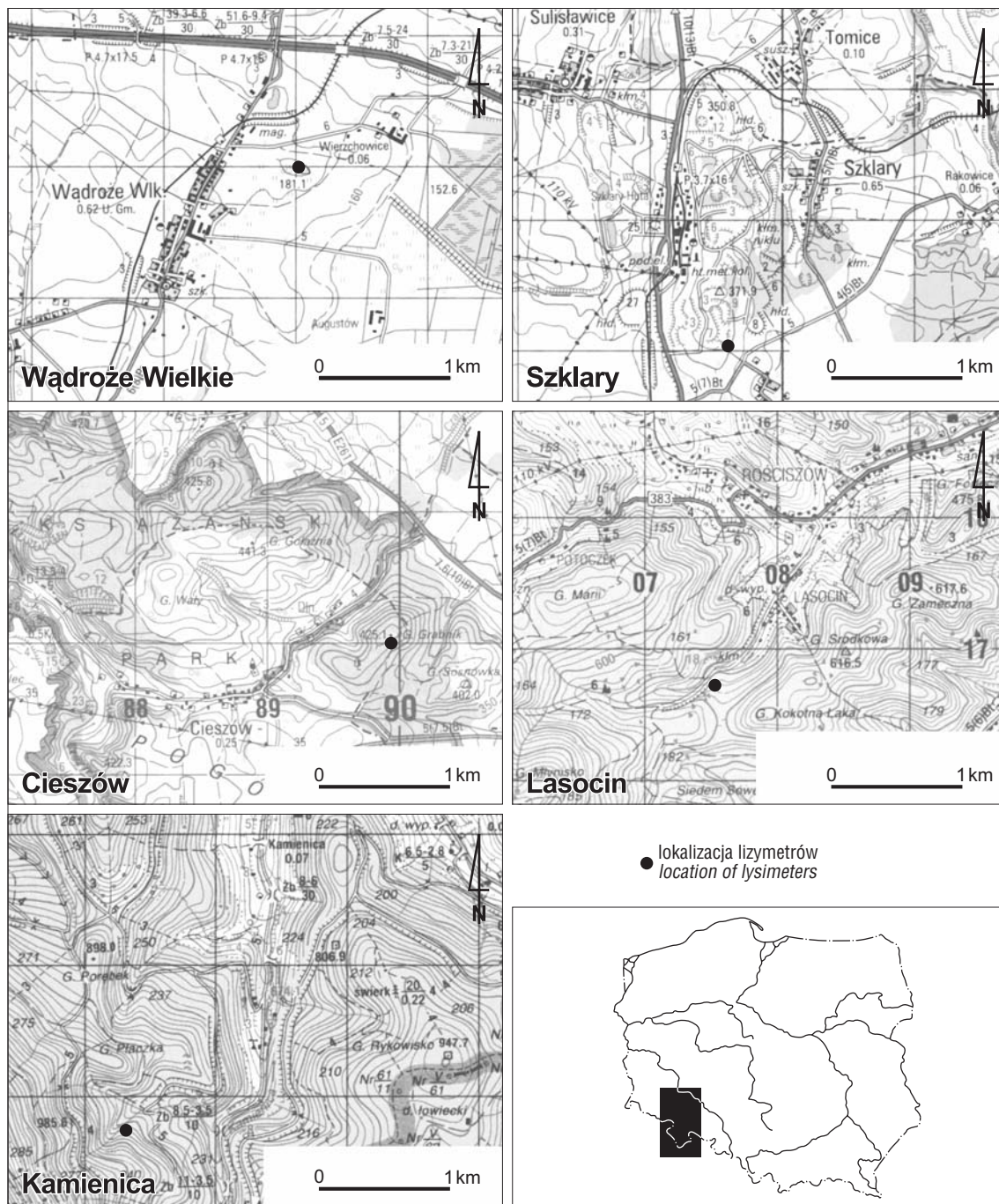
Podczas wyboru lokalizacji punktów badawczych kierowano się zróżnicowaniem warunków klimatycznych (opad, średnia temperatura) mających istotne znaczenie dla wielkości infiltracji. Skały krystaliczne zostały wybrane, dlatego że ich wystąpienia zajmują około 50% powierzchni polskiej części Sudetów. Aby zminimalizować



Ryc. 1. Obszar badań (jednostki geologiczne wg Dadleza i in., 2000)

Fig. 1. Location of the studied area (geological units after Dadlez et al., 2000)

¹Wydział Techniczno-Ekonomiczny, Wyższa Szkoła Humanistyczna we Wrocławiu, ul. Stabłowicka 95, 54-062 Wrocław; ksw5@wp.pl



Ryc. 2. Lokalizacja lizymetrów w terenie
Fig. 2. Location of lysimeters

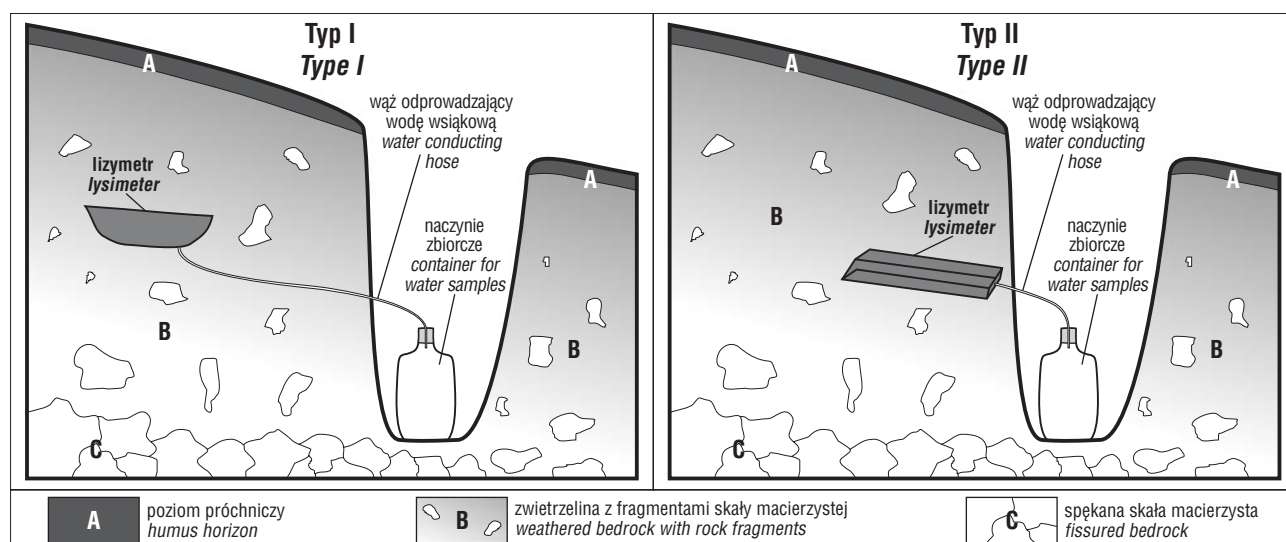
oddziaływanie antropogeniczne, urządzenia pomiarowe (lizymetry) były zakładane wysoko na stokach bądź na grzbietach gór, zawsze powyżej pól uprawnych, gospodarstw rolnych oraz dzikich wysypisk śmieci.

Badania terenowe rozpoczęto w 2003 r. w Szklarach (Wzgórza Niemczańsko-Strzelińskie) i w Lasocinie (Góry Sowie), przy czym w Lasocinie wykorzystano wcześniej zainstalowany lizymetr. Oddanie różnorodności warunków wymagało jednak decyzji o rozszerzeniu badań na nowe obszary. Zainstalowano więc lizymetry w Cieszowie i w Wądrożu Wielkim oraz kontynuowano badania w Kamienicy we wcześniej założonym lizymetrze.

W celu dokonania analizy porównawczej infiltracji z opadem oparto się na danych o wielkości opadu całkowitego w okresie od stycznia 2004 r. do lipca 2005 r., uzyska-

nych w ramach Monitoringu Dorzecza Środkowej Odry, prowadzonego przez Wrocławski Oddział Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Uzyskano dane z następujących posterunków: Jawor (195 m n.p.m.), Sobótka (175 m n.p.m.), Kłodzko (356 m n.p.m.), Szczawno Zdrój (415 m n.p.m.) oraz Bolesławów (600 m n.p.m.) (Twarowski i in., 2004, 2005).

Urządzeniami przechwytyjącymi wody wolne, przemieszczające się grawitacyjnie w strefie aeracji są lizymetry. Są to naczynia metalowe lub z tworzywa sztucznego, zainstalowane na stałe w gruncie. Z uwagi na duże trudności techniczne instalacja tych urządzeń odbywała się z naruszeniem struktury gruntu. Same lizymetry na powierzchni zostały przykryte darnią bądź ściółką. Infiltrujące wody były odprowadzane do naczynia zbiorczego



Ryc. 3. Typy zainstalowanych lizymetrów
Fig. 3. Types of the installed lysimeters

za pomocą węża z tworzywa sztucznego, szczelnie połączonego zarówno z lizymetrem, jak i z naczyniem zbiorczym, aby zminimalizować straty wynikające z parowania z powierzchni próbki wody. Naczynie zbiorcze znajdowało się na dnie szybiku wykopanego obok lizymetru, poniżej poziomu samego lizymetru (ryc. 3). Na omawianym obszarze instalowane były dwa typy lizymetrów: okrągłe naczynia z odprowadzeniem wody do znaj-

dującego się 1–2 m w dół stoku naczynia zbiorczego (Lasocin, Kamienica, Cieszów) oraz kwadratowe płaskie płyty z tworzywa sztucznego z podniesionymi krawędziami oraz ze szczelnym połączeniem z węzłem odprowadzającym (Wądroże Wielkie, Szklary). Szczegółowe informacje na temat parametrów technicznych lizymetrów oraz miejsc, w których zostały zainstalowane, są prezentowane w tabelach 1 i 2.

Tab. 1. Parametry techniczne zainstalowanych lizymetrów
Table 1. Technical parameters of the installed lysimeters

Punkt badawczy <i>Sampling point</i>	Rok instalacji <i>Year of installation</i>	Głębokość instalacji [cm] <i>Installation depth [cm]</i>	Powierzchnia przechwytyjąca wody wsiąkowej [cm ²] <i>Water intercepting surface [cm²]</i>
Wądroże Wielkie	IV 2005	85	4761
Szklary	XI 2003	90	4761
Cieszów	IX 2004	80	594
Lasocin	1993	90	1047
Kamienica	1992	90	1213

Tab. 2. Charakterystyka punktów badawczych
Table 2. Characteristics of the sampling points

Punkt badawczy <i>Sampling point</i>	Wysokość [m n.p.m.] <i>Altitude [m a.s.l.]</i>	Wykształcenie litologiczne skały macierzystej i utworów strefy aeracji <i>Lithology of bedrock and weathered cover</i>	Morfologia i szata roślinna <i>Morphology and plant cover</i>
Wądroże Wielkie	182	piasek gliniasty, loamy sand gnejsy Wądroża Wielkiego <i>Wądroże Wielkie gneisses</i>	szczyt wzgórza porośniętego robinia akacjową <i>top of a hill overgrown by Robinia pseudoacacia</i>
Szklary	365	piasek gliniasty, loamy sand serpentytyny, serpentinites	łąka na południowym stoku Szklanej Góry <i>grassland on the southern slope of Szklana Góra</i>
Cieszów	420	piasek pylasty, loamy sand diabazy, diabases	szczyt wzgórza Grabnik porośnięty lasem dębowym <i>top of Grabnik overgrown by oak forest</i>
Lasocin	520	piasek drobnoziarnisty, fine-grained sand paragnejsy i migmatyty <i>paragneisses and migmatites</i>	Stromo nachylony stok ku N, porośnięty lasem świerkowym <i>Steep northern slope overgrown by spruce forest</i>
Kamienica	855	piasek drobnoziarnisty, fine-grained sand gnejsy śnieżnicke, Śnieżnik gneisses	Stromo nachylony stok ku NW, porośnięty lasem świerkowym <i>Steep northwestern slope overgrown by spruce forest</i>

Próbki wód infiltrujących były pobierane w odstępach 1–2 miesięcznych. Ponadto pojawiały się trudności w dotarciu do lizymetru w Kamienicy w półroczu chłodnym, spowodowane zaleganiem warstwy śniegu o znacznej miąższości (do 140 cm).

Dla porównania wielkości infiltracji z opadem w niektórych punktach badawczych stało się konieczne obliczenie wielkości opadu na wysokości, na której położony był lizymetr. Wykorzystano w tym celu metodę hipsometryczną oraz gradienty opadowe w Sudetach (Wójtowicz, 1966). Przyjęto, że gradient półroczny w Sudetach wynosi 30 mm opadu na 100 m wysokości, a gradient roczny 60 mm opadu na 100 m wysokości. Do wyznaczenia opadu dla Szklar wykorzystano dane z Sobótki, dla Lasocina ze Szczawna Zdroju, a dla Kamienicy z Bolesławowa. Dla Wądroża Wielkiego i Cieszowa przyjmowano opad odpowiednio z Jawora i Szczawna Zdroju, ponieważ różnica wysokości nad poziomem morza pomiędzy punktem badawczym i posterunkiem opadowym jest niewielka i nie przekracza kilkunastu metrów.

Wyniki badań

Z danych zilustrowanych na rycinie 4 wynika, że większość wód infiltruje w półroczu chłodnym roku hydrologicznego (1 listopada–30 kwietnia). Jedynie w Wądrożu Wielkim wielkość infiltracji w obu półroczach jest zbliżona do siebie. Największą dysproporcję stwierdzono w Szklarach i Kamienicy. Na tych posterunkach infiltracja półrocza chłodnego była 5–7-krotnie wyższa od infiltracji w półroczu ciepłym (1 maja–31 października). Podobna asymetria infiltracji ma miejsce również w Lasocinie, ale jest mniej intensywna. W tym punkcie badawczym w półroczu chłodnym infiltrowało o 10–20% więcej wody niż w półroczu ciepłym. Wyraźnie niższa infiltracja w półroczu chłodnym 2006 r. (1 listopada 2005–30 kwietnia 2006 r.) w Szklarach i Kamienicy była spowodowana długim okresem bez infiltracji. W Szklarach rozpoczął się on we wrześniu i trwał do grudnia 2005 r., a w Kamienicy rozpoczął się on również we wrześniu, ale skończył się dopiero w kwietniu 2006 r.

Infiltracja jest parametrem o dużej zmienności w okresie dłuższym od roku. Szczególnie widoczne jest to

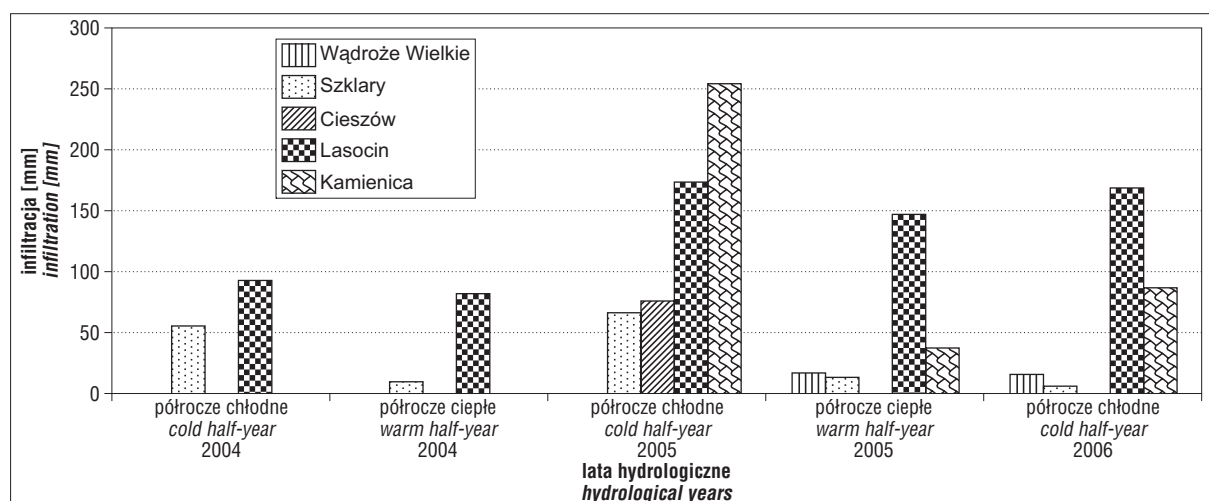
w Lasocinie, gdzie infiltracja w 2005 r. była prawie dwukrotnie wyższa niż w roku poprzednim (odpowiednio 319,8 mm i 174,8 mm). Za niższą infiltrację w 2004 r. odpowiadają długie okresy o niskiej infiltracji: 0,5 mm od listopada 2003 r. do stycznia 2004 r. i 1,6 mm od maja do sierpnia 2004 r. Również okresów o wysokiej infiltracji, rzędu kilkudziesięciu milimetrów miesięcznie, było mniej w porównaniu z następnym rokiem.

Kolejną istotną cechą infiltracji w rozpatrywanym okresie jest jej zależność od wysokości punktu badawczego. Generalnie zauważalny jest wzrost infiltracji wraz ze wzrostem wysokości punktu pomiarowego nad poziomem morza. Może być on jednak silnie modyfikowany w różnych okresach, jak chociażby w półroczu ciepłym 2005 r., kiedy infiltracja w Wądrożu Wielkim była wyższa od infiltracji w Szklarach, które są położone dwukrotnie wyżej nad poziomem morza, czy w Lasocinie, gdzie infiltrowało prawie czterokrotnie więcej wody aniżeli w Kamienicy, położonej ponad 300 m wyżej niż Lasocin. Podobna sytuacja powtórzyła się w półroczu chłodnym 2006 r. Odpowiedzialne za to są wspomniane już długie okresy bez infiltracji w Szklarach i Kamienicy. Mimo to widać, że zasilanie w obszarach górskich Sudetów (Lasocin i Kamienica) jest wyższe niż na przyległych obszarach Pogórza Wałbrzyskiego (Cieszów) czy Przedgórze Sudeckiego (Wądroże Wielkie, Szklary).

Wielkość infiltracji w stosunku do wielkości opadu prezentuje tabela 3. W odróżnieniu od infiltracji opad rozłożony jest bardziej równomiernie w poszczególnych półroczach roku hydrologicznego. W 2004 r. opady półrocza ciepłego były wyższe od opadów półrocza chłodnego. Również zmienność tego parametru jest niższa w okresach wieloletnich, co potwierdzają dane archiwalne z roczników opadowych (Twarowski i in., 2004, 2005).

Podobnie jak infiltracja, opad również wzrasta wraz z wysokością. Również tutaj jest widoczny wpływ czynników regionalnych modyfikujących ten trend.

Wskaźnik infiltracji, podobnie jak infiltracja, jest wyższy dla półrocza chłodnego. Dla półrocza chłodnego może on osiągać wartości wyższe o jeden rząd wielkości, jak ma to miejsce w Szklarach, albo tylko nieznacznie przewyższać wskaźnik infiltracji w półroczu ciepłym, jak w Lasocinie. Wykazuje on również dużą zmienność w okresach



Ryc. 4. Wielkość infiltracji w milimetrach słupa wody zanotowana na stanowiskach badawczych w latach hydrologicznych 2004–2006

Fig. 4. Infiltration values expressed in millimeters of a water column as recorded in the sampling points in the hydrological years 2004 to 2006

Tab. 3. Porównanie wielkości infiltracji do wielkości opadu i współczynnika infiltracji w latach hydrologicznych 2004–2005 (wg *Twarowskiego i in., 2004, 2005 oraz badania własne)

Table 3. Comparison of infiltration rate and precipitation and infiltration coefficient in hydrological years 2004 and 2005 (after *Twarowski et al., 2004, 2005 and author's results)

Punkt badawczy Sampling point	Wysokość [m n.p.m.] Altitude [m a.s.l.]	Parametr Parameter	Półrocze chłodne 2004 Cold half-year 2004	Półrocze ciepłe 2004 Warm half-year 2004	Rok 2004 Year 2004	Półrocze chłodne 2005 Cold half-year 2005
Szklary	365	Opad [mm]* Precipitation [mm]*	286,8	395,2	682,0	299,9
		Infiltracja [mm] Infiltration [mm]	55,0	9,9	64,9	65,7
		Wskaźnik infiltracji [%] Infiltration coefficient [%]	19,2	2,5	9,5	21,9
Cieszów	420	Opad [mm]* Precipitation [mm]*	–	–	–	318,0
		Infiltracja [mm] Infiltration [mm]	–	–	–	75,4
		Wskaźnik infiltracji [%] Infiltration coefficient [%]	–	–	–	23,7
Lasocin	520	Opad [mm]* Precipitation [mm]*	350,9	356,2	707,1	349,5
		Infiltracja [mm] Infiltration [mm]	92,8	82,0	174,8	173,1
		Wskaźnik infiltracji [%] Infiltration coefficient [%]	26,4	23,0	24,7	49,5
Kamienica	855	Opad [mm]* Precipitation [mm]*	–	–	–	444,0
		Infiltracja [mm] Infiltration [mm]	–	–	–	254,3
		Wskaźnik infiltracji [%] Infiltration coefficient [%]	–	–	–	57,3

dłuższych od roku. W Górach Sowich (Lasocin) osiągnął on prawie dwukrotnie wyższą wartość dla półrocza chłodnego 2005 r. niż dla analogicznego półrocza z poprzedniego roku.

Zależności obliczonej wielkości opadu i infiltracji od wysokości nad poziomem morza w półroczu chłodnym 2005 r. są zbliżone do liniowych (ryc. 5). Wyraźnie wyższy jest tutaj gradient wzrostu infiltracji (39 mm na 100 m) od gradientu wzrostu opadu (29 mm na 100 m). O ile wartość gradientu opadowego jest zbliżona do podawanej przez Wójtowicza (1966) (30 mm na 100 m) i można wartość tę uznać za wiarygodną, o tyle wartość gradientu infiltracji ma tutaj znaczenie orientacyjne ze względu na dużą zmienność tego parametru w poszczególnych latach i odpowiadających im półroczach.

Dyskusja

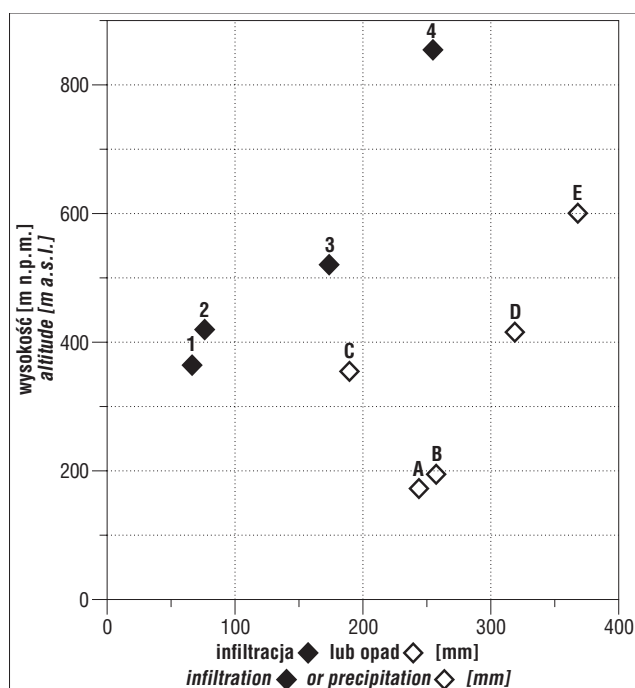
W strefie aeracji infiltracja jest kształtowana przez czynniki hydrogeologiczne oraz meteorologiczne. Na wielkość infiltracji ma wpływ wielkość opadu, wilgotność gruntu, temperatura powietrza i gruntu, a w mniejszym stopniu prędkość wiatru. Ewaporacja oraz transpiracja to główne czynniki klimatyczne ograniczające wielkość infiltracji wód opadowych. Najistotniejszym czynnikiem hydrogeologicznym jest współczynnik filtracji utworów, z których jest zbudowana strefa aeracji.

Przedstawione przez autora wyniki badań wielkości infiltracji oraz jej stosunku do wielkości opadów potwierdzają rezultaty uzyskane wcześniej na tym terenie przez

innych badaczy. Zjawisko infiltracji było poprzednio badane w latach 90. XX w. w Lasocinie (Góry Sowie) i Kamienicy (Masyw Śnieżnika). Wyniki uzyskane z Masywu Śnieżnika, otrzymane przez Tarkę (1997) oraz Staśkę (1996), wykazały, że większość wód infiltruje w półroczu chłodnym roku hydrologicznego, ale tendencja ta staje się coraz mniej wyrazista wraz ze wzrostem wysokości nad poziomem morza. Wykazano również, że infiltracja jest procesem bardziej zmiennym aniżeli opad, zarówno w skali roku, jak i wielolecia. W lizymetrze położonym przy sztolni na wysokości 855 m n.p.m. kontynuowano badania infiltracji od 1997 r. do 2002 r. (Staśko & Tarka, 2001, 2002). W ich trakcie ustalono, że główny impuls infiltracyjny zachodzi w marcu–kwietniu i w miesiącach letnich.

Badania własne wykazały, że w okresie 2003–2006 główny impuls infiltracyjny zachodził na wszystkich posterunkach pod koniec półrocza chłodnego, wraz z topnieniem śniegu, a dla pozostałej części roku zależności nie są jednoznaczne. Z kolei okresy o niskiej infiltracji lub jej braku we wszystkich punktach badawczych autora to wrzesień i październik. Długi okres badań wielkości infiltracji w lizymetrze w Kamienicy pozwala na zestawienie wyników otrzymanych w różnych okresach (tab. 4).

W Kamienicy opady półrocza ciepłego były wyższe niż w półroczu chłodnym, z kolei infiltracja była wyższa w półroczu chłodnym. Oba te parametry mają niższą zmienność w półroczu chłodnym, ale wielkość infiltracji jest bardziej zróżnicowana od wielkości opadu. Rzutuje to na wielkość wskaźnika infiltracji, z którego wynika, że w badanym



Ryc. 5. Zależność wielkości opadu oraz infiltracji od rzędnej punktu badawczego w półroczu chłodnym 2005 r.: 1 — Szklary; 2 — Cieszów; 3 — Lasocin; 4 — Kamienica; A — Sobótka; B — Jawor; C — Kłodzko; D — Szczawno Zdrój; E — Bolesławów (wielkości opadu wg Twarowskiego i in., 2004, 2005)

Fig. 5. Relationship between precipitation or infiltration and altitude of a sampling point in cold hydrological half-year 2005: 1 — Szklary; 2 — Cieszów; 3 — Lasocin; 4 — Kamienica; A — Sobótka; B — Jawor; C — Kłodzko; D — Szczawno Zdrój; E — Bolesławów (precipitation data after Twarowski et al., 2004, 2005)

okresie większa część wód infiltruje w półroczu chłodnym (19,0–94,5%), a mniejsza część w letnim (2,9–20,9%). Wyniki uzyskane przez autora mieszczą się w spektrum wartości uzyskanych wcześniej (Tarka, 1997; Staško & Tarka, 2002). Ma na to wpływ zarówno wielkość opadów, średnia temperatura powietrza w poszczególnych miesiącach, jak i konsumpcja wody przez rośliny w okresie wegetacyjnym, przy czym większy wpływ drugiego z tych czynników przejawia się na obszarach niżej położonych (Pietrygowa, 1971; Tarka, 1995, 1997). Widoczne jest

tutaj również, że infiltracja jest parametrem o większej zmienności niż opad. Współczynnik zmienności, rozumiany przez iloraz odchylenia standardowego i średniej arytmetycznej, dla opadu półrocznego wynosi 41%, a dla infiltracji półrocznej 71%. Parametr ten był liczony dla półroczy, ponieważ okres badawczy trwał 2,5 roku.

W Lasocinie w 1994 r. zauważono, że w półroczu chłodnym infiltrowało mniej wody aniżeli w ciepłym — odpowiednio 72,9 mm i 86,0 mm (Staško, 1997), natomiast w trakcie badań w latach 2003–2006 zauważono zależność odwrotną. Potwierdza to dużą zmienność infiltracji w dłuższych okresach.

Ponieważ grunt w lizymetrach ma strukturę naruszoną, to w jego strukturze należy się spodziewać większej liczby makroporów, a co za tym idzie lepszych parametrów filtracyjnych i wyższych wartości infiltracji aniżeli w gruncie o strukturze nienaruszonej. Taka sytuacja może mieć miejsce przynajmniej do czasu ustabilizowania się gruntu, co zajmuje w tych warunkach kilka lat (Tarka, 1997).

Badania prowadzone w niżej położonych nad poziomem morza punktach badawczych wykazały niższe wartości infiltracji, zwłaszcza w okolicach Wrocławia, gdzie infiltracja roczna mierzona na głębokości 50 cm w latach 1993–1996 wynosiła 4,8–18,6 mm, przy czym większość wód infiltrowała przeważnie w półroczu chłodnym. Badania te, prowadzone na różnych głębokościach, wykazały duży spadek ilości wód infiltrujących wraz z głębokością (Paluch, 1997). Z kolei badania Gregorczyka i Sawickiego (1992), prowadzone na obszarze Kotliny Turoszowskiej w latach 1990–1992, wykazały także przewagę wielkości infiltracji zachodzącej w półroczu chłodnym. Wielkość infiltracji półrocza chłodnego wynosiła 10,8–77,5 mm, natomiast w półroczu ciepłym 2,5–6,7 mm.

Na podstawie dostępnych danych można przeprowadzić uproszczony bilans hydrologiczny (tab. 5 i 6). Ponieważ utwory zwietrzelinowe skał krystalicznych są to piaski drobnoziarniste, pylaste i gliniaste, więc przyjęte wskaźniki infiltracji efektywnej wg Wedera powinny się zawierać w granicach 0,1–0,45. Tabela 5 ilustruje szacowaną wielkość infiltracji obliczoną metodą wskaźników infiltracji efektywnej oraz wynikającą z bilansu hydrologicznego.

Z przedstawionych danych wynika, że wielkość zmierzonej infiltracji rocznej dla Szklar i Lasocina, wyznaczonej z bilansu hydrologicznego, w większym stopniu odbiega od pomierzonych wartości niż infiltracja efektyw-

Tab. 4. Wielkość infiltracji, opadów oraz wskaźnika infiltracji w punkcie badawczym w Kamienicy (wg *Tarki, 1997; **Staški i Tarki, 2002; ***Twarowskiego i in., 2004, 2005; 2005 — badania własne)

Table 4. Values of infiltration rate and precipitation and infiltration coefficient for the sampling point at Kamienica (after *Tarka, 1997; **Staško & Tarka, 2002; ***Twarowski et al., 2004, 2005; 2005 — author's results)

Rok Year	Półrocze chłodne (XI–IV) Cold half-year (Nov–Apr)			Półrocze ciepłe (V–X) Warm half-year (May–Oct)		
	Infiltracja [mm] Infiltration [mm]	Opad [mm] Precipitation [mm]	Wskaźnik infiltracji [%] Infiltration coefficient [%]	Infiltracja [mm] Infiltration [mm]	Opad [mm] Precipitation [mm]	Wskaźnik infiltracji [%] Infiltration coefficient [%]
1993*	188,5	360,6	52,3	20,1	431,8	4,7
1994*	453,5	479,9	94,5	–	–	–
1998**	298,8	521,4	57,3	244,0	1169,8	20,9
1999**	90,4	475,3	19,0	83,8	723,2	11,6
2001**	162,9	468,0	34,8	26,4	897,5	2,9
2005	254,3	444,0***	57,3	–	–	–

Tab. 5. Porównanie średniego opadu rocznego, parowania rocznego, infiltracji efektywnej szacowanej z bilansu hydrologicznego (1951–1980) i współczynników infiltracji efektywnej oraz infiltracji zmierzonej lizymetrami (wg *Bac-Bronowicz, 1997; **Rojka, 1997)

Table 5. Comparison of mean annual precipitation, mean annual evapotranspiration and recharging infiltration estimated from water balance and infiltration coefficients (1951–1980) and infiltration measured with the use of lysimeters (after *Bac-Bronowicz, 1997; **Rojek, 1997)

Punkt badawczy Sampling point	Opad roczny* Annual precipitation*	Ewapotranspiracja roczna** Annual evapotranspiration**	Infiltracja efektywna wynikająca z bilansu hydrologicznego Recharging infiltration resulting from water balance	Infiltracja efektywna obliczone ze wskaźników infiltracji efektywnej Recharging infiltration calculated from infiltration coefficients		Infiltracja zmierzona Measured infiltration	
				w = 0,1	w = 0,45	min.	max
				[mm]			
Wądroże Wielkie	600	580	20	60	270	33	33
Szklary	630	580	50	63	284	65	79
Cieszów	640	560	80	64	288	–	–
Lasocin	830	560	270	83	374	175	320
Kamienica	1250	500	750	125	563	174	543

na, policzona na podstawie wskaźników infiltracji efektywnej. Zdaniem autora, infiltracja efektywna w Wądrożu Wielkim obliczona metodą bilansu hydrologicznego może być oszacowana poprawnie, ponieważ roczny odpływ podziemny z tego obszaru wynosi 15–35 mm (Orsztynowicz, 1987). Z kolei w Kamienicy roczna infiltracja efektywna jest przeszacowana, ponieważ w tym punkcie badawczym nigdy nie zarejestrowano tak dużych wartości.

W Wądrożu Wielkim infiltracja zmierzona w poszczególnych półroczach roku hydrologicznego jest zbliżona. Może mieć na to wpływ fakt, iż w tym okresie w Szklarach i w Kamienicy także zaobserwowano niską infiltrację, co było spowodowane przesuszeniem strefy aeracji jesienią 2005 r., które spowodowało deficyt wilgotności. W półroczu chłodnym 2006 r. wody infiltrujące uzupełniły najpierw deficyt wilgotności, a dopiero później infiltro-

Tab. 6. Porównanie średniego półrocznego opadu, parowania, infiltracji efektywnej (1951–1980) oraz infiltracji zmierzonej (wg *Bac-Bronowicz, 1997; **Rojka, 1997)

Table 6. Comparison of mean half-yearly precipitation and mean half-yearly evapotranspiration recharging infiltration (1951–1980) estimated from water balance and measured infiltration (after *Bac-Bronowicz, 1997; **Rojek, 1997)

A — półrocze chłodne (XI–IV), cold half-year (Nov–Apr)

Punkt badawczy Sampling point	Opad* Precipitation*	Ewapotranspiracja** Evapotranspiration**	Infiltracja efektywna wynikająca z bilansu hydrologicznego Recharging infiltration resulting from water balance	Infiltracja zmierzona Measured infiltration	
				min.	max
				[mm]	
Wądroże Wielkie	210	140	70	17	17
Szklary	210	140	70	6	66
Cieszów	190	140	50	75	75
Lasocin	330	140	190	93	173
Kamienica	550	130	420	90	454

B — półrocze ciepłe (V–X), warm half-year (May–Oct)

Punkt badawczy Sampling point	Opad* Precipitation*	Ewapotranspiracja** Evapotranspiration**	Infiltracja efektywna wynikająca z bilansu hydrologicznego Recharging infiltration resulting from water balance	Infiltracja zmierzona Measured infiltration	
				min.	max
				[mm]	
Wądroże Wielkie	390	440	–50	15	15
Szklary	420	440	–20	10	13
Cieszów	450	420	30	–	–
Lasocin	500	420	80	82	147
Kamienica	700	370	330	20	244

wały głębiej. Alternatywnym wytłumaczeniem takiego rozkładu infiltracji w Wądrożu Wielkim może być podobieństwo do Lasocina, gdzie zaobserwowano zbliżone wartości infiltracji w półroczu chłodnym i ciepłym. Natomiast niższe niż w Lasocinie wartości infiltracji są spowodowane mniejszym wyniesieniem Wądroża Wielkiego nad poziomem morza. Zdaniem autora, na podstawie rocznego ciągu obserwacyjnego nie można jednoznacznie stwierdzić, który z czynników odpowiada za taką wielkość i rozkład infiltracji w Wądrożu Wielkim. W przypadku Kamienicy potwierdza się przeszacowanie infiltracji efektywnej w stosunku do wartości pomierzonych, szczególnie w półroczu ciepłym.

Ujemne wartości infiltracji efektywnej w półroczu letnim w Wądrożu Wielkim i Szklarach nie zgadzają się z obserwacjami autora, ale niewykluczone że dalszy ubytek wód infiltrujących zachodzi poniżej głębokości zainstalowania lizymetru.

Podsumowanie

Wyniki opisanych w niniejszym artykule badań skłaniają do wyciągnięcia następujących wniosków:

1. Infiltracja zachodząca w strefie aeracji zbudowanej ze zwietrzliny skał krystalicznych Sudetów i Przedgórze Sudeckiego charakteryzuje się dużą zmiennością zarówno w skali roku, jak i wielolecia. Infiltracja w skali wielolecia badana w Kamienicy charakteryzuje się większą zmiennością niż opad, co wynika zarówno z badań własnych, jak i innych autorów.

2. W Szklarach i w Kamienicy zaznacza się wyraźna przewaga infiltracji w półroczu chłodnym roku hydrologicznego (listopad–kwiecień), a w Lasocinie i w Wądrożu Wielkim wielkości infiltracji w obu półroczach były zbliżone do siebie. Krótka seria badań w Wądrożu Wielkim nie pozwala stwierdzić jednoznacznie przyczyny takiego przebiegu infiltracji w tym punkcie badawczym.

3. Okres, w którym infiltracja nie zachodzi, zwykle wypada jesienią (wrzesień–październik). Czasami może on się przedłużyć nawet o kilka miesięcy, jak to miało miejsce w Szklarach i w Kamienicy w półroczu chłodnym 2006 r.

4. Wielkość infiltracji rośnie wraz z wysokością punktu pomiarowego nad poziomem morza, w czym jest ona podobna do opadu. Od tej zależności zdarzają się wyjątki, ale widać, że infiltracja zachodząca w górskich partiach Sudetów (Góry Sowie, Masyw Śnieżnika) jest wyraźnie wyższa od infiltracji na pozostałym obszarze Pogórza Wałbrzyskiego i Przedgórze Sudeckiego.

5. Gradient wysokościowy infiltracji jest czasem wyższy od gradientu wysokościowego opadów (półrocze chłodne 2005 r.). Ze względu na dużą zmienność infiltracji w skali wielolecia można się spodziewać także znacznej zmienności samego gradientu infiltracji.

6. Podobnie jak infiltracja, wskaźnik infiltracji podlega wyraźnym zmianom sezonowym w Szklarach i Kamienicy. Rośnie on również wraz z wysokością, co oznacza, że wraz

ze wzrostem wysokości nad poziomem morza większa część wód opadowych infiltruje w głąb strefy aeracji.

7. Roczna infiltracja efektywna obliczona metodą wskaźników infiltracji nawiązuje w większym stopniu do wartości pomierzonych. Natomiast infiltracja efektywna obliczona metodą bilansu hydrologicznego dla Kamienicy jest zawyżona, ponieważ infiltracja zmierzona w lizymetrze jest niższa.

Prace zostały wykonane w ramach tematu 2002/W/ING/03-52 oraz badań statutowych Uniwersytetu Wrocławskiego — nr projektu 1017/S/ING/03-06-XII.

Literatura

- BAC-BRONOWICZ J. 1997 — Opady atmosferyczne (1951–80), skala 1 : 2 000 000. [W:] Atlas Śląska Dolnego i Opolskiego. PAN, Oddz. Wrocław, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław.
- DADLEZ R., MAREK S. & POKORSKI J. 2000 — Mapa geologiczna Polski bez utworów kenozoiku, skala 1 : 1 000 000. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- DUDA R., KARLIKOWSKA J., WITCZAK S. & ŻUREK A. 2005 — Modyfikacja sposobu opracowania warstw informacyjnych do „Mapy wrażliwości wód podziemnych na zanieczyszczenie”. Kraków.
- GREGORCZYK T. & SAWICKI J. 1992 — Wyniki bezpośrednich pomiarów infiltracji opadów w obszarze górniczym KWB „Turów”. [W:] Problemy hydrogeologiczne południowo-zachodniej Polski. Pokrzywna, 10–12 września 1992. Oficyna Wyd. Sudety, Wrocław: 173–183.
- ORSZTYNOWICZ J. 1987 — Średni jednostkowy odpływ pochodzenia podziemnego, skala 1 : 1 500 000. [W:] Atlas hydrologiczny Polski t. I. Wyd. Geol., Warszawa.
- PALUCH J. 1997 — Pomiary ilości wody przemieszczającej się w strefie aeracji profilu glebowego. *Gosp. Wod.*, 6: 179–187.
- PIETRZYGOWA Z. 1971 — Hydrogeologiczna rola lasów w Karpatach fliszowych. *Gosp. Wod.*, 7: 252–256.
- ROJEK M. 1997 — Parowanie wskaźnikowe roczne, półrocza ciepłego i chłodnego (1951–1980), skala 1 : 2 000 000. [W:] Atlas Śląska Dolnego i Opolskiego. PAN, Oddz. Wrocław, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław.
- STAŠKO S. & TARKA R. 2001 — Ground water flow in fractured hard rock based on field data from the Sudety Mts., SW Poland. [In:] New approaches characterizing groundwater flow. Vol. 2. Proceedings of the XXXI International Association of Hydrogeologists Congress. Munich, Germany, 10–14 September 2001: 1069–1072.
- STAŠKO S. & TARKA R. 2002 — Zasilanie i drenaż wód podziemnych w obszarach górskich na podstawie badań w masywie Śnieżnika. *Acta Univ. Wratisl. Hydrogeol.*, 2528.
- STAŠKO S. 1996 — Wody podziemne w skałach krystalicznych na podstawie badań wybranych obszarów Sudetów polskich. *Acta Univ. Wratisl.*, 1870, Pr. Geol.-Miner., 53.
- STAŠKO S. 1997 — Dane o wielkości infiltracji i podstawowych parametrach wód infiltrujących w Lasocinie w latach 1993–97.
- TARKA R. 1995 — Sezonowa zmienność zasilania wód podziemnych na obszarze Masywu Śnieżnika. [W:] Współczesne problemy hydrogeologii. T. VII. Wyd. Profil, Kraków: 461–466.
- TARKA R. 1997 — Zasilanie wód podziemnych w górskich masywach krystalicznych na przykładzie Masywu Śnieżnika w Sudetach. *Acta Univ. Wratisl.*, 1964, Pr. Geol.-Miner., 56.
- TWAROWSKI R., GENDOLLA T., BŁACHUTA J., SIENKIEWICZ, R., LIANA E., KACZMARSKI S., WYRODEK S., WOSTEK K. & KUPCZYK J. 2004 — Monitoring chemizmu opadów atmosferycznych na terenie województwa dolnośląskiego. IMGW, Wrocław.
- TWAROWSKI R., GENDOLLA T., BŁACHUTA J., SIENKIEWICZ, R., LIANA E., KACZMARSKI S., WYRODEK S., WOSTEK K. & KUPCZYK J. 2005 — Monitoring chemizmu opadów atmosferycznych na terenie województwa dolnośląskiego. IMGW, Wrocław.
- WÓJTOWICZ W. 1966 — Gradienty opadowe w Sudetach. Pr. Komis. Geogr.-Geol. Wydz. Mat.-Przyr. Pozn. Tow. Przyj. Nauk, 4, 4.

Praca wpłynęła do redakcji 20.09.2007 r.
Po recenzji akceptowano do druku 29.10.2009 r.