

ANITA BOKWA, KRZYSZTOF MATUSZYK

Zakład Klimatologii
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej – Uniwersytet Jagielloński w Krakowie

ZMIANY PROMIENIOWANIA CAŁKOWITEGO W KRAKOWIE I GAIKU-BRZEZOWEJ

Global radiation changes in Cracow and in Gaik-Brzezowa

ABSTRAKT: Badania aktynometryczne prowadzone przez Zakład Klimatologii IG i GP UJ w Krakowie i Gaiku-Brzezowej od lat 60. XX w. pozwalają ocenić wpływ miasta, a zwłaszcza zanieczyszczenia powietrza w mieście, na dopływ promieniowania słonecznego do powierzchni ziemi. Ponadto stacja w Gaiku-Brzezowej jest reprezentatywna dla Pogórza Wielickiego i wieloletnia seria pomiarowa może służyć do śledzenia zmienności ilości promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi w tym regionie. Porównano dane dotyczące natężenia promieniowania całkowitego z obu stacji z lat 1966–1975 (pomiarów tradycyjnych) i z 2004 r. (pomiarów automatycznych). W pierwszym okresie w Krakowie występowało duże zanieczyszczenie powietrza, zaś w 2004 r. stan aerosanitarny miasta był znacznie lepszy. W latach 1966–1975 stacja w Gaiku-Brzezowej znajdowała się w sterasowanym dnie doliny, a w 2004 r. na wierzchołku, nad brzegiem Zbiornika Dobczyckiego. W 2004 r. wyższe wartości promieniowania całkowitego w Gaiku niż w Krakowie występowały tylko przez część doby, w godzinach południowych i popołudniowych, podczas gdy we wcześniejszym okresie – najczęściej przez cały dzień. W przebiegu rocznym w 2004 r. nie ma wzrostu wartości różnic między stacjami w miesiącach zimowych, charakterystycznego dla wcześniejszego okresu. Może to wynikać z większej obecnie roli zanieczyszczeń komunikacyjnych niż zanieczyszczeń z sektora energetycznego w kształtowaniu warunków aerosanitarnych Krakowa, podczas gdy w poprzednim okresie to produkcja energii była głównym źródłem zanieczyszczeń zimą.

słowa kluczowe – *key words:*

promieniowanie całkowite – *global radiation*, Kraków – *Cracow*, Pogórze Wielickie – *Wieliczka Foothills*, klimat miasta – *urban climate*, zbiornik wodny – *water reservoir*

WSTĘP

Zakład Klimatologii Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ prowadzi badania aktynometryczne na dwu stacjach klimatologicznych: w Krakowie i w Gaiku-Brzezowej (na Pogórzu Wielickim, ok. 30 km na południe od Krakowa). Pomiarów natężenia promieniowania słonecznego w Krakowie rozpoczęto w roku 1967 na tarasie budynku IG UJ przy ul. Grodzkiej ($\varphi = 50^{\circ}03'N$, $\lambda = 19^{\circ}56'E$, $h = 228$ m n.p.m., 15 m nad poziomem ulicy). Następnie, w 1976 r. zostały one

przeniesione na stację w Ogrodzie Botanicznym, 1,5 km ENE od poprzedniego miejsca ($\varphi = 50^{\circ}04'N$, $\lambda = 19^{\circ}58'E$, $h = 206$ m n.p.m.). Pomiary aktynometryczne w Gaiku-Brzezowej rozpoczęto w roku 1965 na ówczesnej stacji głównej „Terasa”, w dolinie Raby ($\varphi = 49^{\circ}52'N$, $\lambda = 20^{\circ}04'E$, $h = 259$ m n.p.m.). Wskutek budowy Zbiornika Dobczyckiego, stacja główna (a wraz z nią pomiary aktynometryczne) została przeniesiona w 1983 r. na pobliską wierzchołkową i otrzymała nazwę „Kopiec” ($h = 302$ m n.p.m.). Zbiornik uruchomiono w grudniu 1987 r.

Stacja w Gaiku-Brzezowej jest reprezentatywna dla Pogórza Wielickiego, a wieloletnia seria pomiarowa może służyć do śledzenia zmienności ilości promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi w tym regionie. Natomiast równoczesne prowadzenie pomiarów na stacji położonej w centrum miasta i na terenie pozamiejskim pozwala ocenić wpływ miasta, a zwłaszcza zanieczyszczenia powietrza w mieście, na dopływ promieniowania słonecznego do powierzchni ziemi. Badania przeprowadzone w latach 70. i 80. XX w. w Zakładzie Klimatologii IGiGP UJ dowiodły, że duże zanieczyszczenie powietrza, charakterystyczne dla tamtego okresu, powodowało znaczne osłabienie w Krakowie promieniowania bezpośredniego, przy niewielkim zwiększeniu rozproszonego. Pomiary wykonywane w Krakowie porównywano z pomiarami w Gaiku-Brzezowej, gdzie atmosfera jest prawie pozbawiona zanieczyszczeń pochodzenia przemysłowego (2, 7, 8-10). Przemiany społeczno-gospodarcze, zachodzące w Polsce po 1989 r., doprowadziły w Krakowie m.in. do znacznego polepszenia warunków aerosanitarnych. Celem niniejszego opracowania jest zbadanie, czy znalazło to odbicie w zmianach natężenia promieniowania całkowitego. Zazwyczaj bowiem przyjmuje się za Landsbergiem (5), że w miastach ma miejsce znaczne osłabienie krótkofalowego promieniowania całkowitego, ale nowsze badania (1) wskazują, że nie we wszystkich miastach takie zjawisko rzeczywiście występuje.

MATERIAŁ I METODY

W opracowaniu wykorzystano wyniki pomiarów natężenia promieniowania całkowitego ze stacji klimatologicznych IGiGP UJ:

- 1) w Krakowie, dane z lat 1968–1975, pomiary na tarasie budynku IG UJ, ul. Grodzka (2) oraz z roku 2004 – pomiary na stacji w Ogrodzie Botanicznym,
- 2) w Gaiku-Brzezowej, dane z lat 1966–1975, stacja Terasa w dolinie Raby (4) oraz z roku 2004 – stacja Kopiec.

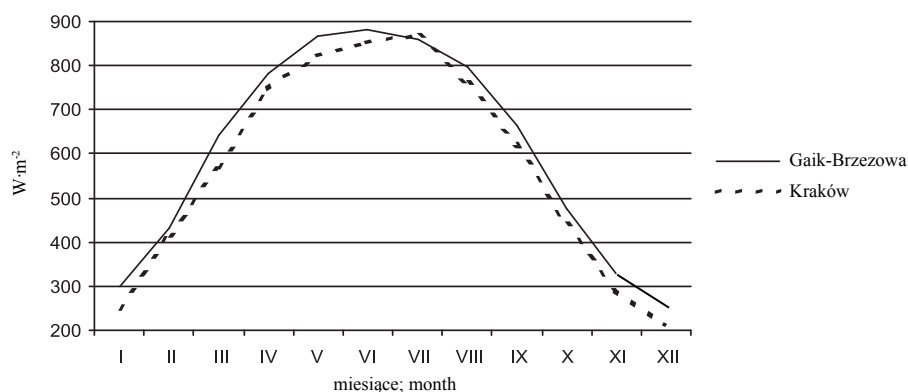
W latach 1966–1975 pomiary wykonywano pyranometrami M80 Janiszewskiego, zaś w roku 2004 – czujnikami automatycznymi Kipp&Zonen CM5. Pomiary w Krakowie były prowadzone w latach 1968–1975 tylko raz dziennie, o godz. 12:30 średniego czasu miejscowego, natomiast w Gaiku-Brzezowej (1966–1975) – sześć razy dziennie, o godz. 6:30, 9:30, 12:30, 15:30, 18:30 i 21:30 średniego czasu miejscowego. Pomiary automatyczne z 2004 r. pozwoliły uzyskać godzinne wartości natężenia promieniowania; w Gaiku były one wykonywane w okresie 1.01–21.11,

zaś w Krakowie 1.01–31.12, z przerwami 1–9.06 i 21.07–2.08. Dane z Krakowa z lat 1968–1975 prezentują warunki wysokiego zanieczyszczenia powietrza, zaś dane z roku 2004 – warunki, kiedy większość zanieczyszczeń nie przekroczyła dopuszczalnych średnich stężeń rocznych. Wykorzystano jedynie wyniki pomiarów promieniowania całkowitego, gdyż tylko ta składowa była mierzona za pomocą czujników automatycznych w 2004 r., w ramach pierwszego etapu automatyzacji pomiarów aktywności na stacjach IGiGP UJ. Wartości z lat 1966–1975 zostały przeliczone z $\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ na $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

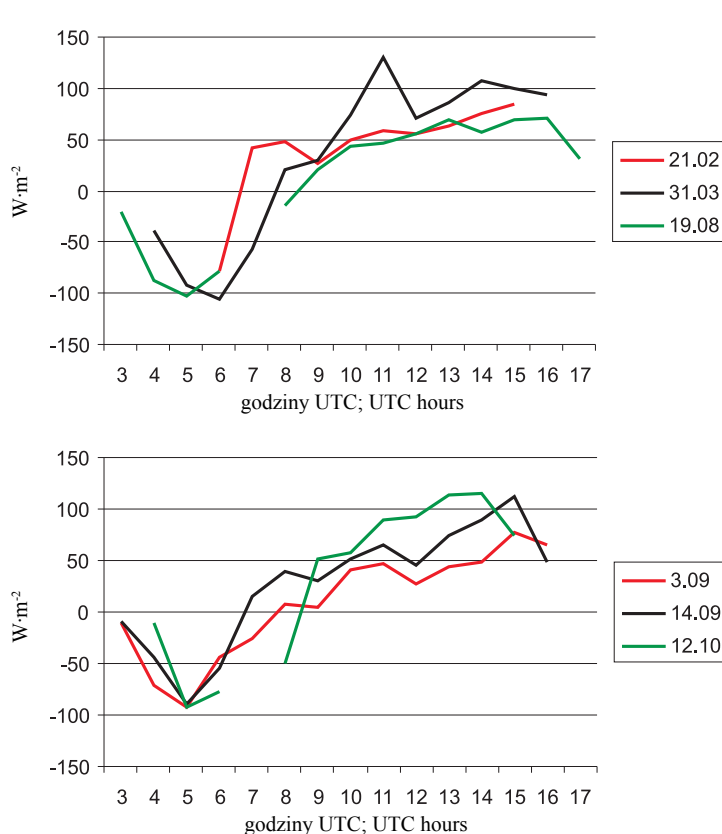
WYNIKI

Średnie miesięczne wartości natężenia promieniowania całkowitego o godz. 12:30 średniego czasu miejscowego w latach 1966–1975 zmieniały się w Krakowie od 111,8 w grudniu do 565,8 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ w lipcu, a w Gaiku-Brzezowej od 132,7 w grudniu do 537,8 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ w sierpniu. W 2004 r. o godz. 10 GMT natężenie promieniowania wynosiło w Krakowie od 145 w styczniu do 555,4 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ w maju, a w Gaiku od 139,6 w styczniu do 648,5 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ w czerwcu. Aby stwierdzić, w jakim stopniu zanieczyszczenia powietrza modyfikują natężenie promieniowania całkowitego w mieście w porównaniu z terenem położonym poza miastem konieczne jest prowadzenie pomiarów przy pogodzie bezchmurnej. Rozpatrywać można tak roczny, jak też dobowy przebieg różnic promieniowania między obiema stacjami. W latach 1966–1975 we wszystkich miesiącach (z wyjątkiem lipca) wartości promieniowania całkowitego w Gaiku-Brzezowej w godzinach południowych przy pogodzie bezchmurnej były średnio wyższe o 30–40 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ niż w Krakowie (najmniejsza różnica między stacjami to 14 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ w lutym, największa to 69,8 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ w marcu; rys. 1). W 2004 r. dni z pogodą bezchmurną lub zachmurzeniem do 2/8 przez cały dzień zarówno w Krakowie, jak i w Gaiku-Brzezowej było zaledwie kilka, nie wystąpiły one w ogóle w styczniu, maju, czerwcu, lipcu, listopadzie i grudniu. Na rysunku 1 wartości z godzin południowych prezentuje termin 12:30 średniego czasu miejscowego; na rysunku 2 odpowiada mu mniej więcej wartość z godz. 10 GMT. Zanotowane wtedy najmniejsze i największe różnice natężenia promieniowania między Krakowem a Gaikiem wyniosły 44,1 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 19.08.2004 i 73,8 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 31.03.2004. Wartości w Gaiku we wszystkich dniach w tym terminie były wyższe niż w Krakowie.

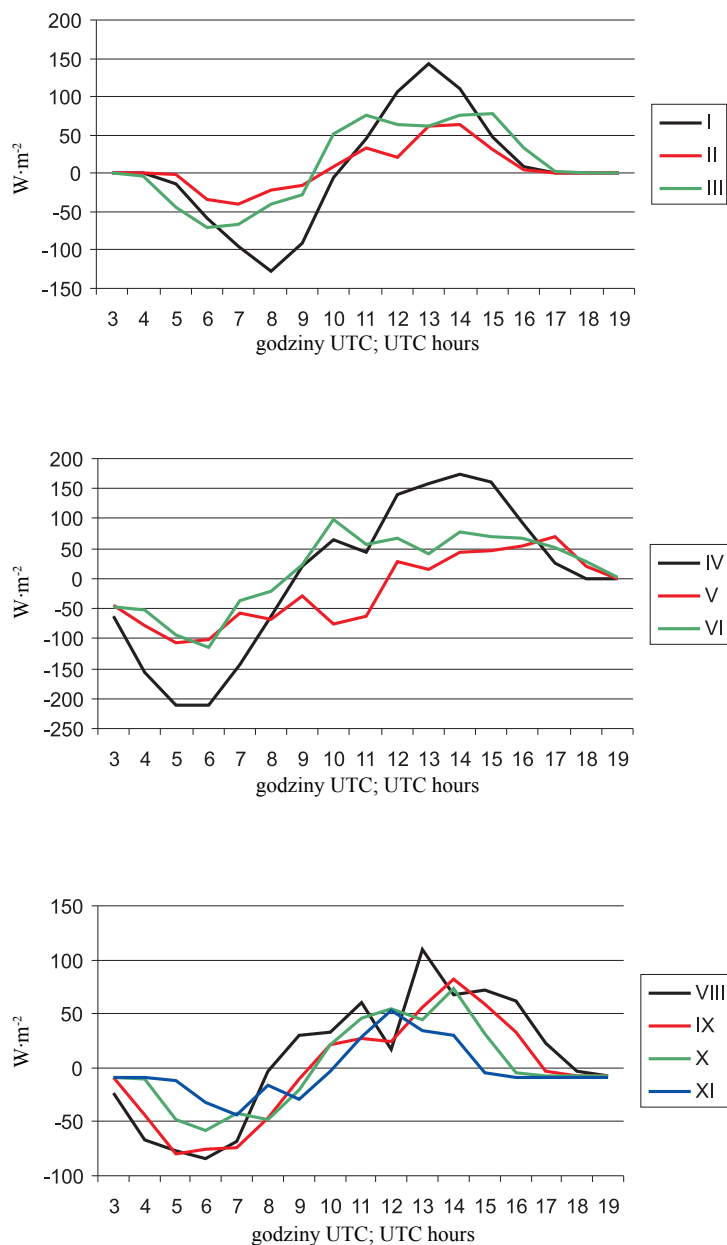
Przebieg dobowy różnic promieniowania całkowitego między obiema stacjami dla okresu 21.07–27.08.1970 opisał Olecki (8). Przez cały dzień wartości notowane w Gaiku były wyższe niż w Krakowie, tylko w godzinach porannych zdarzały się sytuacje odwrotne. W 1990 r. Hess i Olecki opublikowali dane dotyczące średniego przebiegu dobowego składowych bilansu promieniowania przy bezchmurnym niebie na obu stacjach w latach 1976–1980. Tak w styczniu, jak w lipcu przez cały dzień wartości w Gaiku były wyższe niż w Krakowie (w styczniu o około 20, a w lipcu o około 50 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). Tymczasem dane z 2004 r. (rys. 2) wskazują na stałą tendencję występowania wyższych wartości promieniowania całkowitego w Krakowie niż



Rys. 1. Średnie wartości natężenia promieniowania całkowitego w poszczególnych miesiącach w Gaiku-Brzezowej w latach 1966–1975 i w Krakowie w latach 1968–1975 w godzinach południowych przy pogodzie bezchmurnej
 Mean monthly values of total solar radiation in Gaik-Brzezowa (1966–1975) and Cracow (1968–1975) at noon on clear days



Rys. 2. Przebiegi dobowe różnic promieniowania całkowitego między Gaikiem-Brzezową a Krakowem w dniach z pogodą bezchmurną w 2004 r.
 The courses of daily differences in total solar radiation between Gaik-Brzezowa and Cracow on clear days in 2004



Rys. 3. Średnie przebiegi dobowe różnic promieniowania całkowitego między Gaikiem-Brzezową a Krakowem w poszczególnych miesiącach 2004 r. (brak danych dla lipca i grudnia)
 Mean courses of daily differences in total solar radiation between Gaik-Brzezowa and Cracow in particular months of 2004 (no data available for July and December)

w Gaiku w godzinach porannych. W późniejszych godzinach promieniowanie w Gaiku jest wyższe, przy czym różnice między stacjami osiągają wartości największe (około $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) około godziny 5–6 i 14–15 GMT. Także dla dobowych przebiegów natężenia promieniowania w poszczególnych miesiącach, uśrednionych dla wszystkich dni, bez względu na zachmurzenie (rys. 3) widać podobne tendencje.

DYSKUSJA

Natężenie promieniowania całkowitego zależy od wielu czynników: zachmurzenia, usłonecznienia, zawartości pary wodnej w powietrzu, a w mieście, zwłaszcza przy pogodzie bezchmurnej – także od stężenia zanieczyszczeń powietrza, przede wszystkim pyłów. Średnie roczne zapylenie powietrza pyłem zawieszonym sięgało w latach 1968–1975 w Krakowie $175 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, zaś zanieczyszczenie dwutlenkiem siarki $95 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (na podstawie danych w (2)). W 2003 r. natomiast (w chwili pisanía tekstu brak jeszcze danych z 2004 r., ale najprawdopodobniej są one bardzo zbliżone) średnie roczne stężenie pyłu zawieszzonego w Krakowie wynosiło około $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (jedynie na al. Krasieńskiego osiągając $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), zaś SO_2 $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (11). Nastąpiła zatem znaczna poprawa stanu arosanitarnego Krakowa. Innym czynnikiem, który uległ zmianie, jest położenie stacji w Gaiku-Brzezowej. Została ona przeniesiona z silnie inwersyjnej, chłodnej i wilgotnej terasy w dolinie Raby, pozostającej w zasięgu częstych mgieł radiacyjnych, na pobliską wierzchołkową. Stacja Kopiec jest znacznie lepiej przewietrzana niż stacja Terasa, z uwagi na położenie na wypukłej formie terenu, gdzie nad wpływami lokalnymi, w tym zbiornika wodnego, przeważa wpływ cyrkulacji ogólnej (6). Ponadto powierzchnia zbiornika ma małą szorstkość, co dodatkowo zwiększa prędkość wiatru. Na Kopcu zatem, w przeciwieństwie do Terasy, nie tworzą się zastoiska chłodnego powietrza czy inwersje temperatury sprzyjające powstawaniu mgieł. Tymczasem stacja w Krakowie jest nadal w tym samym miejscu, w chłodnej i wilgotnej dolinie Wisły.

W latach 1968–1975 średnie miesięczne natężenie promieniowania całkowitego w godzinach południowych w Krakowie było mniejsze niż poza miastem średnio o około 7% (zimą 25%, latem 4–7%; $14\text{--}70 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). Pomiary w Krakowie były wykonywane tylko raz dziennie, co uniemożliwiło prześledzenie dobowego przebiegu różnic. W 2004 r., w dniach z pogodą bezchmurną, w godzinach południowych promieniowanie całkowite było mniejsze w Krakowie o około 6% latem i 10% zimą ($40\text{--}70 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). Pomiary z 2004 roku na obu stacjach umożliwiają stwierdzenie trwałej tendencji do występowania wyższych wartości promieniowania całkowitego w godzinach dopołudniowych w Krakowie niż w Gaiku-Brzezowej, zaś później, jeszcze przed południem, następuje sytuacja odwrotna, utrzymująca się potem przez resztę dnia. Taki przebieg występuje w dniach z małym zachmurzeniem, ale widoczny jest także w przebiegach dobowych dla poszczególnych miesięcy, obliczo-

nych dla wszystkich dni, bez względu a zachmurzenie. Promieniowanie całkowite to suma promieniowania bezpośredniego i rozproszonego. W godzinach porannych, przy małej wysokości słońca nad horyzontem, promieniowanie rozproszone ma większy udział i znaczenie w kształtowaniu promieniowania całkowitego. Wówczas zanieczyszczona atmosfera Krakowa może powodować wzrost jego natężenia. W Gaiku tymczasem brak nawet naturalnych czynników zwiększających promieniowanie rozproszone, czyli porannych mgieł. Później, gdy główną rolę odgrywa promieniowanie bezpośrednie, wyższe wartości promieniowania całkowitego występują na obszarze pozbawionym zanieczyszczeń. Hess i Olecki (3) stwierdzili, że w latach 1968–1985 różnice miesięczne w średnim natężeniu promieniowania całkowitego między Krakowem a Gaikiem-Brzezową w warunkach atmosfery bezchmurnej w godzinach południowych wykazywały charakterystyczny przebieg roczny. W miesiącach zimowych sięgały one 300–350 W·m⁻², zaś latem 100–150 W·m⁻², zazwyczaj wyższe wartości występowały w Gaiku, ale w miesiącach letnich zdarzały się sytuacje odwrotne (wyższe wartości w Krakowie). Znacznie większe różnice zimą były spowodowane wzrostem emisji zanieczyszczeń powietrza wskutek spalania paliw kopalnych w sezonie grzewczym. W roku 2004 brak wyraźnego zróżnicowania różnic między porami roku. Może to sugerować dominujący wpływ na dopływ promieniowania zanieczyszczeń komunikacyjnych, o mało zmiennych poziomach w ciągu roku, nad zanieczyszczeniami z sektora energetycznego, gdzie poczyniono liczne inwestycje zmniejszające emisję zanieczyszczeń.

WNIOSKI

1. Automatyczne pomiary promieniowania całkowitego w Krakowie i Gaiku-Brzezowej przeprowadzone w 2004 r. pozwalają na poznanie dobowej zmienności tego elementu w znacznie szerszym zakresie, niż to miało miejsce dotychczas. Dowodzą one, że wyższe wartości promieniowania całkowitego występują obecnie w Gaiku tylko przez część doby.

2. Zmniejszanie zanieczyszczenia powietrza w Krakowie rozpoczęło się po roku 1990, przeniesienie stacji w Gaiku-Brzezowej z doliny Raby na lepiej przewietrzaną wierzchowinę nastąpiło w 1983 r., zaś napełnienie zbiornika w roku 1987. Nałożenie się tych zmian doprowadziło do zwiększenia różnic w promieniowaniu całkowitym między stacjami w godzinach porannych w 2004 r. Obecnie różnice poranne są mniej więcej tak samo duże jak różnice w godzinach południowych i popołudniowych, przy czym rano większe wartości występują w Krakowie, a po południu – w Gaiku.

3. W 2004 r. nie zaobserwowano zwiększenia różnic promieniowania całkowitego między Krakowem a Gaikiem w zimie w porównaniu z latem, jak to miało miejsce w latach wcześniejszych. Może to być skutkiem modernizacji sektora energetycznego i zmian w zużyciu paliw kopalnych używanych w sezonie grzewczym.

LITERATURA

1. Christen A., Vogt R.: Energy and radiation balance of a Central European city. *Int. J. Climatol.*, 2004, **24**: 1395-1421.
2. Hess M., Leśniak B., Olecki Z., Rauczyńska-Olecka D.: Wpływ krakowskiej aglomeracji miejsko-przemysłowej na promieniowanie słoneczne dochodzące do powierzchni ziemi. *Kraków, Zesz. Nauk. UJ, Pr. Geogr.*, 1980, **51**: 8-71.
3. Hess M., Olecki Z.: Wpływ zanieczyszczenia powietrza na stosunki radiacyjne w Krakowie. *Zesz. Nauk. UJ, Pr. Geogr.*, 1990, **77**: 29-43.
4. Hess M., Olecki Z., Rauczyńska-Olecka D.: Radiacyjne cechy klimatu na Pogórze Wielickim. *Zesz. Nauk. UJ, Pr. Geogr.*, 1979, **49**: 7-102.
5. Landsberg H.E.: *The Urban Climate*. International Geophysics Series, vol. 28, Academic Press, New York, 1981.
6. Obrębska-Starkłowa B.: Differentiation of topoclimatic conditions in a Carpathian Foreland valley based on multiannual observations. *Zesz. Nauk. UJ, Pr. Geogr.*, 1995, 101.
7. Olecki Z.: Wpływ miasta na niektóre elementy bilansu radiacyjnego na przykładzie Krakowa. *Zesz. Nauk. UJ, Pr. Geogr.*, 1973, **32**: 105-118.
8. Olecki Z.: Oddziaływanie dużego ośrodka miejsko-przemysłowego na dopływ promieniowania słonecznego (na przykładzie Krakowa). *Zesz. Nauk. UJ, Pr. Geogr.*, 1975, **41**: 37-86.
9. Olecki Z.: Rola dużego ośrodka miejsko-przemysłowego w kształtowaniu promieniowania słonecznego na przykładzie Krakowa. *Acta Univ. Lodz., Zesz. Nauk. UŁ, Nauki Mat.-Przyr., ser. II*, 1980, **28**: 105-113.
10. Olecki Z.: On the components of the radiation balance in Cracow. *Zesz. Nauk. UJ, Pr. Geogr.*, 1986, **69**: 27-38.
11. Raport o stanie środowiska naturalnego w województwie małopolskim w 2003 roku: Powietrze, Serwis Internetowy Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska w Krakowie, <http://www.krakow.pios.gov.pl> (6.08.2005).

GLOBAL RADIATION CHANGES IN CRACOW AND IN GAIK-BRZEZOWA

Summary

Actinometric measurements have been carried by the Department of Climatology, Institute of Geography and Spatial Management, Jagiellonian University in Cracow and in Gaik-Brzezowa since the 1960s. These measurements have allowed estimation on the impact of air pollution in urban areas, for the incoming solar radiation at the Earth's surface. Moreover, the station in Gaik-Brzezowa is a representative for the region of the Wieliczka Foothills, and the multi-annual measurement series defines the variability of solar energy income in that region. The measurements of solar irradiance from both stations in the years 1966–1975 (traditional measurements) and 2004 (automatic measurements) were compared. In the first period, very high air pollution levels occurred in Cracow, while in 2004 the pollution was much smaller. In the years 1966–1975, the station at Gaik-Brzezowa was located in a river valley and in 2004 it was already placed on a flattened hilltop, near the Dobczyce Water Reservoir. In 2004, higher values of solar irradiance in Gaik than in Cracow occurred only in the hours of the afternoon and at noon, while in the earlier period – they were most often observed during the whole day. For the 2004, there was no significant increase of irradiance differences between the stations in winter months, which was characteristic for the previous period. This might be the result of a larger role played by modern traffic pollution in comparison to the pollution delivered by the energy production sector. In the previous period, the air pollution resulting from burning fossil fuels to cover municipal heating needs in winter was the main source of air pollution for Cracow, apart from the constant source from industrial production.

Praca wpłynęła do Redakcji 23 XI 2005 r.