ROCZNIKI POLSKIEGO TOWARZYSTWA MATEMATYCZNEGO
Seria II: WIADOMOŚCI MATEMATYCZNE XV (1972)

K. SIEKLUCKI (Warszawa)

O geometrii i topologii

1. Szybki i nierównomierny rozwój matematyki oraz powstanie nowych kierunków badań, często na styku dziedzin podstawowych, zdezaktualizowały tradycyjne nazwy działów matematyki. Spotyka się przy tym opinie, że w wytworzonej sytuacji tworzenie nowych określeń jest zbędne, a nawet szkodliwe, gdyż utrudnia dostrzeganie wzajemnych powiązań rozmaitych teorii i dyskryminuje dziedziny stykowe. Nie podzielając tych skrajnych obaw uważamy, że za jasnym określeniem zakresu podstawowych dyscyplin (oczywiście nie w sposób rozłączny) przemawiają względy rzeczowe i formalne. Matematyka nie przedstawia nam się w postaci jednorodnej masy pojęć i twierdzeń. W każdym okresie istnieją w niej centra aktywnego rozwoju, promieniujące na obszary sąsiednie i wymowy tego faktu nie osłabia istnienie ciągłych przejść od jednego obszaru do drugiego. Ponadto w próbach podziału matematyki można dostrzec projekcję podziału matematyków według różnych typów wyobraźni matematycznej. Nie można również zapominać, że współczesne systemy magazynowania i wymiany informacji wymagają również coraz subtelniejszej klasyfikacji działów matematyki. Należy przy tym z całą stanowczością podkreślić, że określenie zakresu jakiejś dyscypliny nie stoi w żadnym związku z tendencją do jej izolowania od innych dyscyplin. Byłoby bowiem niewłaściwe uważać, że nazwanie pewnego twierdzenia topologicznym utrudnia jego zastosowanie w analizie i na odwrót. To, że pewne twierdzenie nosi nazwę nawet podstawowego twierdzenia algebry, nie przeszkadza dowodzić je w elegancki sposób oparty na topologicznym pojęciu stopnia odwzorowania. Sprawę jedności matematyki i wzajemnego przenikania się różnych jej idei uważamy dalej za oczywistą i bezsporną.

Rozważania niniejsze chcielibyśmy rozpocząć od ustalenia, czym jest obecnie geometria i topologia, a w szczególności, czy nauki te mają własny, wydzielony przedmiot badań, czy też należy raczej mówić o metodach geometrycznych i geometrycznym punkcie widzenia w matematyce. W myśl programu z Erlangen, odniesionego do przestrzeni euklidesowej E^m, zbiory A, $B \subset E^m$ uważamy za przystające w sensie grupy przekształceń G, jeżeli istnieje przekształcenie $f\colon E^m \to E^m$ takie, że $f \in G$ oraz $f(A) = B$. Na wyróżnienie zasługują przy tym następujące grupy przekształceń przestrzeni E^m na siebie: izometrie, podobieństwa, przekształcenia afiniczne i homeomorfizmy. Przez geometrię w sensie grupy G rozumie się teorię tych

własności, które są wspólne wszytkim zbiorom przystającym w sensie tej grupy. Określenie to, pochodzące od F. Kleina, trudno obecnie uznać za zadowalające.

Po pierwsze, pojęcia przekształcenia izometrycznego, podobieństwa i homeomorfizmu można odnieść w sensowny sposób do dowolnych podzbiorów przestrzeni E^m i oznaczając przez K klasę (już nie grupę, bo złożenie nie zawsze jest wykonalne) takich przekształceń możemy powiedzieć, że zbiory A i B w przestrzeni E^m są przystające w sensie klasy K, jeżeli istnieje przekształcenie $f \in K$ takie, że $f\colon A \xrightarrow{\text{na}} B$. W zakresie izometrii i podobieństw obie koncepcje przystawania pokrywają się, a to dzięki doskonałej jednorodności metrycznej przestrzeni euklidesowych. Natomiast w przypadku homeomorfizmów pierwsza koncepcja prowadzi do teorii położenia w przestrzeniach euklidesowych, a druga do topologii podzbiorów tych przestrzeni.

Druga niedogodność opierania geometrii na pojęciu grupy przekształceń stała się widoczna przy okazji rozwoju pojęcia przestrzeni. Okazało się mianowicie, że każda z wymienionych grup: izometrii, przekształceń afinicznych i homeomorfizmów przestrzeni E^m na siebie ma naturalną dla siebie klasę przestrzeni, ogólniejszą niż przestrzenie euklidesowe, w których daje się w sensowny sposób określić. I tak pojęcie izometrii można wprowadzić dla dowolnych przestrzeni metrycznych, pojęcie izomorfizmu liniowego — dla dowolnych przestrzeni liniowych, a homeomorfizmu — dla dowolnych przestrzeni topologicznych. Klasy tych przekształceń nie tworzą grup, gdyż składanie nie zawsze jest wykonalne, ale trudno jest na przykład teorii niezmienników izometrii przestrzeni metrycznych odmówić nazwy geometrii metrycznej.

Trzeci argument wiąże się z rozwojem topologii. Okazało się, że wiele ważnych pojęć topologicznych jest niezmiennikami nie tylko homeomorfizmów, ale dowolnych przekształceń ciągłych. Odchodzi się więc częściowo od tradycji badania wyłącznie niezmienników przekształceń odwracalnych. Nie dyskwalifikuje to oczywiście klasycznego określenia geometrii, ale wskazuje na przesunięcie środka ciężkości badań.

2. Wydaje się, że idee programu z Erlangen można dostosować do stanu matematyki współczesnej, stając na gruncie teorii kategorii. Język kategorii jest jednak zbyt uniwersalny i konieczne staje się wyróżnienie tych kategorii, które będziemy uważać za geometryczne. Wówczas przez geometrię (jedną z wielu) będziemy rozumieć teorię niezmienników izomorfizmów pewnej kategorii geometrycznej. Ponieważ zajmujemy się kategoriami, których obiektami są zbiory wraz z pewną strukturą (w sensie Bourbakiego), a morfizmami są przekształcenia „niosące" tę strukturę, więc równoważne pytanie dotyczy wyróżnienia struktur geometrycznych(1).

Choquet [1] wyróżnia struktury proste (które nazywa strukturami-matkami), takie jak struktura grupy czy przestrzeni topologicznej oraz struktury złożone, takie jak struktura grupy topologicznej. Dla uproszczenia będziemy interesować się tylko strukturami prostymi. Uproszczenie to jest związane jedynie ze szkicowym

(1) Omówienie teorii struktur w sensie Bourbakiego i ich związku z teorią kategorii może czytelnik znaleźć w artykule Semadeniego [3].

charakterem tych rozważań, dlatego, choć struktury mieszane nie będą dalej w nich występowały, podkreślmy, że uważamy np. geometrię różniczkową czy też topologię różniczkową za należące odpowiednio do geometrii i topologii. Pomiędzy strukturami (a ściślej — między ich rodzajami, które to rozróżnienie dla uproszczenia pomijamy) można wprowadzić relację podporządkowania (por. [3], § 4). Na przykład struktura przestrzeni topologicznej jest podporządkowana strukturze przestrzeni metrycznej, gdyż (mówiąc nieściśle) każda przestrzeń metryczna jest przestrzenią topologiczną. Mówiąc dokładniej, pojęcia pierwotne przestrzeni topologicznej (na przykład otoczenia) dadzą się zdefiniować przy użyciu odległości w przestrzeni metrycznej, przy czym aksjomaty otoczeń stają się twierdzeniami. Podobnie każda struktura powstała przez „zapomnienie" części innej struktury jest jej podporządkowana. Na przykład struktura przestrzeni topologicznej jest podporządkowana strukturze grupy topologicznej, gdyż każda grupa topologiczna jest w szczególności przestrzenią topologiczną. Wiele przemawia za tym, że struktura podporządkowana strukturze geometrycznej powinna być też uznana za geometryczną. Wynikałoby stąd, co prawda, że teoria mnogości jest również pewną geometrią, ale można zgodzić się, że jest ona wspólnym mianownikiem wszystkich teorii matematycznych.

Wydaje się ponadto, że wszystkie struktury, które zamierzamy nazywać geometrycznymi, niezależnie od tego, że wprowadzamy je w dowolnych zbiorach, powinny w sposób naturalny występować w przestrzeniach euklidesowych. Wiadomo, że na przestrzeń euklidesową można patrzyć co najmniej z trzech punktów widzenia: po pierwsze, w przestrzeni tej można mierzyć odległość między punktami — istnieje więc w tej przestrzeni struktura metryczna, po drugie, na wektorach tej przestrzeni można wykonywać pewne działania — istnieje więc w niej algebraiczna struktura przestrzeni liniowej, wreszcie, pewne przekształcenia przestrzeni euklidesowej można różniczkować — istnieje więc w niej struktura różniczkowa. Struktura metryczna wyznacza przy tym obie pozostałe struktury, tzn. działania liniowe na wektorach w przestrzeniach euklidesowych oraz operacja różniczkowania mogą być zdefiniowane w sposób korzystający jedynie z pojęć metrycznych.

Możliwość mierzenia odległości w przestrzeniach euklidesowych oraz istnienie przekształceń zachowujących odległości (w szczególności — ruchów sztywnych) są najbardziej oczywistymi własnościami geometrycznymi tych przestrzeni podkreślonymi genezą słowa geometria. Cała mechanika klasyczna opiera się na pojęciach metrycznych; w szczególności ziemia krąży dokoła słońca nie tylko po stożkowej (a więc po pewnym tworze rzutowym), nie tylko po pewnej elipsie (a więc po tworze afinicznym), ale krąży po takiej elipsie, w której ognisku znajduje się słońce (a pojęcie ogniska należy do geometrii metrycznej). Również szczególna i ogólna teoria względności wychodzą od pojęcia odległości, uogólniając je w postaci formy metrycznej niekoniecznie dodatnio określonej lub też odpowiednio — tensora metrycznego. Także przy badaniu przestrzeni nieeuklidesowych szczególną rolę odgrywają modele metryczne (np. model Kleina–Beltramiego geometrii Łobaczewskiego). Ponadto badanie specjalnych przestrzeni metrycznych (takich jak przestrzenie euklidesowe czy też ciągowa przestrzeń Hilberta l^2) oraz uogólnień przestrzeni

metrycznych (takich jak przestrzenie topologiczne czy jednostajne) okazało się płodne i doprowadziło do rozwoju nowych działów geometrii. To centralne położenie pojęcia przestrzeni metrycznej pozwala posłużyć się nim do wyróżnienia struktur i kategorii geometrycznych.

Powiemy mianowicie, że struktury geometryczne są to struktury podporządkowane (lub równe) strukturze metrycznej. Natomiast kategorie geometryczne mają za obiekty zbiory z pewną strukturą geometryczną, bądź są podkategoriami takich kategorii. W szczególności geometryczne są: kategoria przestrzeni metrycznych i przekształceń nie powiększających odległości, kategoria przestrzeni topologicznych i przekształceń ciągłych (lub otwartych), kategoria L^*–przestrzeni i przekształceń ciągłych, kategoria przestrzeni jednostajnych i przekształceń jednostajnych, kategoria przestrzeni z bliskością i przekształceń zachowujących bliskość. Teorie niezmienników izometrii, homeomorfizmów, homeomorfizmów jednostajnych i ekwimorfizmów są więc geometriami. Struktura w obiektach kategorii nie wyznacza na ogół jednoznacznie zbioru morfizmów. Możemy więc, zachowując tę samą klasę obiektów (na przykład przestrzenie metryczne), rozpatrywać różne klasy morfizmów (na przykład przekształcenia Lipschitzowskie lub ciągłe) otrzymując różne geometrie (geometrię podobieństw przestrzeni metrycznych lub topologię tych przestrzeni).

Przechodząc do podkategorii wymienionych wyżej kategorii wnosimy, że na przykład kategoria wielościanów i przekształceń symplicjalnych (punktowych) oraz kategoria absolutnych retraktów otoczeniowych i r-przekształceń są kategoriami geometrycznymi. Prowadzą one do geometrii wielościanów i teorii retraktów. Natomiast kategoria kompleksów symplicjalnych i przekształceń symplicjalnych nie jest geometryczna. Kategorie przestrzeni kartezjańskich i przekształceń nie powiększających odległości, Lipschitzowskich, liniowych lub ciągłych — są geometryczne. Prowadzą one do geometrii metrycznej, podobieństw, afinicznej oraz do topologii w przestrzeniach kartezjańskich. Natomiast kategoria przestrzeni i przekształceń liniowych nie jest geometryczna. Linia demarkacyjna jest tu wyraźnie zaznaczona: w przestrzeniach kartezjańskich działania liniowe prowadzą do kategorii geometrycznej i pewnej geometrii (mianowicie afinicznej), ale tylko dzięki temu, że działania te dają się określić na wektorach za pomocą odległości. Natomiast w dowolnych przestrzeniach liniowych jest to niemożliwe. Struktura liniowa jest więc podporządkowana w sensie Bourbakiego strukturze metrycznej, ale tylko w zakresie przestrzeni kartezjańskich i ciągowej przestrzeni Hilberta l^2. Kategoria przestrzeni i przekształceń rzutowych jest geometryczna, jako podkategoria kategorii przestrzeni topologicznych i przekształceń ciągłych.

Na zakończenie tej części rozważań zauważmy, że historycznie ukształtowane nazwy działów geometrii nie odzwierciedlają jasno treści i wzajemnych powiązań. Określenie dziedziny głównej za pomocą rzeczownika, a pomocniczej — za pomocą przydawki przymiotnej prowadzi z czasem do zatracenia rzeczywistego znaczenia, jak jest na przykład w przypadku geometrii algebraicznej, którą różne systemy klasyfikacji przedmiotowej wyliczają już między działami algebry. Porównując nazwy

topologii algebraicznej i topologii różniczkowej widzimy, że w każdym z tych przypadków inna jest rola przymiotnika. Rozszyfrowanie nazwy jest tu zresztą łatwiejsze, gdy zauważymy, że istnienie funktorów prowadzących od jednej kategorii do drugiej odróżnia kategorię główną od pomocniczej. Tak więc topologia algebraiczna jest topologią (na przykład wielościanów) posługującą się algebrą (na przykład teorią modułów), gdyż pewne funktory (na przykład homologii) prowadzą z kategorii wielościanów w kategorię modułów. Podobnie geometria tzw. analityczna jest geometrią posługującą się algebrą (teorią przestrzeni liniowych), gdyż istnieje naturalny funktor z kategorii przestrzeni euklidesowych w kategorię przestrzeni liniowych (polegający na wprowadzeniu układu współrzędnych). W przykładach tych nie mamy więc do czynienia ze strukturami złożonymi, a tylko ze stosunkiem przedmiot—narzędzie. Natomiast topologia różniczkowa jest przykładem dziedziny opartej wyraźnie na strukturze złożonej w sensie Bourbakiego. Musimy ponadto godzić się z używaniem określeń przymiotnikowych wyraźnie umownych, jak na przykład w nazwie topologia ogólna.

3. Tradycyjnym zwyczajem dzieli się topologię na cztery główne działy: topologię ogólną (zwaną dawniej mnogościową), topologię algebraiczną (dawniej — kombinatoryczną), topologię różniczkową i topologię geometryczną. K. Kuratowski i A. Lelek podając ten podział (por. [2]) wyróżniają jeszcze obok topologii geometrycznej tzw. topologię metryczną; tutaj dla uproszczenia oba te działy będziemy traktować łącznie.

Do topologii ogólnej zalicza się problematykę związaną ze sposobami wprowadzania topologii i pewnych struktur pokrewnych, badanie różnych klas przestrzeni topologicznych i ich związków, teorię wymiaru, badanie operacji na przestrzeniach, wreszcie — badanie przekształceń i ich przestrzeni. Topologia ogólna charakteryzuje się bliskimi powiązaniami z teorią mnogości i jej podstawami.

Topologia algebraiczna zajmuje się stosowaniem metod algebraicznych w topologii. Inicjuje więc wprowadzanie dodatkowych struktur przydatnych do tego celu (kompleksy symplicjalne, CW-kompleksy, rozmaitości, przestrzenie włókniste). Buduje pewne funktory z kategorii topologicznych w algebraiczne (funktory homologii, homotopii i dwoiste do nich). Bada algebraiczne niezmienniki zanurzeń i immersji. Rozwijanie samego aparatu algebraicznego nie należy już w zasadzie do topologii, a do takich dziedzin, jak algebra homologiczna, teoria kategorii, teoria snopów itp.

Topologia różniczkowa jest teorią niezmienników dyfeomorfizmów. Zajmuje się ona rozmaitościami różniczkowalnymi (gładkimi), stosując zaawansowany aparat topologii algebraicznej. Problematyka topologii różniczkowej jest albo specyficzna (np. teoria kobordyzmu), albo polega na dostosowaniu problematyki czysto topologicznej do wzbogaconej struktury (problemy gładkiego zanurzania i immersji, rozwłóknienia, pola wektorowe).

Po tym krótkim omówieniu staje się widoczne, że szeregu faktów topologicznych nie można zakwalifikować do żadnego z trzech wyliczonych wyżej działów topologii.

Jedną grupę stanowią twierdzenia takie jak: Brouwera o punkcie stałym, Brouwera o niezmienniczości obszaru, Borsuka o antypodach, czy Borsuka o charakteryzacji rozcinania sfer. Wszystkie one dotyczą albo samej przestrzeni euklidesowej, albo specjalnych jej podzbiorów, takich jak kula czy sfera. Trudno więc byłoby zaliczać je do topologii ogólnej. Z drugiej strony, przy dowodach tych twierdzeń nie unika się (a czasem nie można uniknąć) stosowania metod topologii algebraicznej. Do tej samej grupy można zaliczyć rozwijające się obecnie: teorię położenia w przestrzeniach euklidesowych, teorię rozkładu tych przestrzeni na iloczyny kartezjańskie oraz topologię rozmaitości nieskończenie wymiarowych.

Drugą grupę stanowią takie teorie, jak teoria retraktów, teoria kształtu, czy teoria punktów stałych. W zasadzie mogą one dotyczyć szerokich klas przestrzeni; formalnie należą więc do topologii ogólnej. Jednakże punkt ciężkości każdej z tych teorii zarówno w odniesieniu do twierdzeń, jak i przykładów leży w zakresie przestrzeni o prawidłowej budowie, zwykle metrycznych i ośrodkowych, a nawet metrycznych i zwartych (kompaktów). I te teorie często posługują się metodami algebraicznymi, czego o czystej topologii ogólnej powiedzieć się nie da.

Przedstawiona powyżej problematyka wchodzi w zakres topologii geometrycznej, dziedziny tkwiącej w obrębie topologii od samego jej początku istnienia, a od pewnego czasu emancypującej się do postaci odrębnego działu. Proces ten nie jest jeszcze zakończony i trudno jest ściśle określić przedmiot i metody tej gałęzi topologii. Wydaje się, że topologia geometryczna zajmuje się w zasadzie podzbiorami kostki Hilberta, przy czym rozpatruje raczej przestrzenie o prawidłowej, niepatologicznej strukturze (na przykład przestrzenie *ANR*). Interesują ją przy tym szczególnie te problemy topologiczne, które powstały na podłożu geometrycznym i mają pewien sens geometryczny. Nie unika ona stosowania metod algebraicznych, ale podkreśla ich usługowy charakter. Można by powiedzieć, że topologia geometryczna zajmuje się tymi zagadnieniami, które można „widzieć" przy prawidłowo rozwiniętej wyobraźni geometrycznej. Odbiciem tych intuicji są poglądowe nazwy, jakie otrzymuje wiele twierdzeń z tego zakresu, np. twierdzenie o zaczesaniu, o wymiataniu, o parasolach itp.

4. W Polsce tradycyjnie prowadzono badania w zakresie topologii ogólnej i geometrycznej. W okresie międzywojennym „szkoła warszawska" ugruntowała pozycję topologii polskiej w tych działach. Po wojnie badania z zakresu topologii ogólnej i geometrycznej koncentrowały się w Warszawie i Wrocławiu. Podsumowaniem dorobku tych nowych i najnowszych badań są monografie K. Kuratowskiego (*Topology* I i II), K. Borsuka (*Theory of retracts*) i R. Engelkinga (*Outline of general topology*). Wszystkie one cieszą się zasłużonym uznaniem na całym świecie; w przygotowaniu są dalsze monografie (*Teoria kształtu* i *Teoria wymiaru*). Wydaje się, że planując dalszy rozwój topologii w Polsce należy jak najpełniej wykorzystać pozytywy tej sytuacji. Chodzi tu zarówno o wspomnianą wyżej pozycję w matematyce światowej, o uznane zalety Fundamenta Mathematicae, jak i o istnienie aktywnego naukowo środowiska topologów młodszego i najmłodszego pokolenia wykształ-

conych w warunkach ciągłości tradycji. Topologia ogólna i geometryczna są obecnie jedynymi działami, w których mamy podstawy i szanse utrzymania się w konkurencji na poziomie światowym. Nie bacząc więc na kaprysy zmiennej mody, należy podtrzymywać i rozwijać współpracę z ośrodkami o podobnym profilu: w zakresie topologii ogólnej — z Moskwą i aktywnymi środowiskami amerykańskimi (np. Seattle i Pittsburgh), a w zakresie topologii geometrycznej — z Zagrzebiem (S. Mardešić), Bukaresztem (A. Deleanu), Berlinem (H. Bothe) oraz z tymi ośrodkami amerykańskimi, w których aktualnie przebywają R. D. Anderson, S. Armentrout, R. H. Bing, E. Fadell, R. H. Fox, J. Segal i inni.

W pewnych działach, jak np. w rozwijanej obecnie intensywnie przez K. Borsuka i jego uczniów teorii kształtu, współpraca ta ma wyraźnie charakter wiodący i doprowadziła już do pięknych wyników. Odkrycie przez T. A. Chapmana związków teorii kształtu z teorią rozmaitości nieskończenie wymiarowych oraz wyniki C. Bessagi i jego uczniów w zakresie topologii tych rozmaitości należą niewątpliwie do znakomitych osiągnięć współczesnej topologii geometrycznej. W tych działach, w których jesteśmy tylko partnerami równorzędnymi lub nawet podrzędnymi, współpraca naukowa jest również niezwykle pożądana. Szczególne nadzieje budzą umacniające się ostatnio kontakty ze środowiskiem młodych topologów Uniwersytetu Moskiewskiego.

W zakresie pozostałych działów topologii należy uczyć się, na tyle przynajmniej, by móc obserwować postęp wiedzy. Realnie choć pesymistycznie patrząc, twórcze rozwijanie działów nowych na gruncie polskim można planować raczej w nowo tworzących się ośrodkach i środowiskach. Tak na przykład młody ośrodek gdański wykazuje ukierunkowanie w zakresie topologii algebraicznej, a ośrodek śląski — w zakresie topologii ogólnej. Szczególnie przykład Gdańska jest pouczający, jak w ciągu kilku lat może powstać w mniejszym mieście, dosłownie od podstaw, aktywny, prężny i atrakcyjny dla innych ośrodek naukowy, i to w dziedzinie dotychczas zupełnie w Polsce nie uprawianej. Gdyby natomiast stanąć na bardziej optymistycznym stanowisku, to wydaje się, że najwłaściwszym punktem do przerwania błędnego koła braku tradycji w pewnych dziedzinach jest środkowy etap studiów uniwersyteckich. Wychodząc z tego założenia, już obecnie fakultatywne zajęcia z topologii powinny obejmować znacznie szerszy wachlarz tematów niż dotychczas.

Należałoby również rozszerzyć nurt nauczania geometrii i topologii w zakresie pierwszych lat studiów uniwersyteckich. Dotychczasowe tendencje, przejawiające się np. w likwidowaniu wykładu geometrii różniczkowej, czy też ograniczaniu treści geometrycznych na korzyść innych działów matematyki, są dość niepokojące. Geometryczny punkt widzenia jest bowiem doskonałym antidotum na zbytnią formalizację i werbalizm. Współczesne tendencje bourbakizacji nauczania matematyki na wszystkich jego etapach prowadzą często do biegłego opanowania standardowych metod przy uderzającej nieporadności myślenia w sytuacjach nietypowych. Ludzie pracujący dłużej z młodzieżą akademicką mogliby tu przytaczać nie kończącą się listę przykładów. Tymczasem problem, dla którego rozwiązania istnieje gotowa metoda, nie jest już problemem, tylko ćwiczeniem. Rysuje się więc

niebezpieczeństwo jednostronnego wykształcenia z predyspozycją do żonglowania modnymi teoriami matematycznymi, a bez przygotowania do samodzielnego rozwiązywania konkretnie postawionych problemów. Wydaje się, że dobrze zaplanowany cykl wykładów z geometrii i topologii, w których treści geometryczne nie są zdominowane i zaciemnione przez aparat algebraiczny, może odegrać pozytywną rolę w prawidłowym wykształceniu matematycznym.

Prace cytowane

[1] G. Choquet, *Analiza i Bourbaki*, Wiadom. Mat. 7 (1963), str. 99–120.
[2] K. Kuratowski i A. Lelek, *Topologia*, Wielka Encyklopedia Powszechna, Warszawa 1968, str. 579–582.
[3] Z. Semadeni, *Struktury w sensie Bourbakiego i kategorie*, Prace Mat. 10 (1966), str. 37–50.