

Siła Coriolisa i jej następstwa jako temat lekcji geografii w szkole ogólnokształcącej

UZASADNIENIE PODJĘCIA TEMATU

Program nauczania geografii w 10-letniej szkole ogólnokształcącej przewiduje hasła: Konsekwencje obrotowego ruchu Ziemi (kl. V), Cyrkulacja powietrza atmosferycznego, Mapy synoptyczne, Prądy morskie (kl. VI). Aczkolwiek więc w programie nie przewidziano tematu: Siła Coriolisa, tym niemniej nie można sensownie realizować wymienionych haseł programu bez poruszenia tego tematu. Nauczyciel nie ma przy tym możliwości odwołania się do materiału z lekcji fizyki. Interesujący nas temat całkowicie bowiem pominięto w programie nauczania fizyki, ale gdyby nawet go uwzględniono, nie byłoby czasowej korelacji między nauczaniem fizyki i geografii.

W szkolnych podręcznikach geografii, w metodycznych zaleceniach, a nawet w niektórych akademickich podręcznikach geografii i popularnych dziełach meteorologicznych spotkać można błędne tłumaczenia działania siły Coriolisa. Najtypowszym objawem niezrozumienia omawianego tematu jest zalecane przez niektórych dydaktyków doświadczenie, mające upogładowić siłę Coriolisa, a polegające na tym, że na obracający się globus upuszcza się kroplę wody czy atramentu i stwierdza zbaczanie owej kropli ku zachodowi. Błąd takiego poglądowego nauczania polega na tym, że owa kropla pochodzi z zewnątrz obracającego się układu unoszenia i zawsze zboczy na zachód. W jednym z popularnych podręczników meteorologii autor błędnie uzasadnia, że siła Coriolisa działa skośnie w stosunku do kierunku wiatru, a nie prosto-

padle do niego. Inny autor ogranicza działanie siły Coriolisa do ruchu płynów (cieczy i gazów). Bardzo częstym błędem jest pogląd, jakoby siła Coriolisa prowadziła do odchylenia ciała od pierwotnego kierunku ruchu, po czym przestawała działać, jak gdyby spełniwszy swe zadanie.

MIEJSCE TEMATU W TOKU NAUCZANIA GEOGRAFII

Zanim podam wskazania co do realizacji tematu: *Siła Coriolisa* — na lekcjach geografii, trzeba omówić jego miejsce w toku nauczania. W klasie V uczymy młodzież, że Mikołaj Kopernik „udowodnił”, iż nie sklepienie niebieskie obraca się wokół swej osi, iż obserwowany ruch sklepienia niebieskiego wraz ze Słońcem i innymi ciałami niebieskimi jest tylko ruchem pozornym, a ruchem rzeczywistym jest obrotowy ruch Ziemi. Nie dajemy przy tym żadnych dowodów, czy bodaj argumentów, które by Kopernik podawał na poparcie swej hipotezy.

Przy okazji pragnę mocno podkreślić rolę historii nauki w rozwoju praktycznej i teoretycznej dydaktyki. Znając pewne epizody z historii rozpowszechniania teorii Kopernika, przez analogię między filogenezą a ontogenezą, możemy przewidzieć, na jakie opory natrafia umysł ucznia w przyjmowaniu pewnych teorii, które dziś nam dorosłym wydają się oczywiste, ale w czasach Kopernika były absurdalne dla ówczesnych wielkich uczonych. W naszej wyobraźni zobaczyliśmy wirującą Ziemię, obiegającą wokół Słońca, i te ruchy są dla nas czymś oczywistym. Wielu jednak nauczycieli nie umie znaleźć przekonujących argumentów za przyjęciem teorii Kopernika. Słyszałem poważnego dydaktyka-nauczyciela akademickiego, który tłumaczył, że zjawisko dnia i nocy jest wystarczającym dowodem na obrotowy ruch Ziemi. A przecież to samo zjawisko występowałoby, gdyby w myśl teorii Ptolemeusza Słońce obiegało wokół Ziemi.

Przeciwnicy Kopernika argumentowali, że nie można przyjąć jego teorii, ponieważ gdyby była prawdziwa, odczuwalibyśmy huraganowy wiatr wschodni z prędkością $2\pi R \cos \varphi$ na dobę, to jest na naszej szerokości geograficznej ok. 290 m/s, czyli 1050 km/godz. Nie rozumieli bowiem, że ziemską atmosferę jest częścią Ziemi i wraz z nią podlega ruchowi obrotowemu, a nie Ziemia obraca się w atmosferze, która ją otacza, ale jest poza nią. Owo „doświadczenie” z kroplą wody na obracającym się globusie jest podyktowane właśnie takim błędnym rozumowaniem. Kropla wody w tym doświadczeniu pochodzi spoza obracającego się układu.

Nie mogę powstrzymać się od kilku dygresji. Gwałtownie zwalczam wyrażenie w piśmie: deszcz spada na powierzchnię Ziemi, ukształtowanie powierzchni Ziemi itp. Skoro Ziemia jest przez wielkie Z, mamy na myśli

planetę, a jej powierzchnia — to górna granica atmosfery. Analogicznie sprzeciwiam się zdaniu, że najbardziej zewnętrzną częścią powłoki ziemskiej jest litosfera. Przecież zarówno atmosfera, jak i hydrosfera są bardziej zewnętrzne, a litosfera jest najbardziej wewnętrzną częścią powłoki, skoro niżej znajdująca się sfera ziemska nie należy do powłoki, lecz jest płaszczem Ziemi.

Drugi zarzut przeciw teorii Kopernika wynikał z obserwacji ciał swobodnie spadających. Według oponentów teorii Kopernikańskiej ciała swobodnie spadające, skoro by Ziemia obracała się, powinny upadać daleko za zachód od kierunku pionowego. Skoro bowiem w czasie kilku sekund potrzebnych spadającemu ciału na odbycie drogi do powierzchni terenu ów teren — wraz z obrotowym ruchem Ziemi — wykonuje ruch z prędkością kilkuset metrów na sekundę, spadające ciało powinno upaść z bardzo znacznym odchyleniem od pionu. A przecież tego nie można zaobserwować. Kopernik nie umiał odeprzeć tych zarzutów, ani nie umiał inaczej uzasadnić faktu, że za jego czasu nie zdołano zaobserwować rocznej paralaksy gwiazd stałych, jak tylko przyjmując sferę gwiazd stałych. Odpowiedź na pierwsze dwa zarzuty dał dopiero Galileusz. Wzmocnił ją Newton, a paralaksę odkryto dopiero w r. 1837.

Zadaniem nauczyciela jest w pierwszym rzędzie uzasadnić, że obserwowane ruchy sfery niebieskiej i Słońca dadzą się wyjaśnić jako następstwa obrotowego i obiegowego ruchu Ziemi. Młodzież ma słabo rozwiniętą wyobraźnię przestrzenną i nie umie przejść z układu heliocentrycznego w geocentryczny (topocentryczny) ani odwrotnie. Takie przejście wydaje się jej zbędne, skoro wbijamy jej do głowy, że obserwowane ruchy są tylko pozorne, a w rzeczywistości Słońce wcale się nie porusza, ruchy Słońca — to tylko nasze złudzenie. Już w programie przedmiotu „Środowisko społeczno-przyrodnicze” w kl. II znalazły się hasła: Pozorna wędrówka Słońca po sklepieniu niebieskim — a nieco dalej: Obserwacja Słońca przesuwanego się po sklepieniu niebieskim ruchem pozornym.

W programie tym niesłusznie użyto terminu: „ruch pozorny” oraz „ruch po sklepieniu niebieskim”. Dobowy ruch Słońca nie odbywa się po sklepieniu niebieskim (po sferze niebieskiej), lecz skoro wszelkie ciała niebieskie uczestniczą w tym ruchu, skoro cała sfera niebieska obraca się, należy określić dobowy ruch Słońca jako ruch wraz ze sferą niebieską, natomiast ruch po sferze — to roczny ruch Słońca po ekliptyce. Co zaś tyczy pozorności tego ruchu, to czy przyjdzie komuś na myśl, że jadąc z Bochni do Krakowa pociągiem nie odbywa rzeczywistego ruchu, lecz tylko pozorny? A przecież Bochnia biorąc udział w obrotowym ruchu Ziemi porusza się na wschód z prędkością ok. 1050 km/godz. Z taką samą prędkością porusza się Kraków. Jadąc pociągiem na zachód z prędkością około 50 km/godz poruszamy się w rezultacie składania obu ruchów z prędkością ok. 1000 km/godz na wschód. To nie pociąg jedzie do Krakowa, pociąg ucieka przed Krakowem, ale Kraków go dogoni, bo porusza się prędzej o 50 km/godz. Gdybyśmy jeszcze chcieli „uściślić” nasze wypowiedzi, musielibyśmy uwzględnić ruch Ziemi po orbicie i ruchy Słońca wraz z całym systemem słonecznym w Galaktyce, a może

i ruch Galaktyki względem jakiegoś bezwzględnie w spoczynku pozostającego układu odniesienia. Ale takiego układu nie znamy, pewnie go nie ma. Każdy ruch jest względny i rozpatrywać go musimy w przyjętym układzie odniesienia.

Skoro Ziemia porusza się względem układu słonecznego (heliocentrycznego), to tym samym Słońce porusza się względem układu geocentrycznego. O pozornym ruchu możemy mówić tylko wtedy, kiedy obserwujemy zmianę położenia w przyjętym układzie, mimo że obserwowane ciało nie zmienia swego położenia w tym układzie. Dzieje się to na przykład wtedy, gdy promień świetlny od przedmiotu do naszego oka napotyka po drodze zmienne środowisko optyczne. Kiedy obserwujemy daleki przedmiot tuż nad rozgrzaną asfaltową jezdnią, wydaje się nam, że on drga, że skacze, porusza się. Zjawisko to jest wywołane zmieniającą się refrakcją światła w nagrzanym i poruszającym się powietrzu nad asfaltową powierzchnią. Kiedy Słońce obserwujemy przed zachodem, wydaje się nam, że jego tarcza podlega spłaszczeniu wzdłuż pionowej osi. Dolny jej skraj jak gdyby zwalniał w swym ruchu w stosunku do górnego skraju. Jest to również wynikiem zmian refrakcji. Inne pozorne ruchy mogą być zwykłymi przywidzeniami, jak owo zataczanie się przedmiotów, kiedy to pijany Pan Zagłoba wypowiedział pamiętne: Azali ja jeden trzeźwy in Universo?

Obserwowany przez nas ruch Słońca powinniśmy nazywać ruchem widomym. Składa się na niego pozorny ruch wywołany zmianami refrakcji i aberracji światła oraz rzeczywisty ruch względem przyjętego topocentrycznego układu. Położenie ciała niebieskiego poprawione przez eliminowanie wpływu refrakcji i aberracji astronom określa jako prawdziwe, a więc zmiany tego położenia, czyli ruchy są prawdziwe. Oczywiście owe ruchy są względne, ale każdy ruch jest względny. Ruch bowiem można określić tylko w przyjętym układzie odniesienia.

Pomiędzy układami odniesienia zachodzą jednak różnice. Kiedy fizyk rozpatruje w laboratorium zjawiska mechaniczne z niewielką aczkolwiek zadowalającą dokładnością, może przestrzeń swego laboratorium uznać za określony układ odniesienia, w którym obowiązują wszelkie prawa mechaniki Newtonowskiej. Taki układ nazwiemy układem inercyjnym. Jeśli jednak zwiększymy wymagania co do dokładności i będziemy obserwowali ruchy odbywające się z większą prędkością i na dłuższych drogach, wtedy okaże się, że Newtonowskie prawa w tym układzie są zbyt mało dokładne. Takiego układu nie można uznać za inercyjny. Jeśli jednak uwzględnimy obrotowy ruch Ziemi w układzie heliocentrycznym, a laboratoryjny układ uznamy jako znajdujący się w układzie unoszenia, wtedy mechanika Newtonowska odzyska swą moc obowiązującą z zadowalającą dokładnością. Jeśli jeszcze zwiększymy wymagania i będziemy rozpatrywać ruchy zachodzące z prędkością zbliżoną do prędkości światła, wtedy odrzucimy Newtonowską mechanikę, będziemy stosować Einsteinowskie teorie względności.

W klasie V program geografii zaczyna się od hasła: Ziemia w układzie słonecznym — heliocentryczna teoria Kopernika. Hasła te poprzedza tytuł

rozdziału: Krajobrazy świata. Program trzeba zmodyfikować. Tytuł rozdziału winien brzmieć: Ziemia jako planeta. Pierwszy podrozdział powinien być zatytułowany: 1. Kształt i rozmiary Ziemi. Pod tym tytułem znalazłyby się hasła: Dobowy ruch sfery niebieskiej. Biegun niebieski, jego wysokość w zależności od miejsca obserwacji. Dawne wyobrażenia kształtu Ziemi. Dowody na zbliżony do kuli kształt Ziemi. Zasada pomiaru Eratostenesowego. Pojęcie szerokości geograficznej i jej określanie na podstawie pomiaru wysokości bieguna niebieskiego. Równoleżniki jako okręgi o jednakowej szerokości geograficznej, wskazujące kierunek wschód-zachód. Południki jako linie wskazujące kierunek północ-południe. Ich zbieżność w biegunach ziemskich. Globus jako model Ziemi.

Podrozdział drugi należy zatytułować: Obrotowy ruch Ziemi; trzeci zaś — Obiegowy ruch Ziemi.

Te propozycje zmian winniem uzasadnić. Przede wszystkim w dotychczasowym programie hasło: Ziemia w układzie słonecznym — jest mylące. Jak bowiem należy rozumieć „układ słoneczny”? Czy chodzi o uporządkowanie przestrzeni, o układ odniesienia ze środkiem w Słońcu, czy też o System Słoneczny, tj. Słońce wraz z obiegającymi je planetami, ich satelitami, kometami i pyłami w przestrzeni międzyplanetarnej. Myślę, że autorzy programu to drugie mieli na myśli. Jeśli nawet użyto by terminu „układ”, to powinno się pisać Układ Słoneczny dużymi literami, nazwa ta bowiem jest imieniem własnym indywidualnego zbioru ciał niebieskich.

Oficjalny program narzuca apodyktyczny tok nauczania. Postępowanie w nim jest dedukcyjne. Bez uzasadnienia narzuca się młodzieży teorię Kopernika, a następnie bada konsekwencje a priori przyjętej teorii. Aby wdrożyć młodzież w naukowy tok rozumowania, należy porządek rzeczy odwrócić. Trzeba wychodzić od obserwacji dostępnych naszym zmysłom, a dopiero na ich podstawie budować teorię wyjaśniającą. W związku z powyższym należałoby rozważyć, czy nie należy całego rozdziału „Ziemia jako planeta” przenieść na dalsze miejsce. W pierwotnej koncepcji programu proponowałem ukazanie młodzieży szeregu obrazów z różnych szerokości geograficznych. Przy każdym takim obrazie zwracano by uwagę na widome ruchy Słońca. Młodzież byłaby poinformowana, że w Arktyce w lecie przez cały sezon Słońce porusza się nad widnokregiem ruchem zgodnym z ruchem wskazówek zegara, w Antarktydzie zaś analogiczny ruch odbywa się w przeciwną stronę. Poinformowana byłaby młodzież, że w równikowej puszczy w marcu i wrześniu obserwuje się Słońce górujące w zenicie lub blisko niego, że od marca do września góruje ono po stronie północnej, a od września do marca po południowej itd. Dopiero po takiej wędrówce po świecie, odbytej jedynie w naszej wyobraźni, przystąpilibyśmy do wyjaśnienia tych różnic w widomych ruchach Słońca.

W razie przyjęcia takiej koncepcji programu w pierwszej fazie nauczania ukazano by młodzieży strefowe zróżnicowanie krajobrazów na wybranych przykładach, po tym nastąpiłoby wyjaśnianie tego zróżnicowania i tu do-

piero byłoby miejsce na rozdział: Ziemia jako planeta. W trzeciej fazie można by dokonać przeglądu poszczególnych kontynentów i uzupełnić obrazowe nauczanie, ukazując krajobrazy o dominancie niestrefowej, w szczególności uzależnione głównie od geologicznej struktury, od stadium rozwoju rzeźby czy od sąsiedztwa z morzem. Tak ułożony program dawałby okazje do nauczania problemowego. Dopiero po omówieniu dobowego ruchu sklepienia niebieskiego wraz ze Słońcem można postawić pytanie: czy w świetle praw mechaniki można przyjąć ziemski układ jako inercyjny? Oczywiście samo sformułowanie pytania musi być inne, dostosowane do umysłowości młodzieży w klasie V.

Rozumowanie winno przejść następujące fazy. Po pierwsze: czy ruchy sfery niebieskiej względem Ziemi nie mogą być pomyślane jako ruchy względne w stosunku do obracającej się Ziemi? W tym celu trzeba znaleźć sposób przejścia z układu topocentrycznego w heliocentryczny. Bardzo dobrym sposobem takiego przejścia jest „sprowadzenie” Słońca na Ziemię przez wprowadzenie pojęcia: punkt podsłoneczny. Pisałem o tym w „Geografii w Szkole” i nie będę tu powtarzał treści tamtego artykułu.

Po demonstracji dobowego ruchu punktu podsłonecznego, a więc dobowego widomego ruchu Słońca, możemy dojść do wniosku, że takich samych obserwacji dokonamy z obracającej się Ziemi przyjąwszy nieruchomą sferę niebieską jak z nieruchomej Ziemi wobec poruszającego się wraz z niebieską sferą Słońca. Zachodzi teraz sytuacja problemowa: który pogląd należy przyjąć, który lepiej można uzasadnić. Wtedy dopiero nadejdzie czas na wprowadzenie tematu: *Sila Coriolisa i jej objawy*.

METODY NAUCZANIA O SILE CORIOLISA

W praktyce szkolnej ogólne prawa odkryte i sformułowane przez Coriolisa winniśmy rozbić na prawa częściowe, dla poziomu intelektualnego rozwoju młodzieży w klasie V nie jest bowiem dostępny tok rozumowania Coriolisa, zwłaszcza zastosowany przez niego rachunek wektorowy i różniczkowy. To sprawiałoby trudności nie do pokonania nawet wielu nauczycielom z wyższym wykształceniem, ale bez należytego przygotowania w zakresie matematyki. Na wstępie rozważymy doświadczenie z wahadłem Foucaulta, następnie swobodne spadanie ciał w obracającym się układzie unoszenia, kolejno zbaczanie ciał poruszających się ze składową poziomą w kierunku południkowym, analogiczne zjawisko przy ruchu w kierunku równoleżnikowym, a dopiero na końcu możemy sformułować ogólną definicję siły Coriolisa, przyspieszenia zastępczego oraz podać wzory na wartość tej siły i owego przyspieszenia. Pominiemy przy tym wektorowe sformułowanie przyspieszenia zastępczego.

Zacznijmy od sytuacji na globusie: Umieścimy na nim małe wahadło na północnym jego biegunie: Globus jest przy tym ustawiony swą osią pionowo. Rozumujemy: jeśli Ziemia obraca się, a płaszczyzna wahań wahadła pozostaje niezmienna wobec przestrzeni gwiazdnej, zaobserwujemy zmianę położenia płaszczyzny wahań względem Ziemi. Zaobserwujemy mianowicie, że płaszczyzna ta obraca się raz na dobę w stronę zgodną z ruchem wskazówek zegara. Wypadałoby teraz ustawić takie wahadło na biegunie ziemskim i zaobserwować jego zachowanie. Rozstrzygnęłoby to problem. Ze względów technicznych nikt takiego doświadczenia nie zrobił, ale można było poprzestać na wykonaniu doświadczenia na mniejszej szerokości geograficznej. Takie wahadło można oglądać we Fromborku, w wieży zwanej wieżą Kopernika. Na biegunie płaszczyzna wahań zmieniałaby swe położenie względem ziemskich południków co godzinę o 15° . Na szerokości geograficznej φ zbieżność południków jest mniejsza niż na biegunie ziemskim. Na równiku styczne do południków nie mają żadnej zbieżności, są równoległe do siebie. Nie zaobserwujemy więc na równiku żadnej zmiany w położeniu płaszczyzny wahań względem Ziemi. Oczywiście względem układu inercyjnego płaszczyzna wahań może się zmieniać, na wahadło bowiem działa siła ciężkości skierowana w coraz innym kierunku. Wbrew twierdzeniu S. Kaleśnika w jego *Geografii fizycznej ogólnej* płaszczyzna wahań wahadła na równiku może ulegać zmianom położenia względem układu inercyjnego. Nie ulega jedynie zmianie, jeśli jest ustawiona prostopadle do osi obrotu Ziemi, a więc równoleżnikowo. Na dowolnej szerokości geograficznej między równikiem a biegunami zbieżność południków jest mniejsza niż na biegunie. Poglądowo możemy to wyjaśnić przykładając styczne do bliskich sobie południków. Przetną się one wzajemnie na przedłużeniu osi ziemskiej w coraz mniejszej odległości w miarę wzrostu szerokości geograficznej. Jeśli chodzi nam o coraz mniejsze różnice długości geograficznej między owymi zbieżnymi południkami, możemy owe styczne przenieść na płaszczyznę, jak to robimy w przypadku konstrukcji stożkowego rzutu Ptolemeusza. Zbieżność takich południków możemy obliczyć mnożąc różnicę długości geograficznej przez sinus szerokości geograficznej lub też mierząc ową zbieżność na siatce kartograficznej w odwzorowaniu stożkowym. W tym jednak przypadku owa zbieżność odnosi się do środkowej szerokości geograficznej danej mapy. W piątej klasie nie musimy sprawy przedstawiać ilościowo, wystarczy stwierdzić, że kąt zbieżności południków wzrasta od zera na równiku do wartości równej różnicy długości geograficznej na biegunie geograficznym.

Zalecam powtórzyć rozumowanie przy ustawieniu wahadła na południowym biegunie globusa. Oczywiście trzeba go obrócić południowym biegunem do góry. Nadamy teraz globusowi ruch, który obserwowany z góry będzie w stronę zgodną z ruchem wskazówek zegara, a więc obserwowane zmiany położenia

płaszczyzny wahań względem powierzchni Ziemi będą w tym przypadku w przeciwną stronę niż na półkuli północnej.

Szczęśliwy ten nauczyciel, który może młodzieży pokazać zachowanie się wahadła Foucaulta np. we Fromborku. Będzie to przekonywający argument za przyjęciem teorii Kopernika w zakresie obrotowego ruchu Ziemi. W Polsce, na szerokości geograficznej ok. 50° , płaszczyzna wahań wahadła zmienia swe położenie o około 12° w ciągu godziny, a pełnego obrotu dokona w ciągu 30 godzin i około 27 minut.

Pozostaje sprawa owych huraganowych wiatrów, które by rzekomo wiały, gdyby Ziemia wirowała. Otóż trzeba tu uświadomić młodzież, że ziemską atmosfera bierze udział w wirowym ruchu, że jest częścią naszej planety, a że w przestrzeni międzyplanetarnej praktycznie nie ma atmosfery, jest niemal idealna próżnia.

ZBACZANIE CIAŁ SWOBODNIE SPADAJĄCYCH

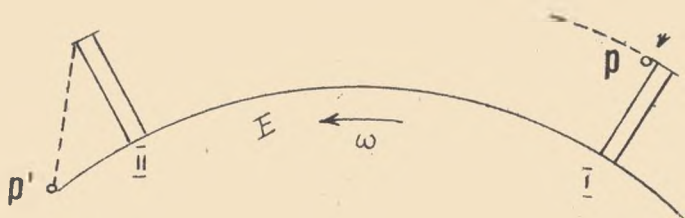
Opowiadają studenci taką anegdotę, że jakiemuś naiwniakowi zaproponowano niezwykle łatwą i prędką podróż do Stanów Zjednoczonych. Otóż winien wznieść się na helikopterze na niewielką wysokość i poczekać 7 godzin, żeby w tym czasie Ziemia wykonała obrót o owych sto kilka stopni, a wtedy opuści się na ziemię już w Ameryce. Przez ten bowiem czas Ameryka „podsunie się” pod helikopter. Zwracam uwagę, że termin Ziemia napisałem raz z wielkiej, raz z małej litery. W pierwszym przypadku chodzi o Ziemię jako planetę, w drugim o ziemię jako podłoże atmosfery, jako powierzchnię terenu. Helikopter nie przestaje być częścią Ziemi, jak długo znajduje się w strefie ziemskiego przyciągania. Zachowuje on prędkość w swym ruchu wokół osi ziemskiej na zasadzie swej bezwładności.

Sprawę wyjaśnimy młodzieży poglądowo. Wyobraźmy sobie, że jedziemy w zamkniętym wagonie, który porusza się z prędkością 10 m/s. Jeśli z wysokości 1,25 m upuścimy swobodnie jakiś przedmiot, spadnie po upływie ok. pół sekundy na podłogę wagonu. W czasie owej pół sekundy wagon odbywa drogę 5 m. Czyżby więc opuszczane ciało miało zboczyć o 5 metrów do tyłu w stosunku do pędzącego pociągu? Tak by było, gdyby upuszczane ciało nie brało udziału w ruchu wagonu, gdyby pochodziło spoza układu unoszenia, jakim w naszym przypadku byłby wagon.

Galileusz po wielu próbach upuszczania kamieni z Krzywej Wieży w Pizie doszedł do odkrycia, że ciała biorące udział w obrotowym ruchu Ziemi zachowują swą prędkość liniową w swym ruchu okrężnym, o ile nie nadamy im innego ruchu. Galileusz odkrył prawo bezwładności.

Wyobraźmy sobie wieżę na równiku wysoką na ok. 80 m. Kątowa prędkość zarówno podstawy wieży, jak i jej wierzchołka są jednakowe, ale inny jest promień okręgu, po którym krąży podstawa wieży, inny — dłuższy o 80 m — promień okręgu, po którym krąży wierzchołek wieży. Obwód drugiego okręgu jest dłuższy o 2 π · 80 m od pierwszego, wobec tego liniowa prędkość wierz-

chołka wieży jest o 5,8336 mm/s większa niż jego podstawy. Jeśli więc upuścimy kamień z wysokości 80 m, to po ok. 4 sekundach spadnie on do poziomu podstawy wieży. Zachowa przy tym liniową prędkość na wschód, wyprzedzi dzięki temu podstawę wieży o ok. 23 mm, jak to przedstawiono na rycinie 1.



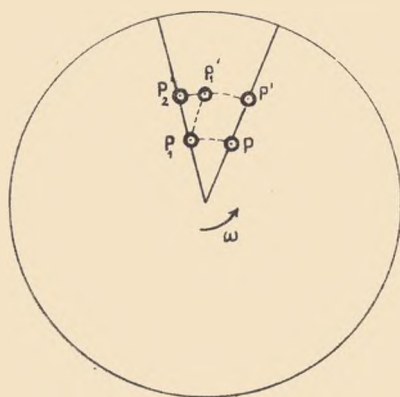
Ryc. 1. SWORODNE SPADANIE Z WYPRZEDZENIEM NA WSCHÓD.

Rysunek wykonany przesadnie bez zachowania proporcji. Ciało upuszczone z położenia P upadnie w miejscu P', równocześnie wieża przemieści się z położenia I w położenie II

A więc wbrew oponentom Kopernika droga jego spadania nie może odchyłać się na zachód, ale przeciwnie — odchyli się na wschód. Jest to jednak odchylenie trudno wymierzalne. Nawet bardzo słaby powiew wiatru może wydatniej zmienić drogę spadającego ciała. Jest jednak wielkie prawdopodobieństwo, że jeśli wielokrotnie powtórzymy doświadczenie, to średnie położenie miejsc upadku kamieni od poziomego rzutu punktu początkowego na wierzchołku wieży będzie odchyłone o około 23 mm na wschód. Niestety w warunkach szkolnych takiego doświadczenia nie możemy wykonać.

RUCH CIAŁA W KIERUNKU POŁUDNIKOWYM

Wyobraźmy sobie, że spoglądamy na Ziemię od strony bieguna północnego, jak to przedstawia rycina 2. Ziemia obraca się w stronę przeciwną do ruchu wskazówek zegara. Ciału znajdującemu się w punkcie P nadaliśmy ruch w kie-



Ryc. 2. ZBACZANIE CIAŁA PORUSZAJĄCEGO SIĘ W KIERUNKU POŁUDNIKOWYM

runku południowym, oznaczony strzałką od P do P' . Wektor PP' na naszym rysunku, jeśli ruch odbywał się poziomo, jest tylko składową prędkością. Z rysunku jednak wynika, że ciało zachowując swą początkową prędkość liniową w kierunku równoleżnikowym po upływie pewnego czasu znajdzie się w punkcie P_1 , jeśli byśmy mu nie nadali innego ruchu. Ponieważ nadaliśmy mu ruch w kierunku południowym, znajdzie się w punkcie P'_1 . W tym czasie punkt P przesunie się w położenie P_1 , zaś punkt P' w położenie P'_2 . Ciało, mimo że nadaliśmy mu ruch w kierunku południowym, zboczyło o odcinek $P'_2P'_1$. Gdybyśmy je chcieli utrzymać w kierunku południowym, musielibyśmy mu nadać przyspieszenie dodatkowe, dzięki któremu winno ono odbyć dodatkową składową drogi z P'_1 do P'_2 . Jeśli droga PP' równa się $v \cdot t$ (prędkość razy czas), to dodatkowa droga ciała wynosi $v \cdot \omega \cdot t$, gdzie ω = kątowa prędkość układu obracającego się w radianach na sekundę. Oczywiście chodzi o prędkość v względem obracającego się układu, i to tylko o jej składową w płaszczyźnie równoleżnikowej. Dodatkowe przyspieszenie wynosi więc $2\omega v$.

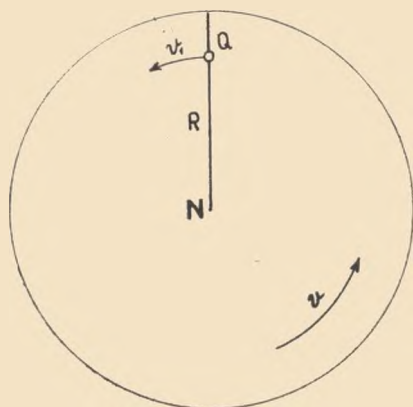
Widzimy z tego, że na półkuli północnej ciało poruszające się w kierunku południowym tak się zachowuje względem powierzchni ziemi, jak gdyby działała nań jakaś siła, nadająca mu przyspieszenie w prawo w stosunku do kierunku ruchu. Jeśli ten ruch jest ku południowi, wtedy ciało tak się zachowuje, jak gdyby nie nadążało za obrotowym ruchem Ziemi, jeśli ku północy — jakby wybiegało naprzód.

RUCH CIAŁA W KIERUNKU RÓWNOLEŻNIKOWYM

Jeśli w obracającym się układzie ciało porusza się ze względną prędkością v w kierunku równoleżnikowym, to jak się okaże, wskutek bezwładności dozna analogicznego przyspieszenia, względem obracającego się układu w prawo od kierunku swego ruchu na półkuli północnej. Można to tak uzasadnić: Jeśli ciało znajdujące się w punkcie Q na rycinie 3 porusza się względem obracającego się układu w stronę jego obrotu, to liniowa prędkość owego ciała jest równa sumie liniowej prędkości punktu Q w obrotowym ruchu układu i liniowej prędkości ciała względem układu: $v_1 + v$. Gdyby miało wykonać ruch po okręgu, musiałaby na nie działać siła dośrodkowa, wywołująca dośrodkowe przyspieszenie $a = \frac{(v_1 + v)^2}{R}$, gdzie R jest promieniem okręgu.

po którym odbywa się ruch. Po podniesieniu dwumianu do kwadratu otrzymamy: $v_1^2 \cdot R + v^2 \cdot R + 2v \cdot v_1 \cdot R$. W tym trójmianie pierwszy wyraz to zwykłe przyspieszenie dośrodkowe w ruchu po okręgu o promieniu R z kątową prędkością obrotowego układu ziemskiego. Gdybyśmy ruch owego ciała rozpatrywali względem nieruchomego układu, to w przypadku prędkości względnej v drugi wyraz byłby wartością dośrodkowego przyspieszenia, jakiego wymaga

względny ruch po okręgu. Pozostaje trzeci wyraz, który możemy przekształcić podstawiając $v_1:R = \omega$. Otrzymujemy dodatkowe przyspieszenie $2\omega v$. Jeśli nie będzie działała siła, która wywoła owo dodatkowe przyspieszenie, ciało będzie się poruszać, jak gdyby działała nań siła w przeciwnym kierunku, doznając przyspieszenia dośrodkowego $2\omega v$. Wynika stąd, że bez względu



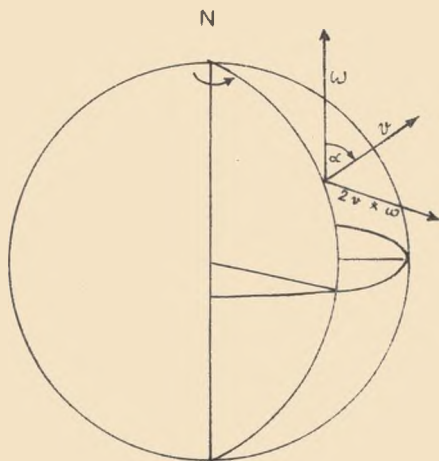
RYC. 3. ZBACZANIE CIAŁA PORUSZAJĄCEGO SIĘ W KIERUNKU RÓWNOLEŻNIKOWYM

na kierunek ruchu względem kierunku promienia równoleżnika ciało poruszające się względem układu unoszenia podlega takiemu samemu pozornemu przyspieszeniu w prawo od swego kierunku ruchu, oczywiście na półkuli północnej. Na południowej owo przyspieszenie jest skierowane w lewo od kierunku ruchu.

Sformułowanie prawa Baera jest więc nieco mylące. Brzmi ono, że wielkie rzeki płynące południkowo na półkuli północnej zbaczą w prawo, na półkuli południowej — w lewo. Mylące jest tu ograniczenie kierunku ruchu do kierunku południkowego. Owo zbaczenie nie zależy bowiem zupełnie od względnego kierunku. Tendencję zbaczenia wykazują wszystkie ciała niezależnie od kierunku ruchu, podlegają mu więc również rzeki płynące równoleżnikowo. Trzeba jednak podkreślić, że tendencja do zbaczenia jest bardzo słaba. Będzie ona niezauważalna, gdy rzeka z innego powodu ma tendencję do zbaczenia. Tak się dzieje w przypadku asymetrii dorzecza. Wisła na odcinku od Oświęcimia do Sandomierza znacznie silniej atakuje swój lewy brzeg, z prawej bowiem strony bystre rzeki karpackie donoszą do niej obfite rumowisko i spychają bieg rzeki na północ, a więc w lewo. Gdzie jednak napływowe stożki rzek karpackich nie występują, tam Wisła wyraźnie wykazuje tendencję odsuwania się od progu Wyżyny Małopolskiej, zgodnie z prawem Coriolisa usiłuje zbroczyć w prawo od kierunku swego biegu. Zbaczenie rzek zaznacza się wyraźnie jedynie w dużych rzekach, mających stosunkowo duże przepływy, a więc dużą prędkość w stosunku do swego spadku ze względu na mniejszy wpływ tarcia o dno i brzegi koryta.

OGÓLNA REGUŁA CORIOLISA

Dotychczas rozpatrywaliśmy przypadki, kiedy ruch odbywa się w płaszczyźnie równoleżnika. Ogólna reguła musi uwzględniać wszelkie kierunki ruchu, a więc i taki przypadek, kiedy ruch ten odbywa się skośnie do niej, kiedy jego kierunek tworzy z kierunkiem osi ziemskiej kąt α (ryc. 4). Wektor



RYC. 4. OGÓLNA REGUŁA CORIOLISA

ruchu v możemy rozłożyć na dwa wektory składowe, jeden w płaszczyźnie równoleżnikowej, drugi — równoległy do osi ziemskiej. Wektor składowy równoległy do osi ziemskiej nie ma żadnego wpływu na siłę Coriolisa. Ciało znajdujące się w ruchu w tym kierunku nie podlega żadnemu przyspieszeniu poza przyspieszeniem dośrodkowym. Wartość drugiego wektora składowego v_x wynosi $v \cdot \sin \alpha$.

Możemy teraz zsumować nasze rozważania. Dojdziemy do przekonania, że siła Coriolisa działa w płaszczyźnie równoleżnika w kierunku prostopadłym do kierunku względnego ruchu. W wektorowej postaci przyspieszenie wywołane siłą Coriolisa można wyrazić jako ilorz wektorowy $2(\vec{v} \times \vec{\omega})$. Interpretacja takiego wzoru jest następująca. Wektor przyspieszenia jest prostopadły do kierunku ruchu względnego oraz do kierunku osi obrotu układu unoszenia, przy czym kierunek osi pojmujemy jako wektor swobodny, tj. ustawiony swym początkiem w miejscu, gdzie w danym momencie znajduje się ciało poruszające się, a skierowany ku północy i równoległy do osi ziemskiej. Zwrot wektora przyspieszenia wywołanego siłą Coriolisa znajdziemy według reguły prawej ręki. Jeśli palec wskazujący zwrócimy w kierunku wektora v , a środkowy w kierunku wektora ω , to wielki palec wskaże kierunek wektora $2(\vec{v} \times \vec{\omega})$. Co do wartości wektor ten równa się $2v \omega \sin \alpha$, przy czym α jest kątem, jaki tworzą wektory v i ω między sobą.

Przyspieszenie Coriolisa nie zachodzi więc, jeśli kierunek wektora v pokrywa się z kierunkiem wektora ω , czyli jeśli ruch względny odbywa się równoległe do osi obrotu układu unoszenia.

W geograficznych rozważaniach ograniczamy najczęściej siłę Coriolisa do przypadku, gdy ruch ciała względem układu odniesienia odbywa się poziomo, a więc równoległe do poziomej powierzchni ziemi. Interesuje nas przy tym jedynie pozioma składowa przyspieszenia Coriolisa. Składowa pionowa nie ma dla nas większego znaczenia. Albo bowiem ujawnia się zwiększeniem siły ciężkości, albo jej zmniejszeniem, nie wpływa na poziomy kierunek ruchu. W takim przypadku możemy nieco inaczej sformułować prawo Coriolisa: Jeśli ciało w powłoce ziemskiej porusza się z poziomą prędkością v względem ziemskiego podłoża, wtedy zachowuje się tak, jakby działała nań siła, która nadaje mu przyspieszenie o składowej poziomej skierowanej na półkuli północnej w prawo, na południowej — w lewo prostopadle do kierunku względnego ruchu, przy czym wartość przyspieszenia wynosi $2\omega \sin \varphi$, gdzie φ jest szerokością geograficzną, zaś ω prędkością obrotowego ruchu Ziemi wyrażoną w radianach na sekundę.

Czytelnika zastanowi, że w takim ujęciu w miejscu kąta α występuje szerokość geograficzna. Jeśli na półkuli północnej wektor v jest zwrócony ku północy, wtedy z wektorem ω tworzy kąt równy szerokości geograficznej, jest to bowiem wysokość niebieskiego bieguna. Wektor przyspieszenia leży wtedy w płaszczyźnie poziomej. Jeśli natomiast kierunek v jest inny, wtedy wartość $\sin \alpha$ jest większa niż poprzednio, trzeba jednak zauważyć, że wtedy wektor przyspieszenia ustawia się skośnie do poziomemu. Interesuje nas jego rzut poziomy. Jego redukcja do poziomu znosi efekt wzrostu wartości sinusa α .

W praktyce szkolnej, w klasie V rozważania na temat siły Coriolisa ograniczyć trzeba do ujęcia pogładowego, bez wprowadzania ścisłych wzorów. Ograniczamy się przy tym do rozpatrywania zmiany poziomego kierunku ruchu. Tak uproszczone prawo podamy w postaci: Jeśli na Ziemi porusza się poziomo jakieś ciało, to zachowuje się tak, jakby oprócz siły ciężkości działała nań dodatkowa siła wywołująca jego zbaczanie w prawo na półkuli północnej, w lewo na południowej. Owo zbaczanie jest tym większe, im większą prędkość ma poruszające się ciało względem powierzchni ziemi. Zbaczanie to zanika na równiku, największą wartość osiąga na biegunach. Występuje ono niezależnie od poziomego kierunku ruchu.

KIERUNEK WIATRU

Najważniejsze zastosowanie reguły Coriolisa w nauczaniu geografii znajdujemy przy rozpatrywaniu kierunku wiatru. Przystępując do tego tematu na początku muszę sprostować mylną definicję wiatru spotykaną w szkolnych

podręcznikach. Akcentuje się bowiem w niej, że wiatr jest postępowym (strumieniowym) ruchem powietrza wywołanym różnicą ciśnień w kierunku od wyżu do niżu barycznego.

Taką regułę uczniowie interpretują, jak to wykazały testy w Olimpiadzie Geograficznej, w taki sposób, że przedstawiając na izobarycznej mapie kierunki wiatrów rysują strzałki jedynie wprost od ośrodka wyżowego do ośrodka niżowego. W definicji wiatru powinniśmy pominąć cechę przyczynową, wystarczy stwierdzić, że wiatrem nazywamy strumieniowy (postępowy) ruch powietrza atmosferycznego ze składową poziomą. Zbędne jest dodawanie przyczyny tego ruchu. Musimy pamiętać bowiem o tym, że ciało raz wprowadzone w ruch z jakiegokolwiek przyczyny porusza się nadal, jeśli jakaś siła go nie zatrzyma w tym ruchu. Sił, które zmieniają prędkość i kierunek ruchu, może być wiele. Hamującą siłą jest tarcie o podłoże i wewnętrzne tarcie powietrza. Działać nadto musi siła Coriolisa.

Omawiając kierunek wiatru nie rozpatrujemy jego powiewów wywołanych bezpośrednio różnicą ciśnień, ale bierzemy pod uwagę takie układy wiatrów, które mogą być względnie trwałe. Taki wiatr, który może wiać przez długi okres czasu bez zmiany prędkości i kierunku, określamy jako wiatr stateczny. Zrozumienie układu wiatrów statecznych jest kluczem do zrozumienia wielu zjawisk meteorologicznych i klimatycznych. Ponieważ wewnętrzne tarcie powietrza jest znikomo małe w porównaniu z innymi siłami działającymi na powietrze, można je pominąć. Tarcie o podłoże musimy uwzględnić rozpatrując wiatry przyziemne, do wysokości 100—200 m nad powierzchnią terenu.

Jeśli powietrze raz wprowadzone w ruch ma zachować swą liniową prędkość i wiać po tej samej drodze, wszystkie działające nań siły muszą być zrównoważone. Skoro zaś na powietrze działa siła gradientu barycznego wynikająca z różnicy ciśnienia w tym samym poziomie, siła Coriolisa i ewentualnie siła odśrodkowa w przypadku ruchu krzywoliniowego względem powierzchni ziemi, wiatrem statecznym nazwiemy taki, który wieje w przypadku zrównoważenia tych sił. Pomijamy przy tym tarcie jako znikome. Skoro na półkuli północnej siła Coriolisa działa w prawo, musi ją równoważyć siła gradientu działająca w lewo. Obie siły będą zrównoważone, gdy wiatr wieje po prostoliniowych izobarach z tym większą prędkością, im większy gradient ciśnienia.

Jeśli izobary układają się kolisto wokół ośrodka ciśnienia, wiatr wiejący po izobarze doznaje dodatkowej siły odśrodkowej. W układzie niżowym siła gradientu działa do środka układu, przeciwdziała mu siła Coriolisa sumująca się z siłą odśrodkową. Na półkuli północnej stateczny jest wiatr, który wieje po izobarze mając po lewej stronie ośrodek niżowy, a więc jest to ruch wirowy (cykloniczny) w stronę przeciwną do ruchu wskazówek zegara. Na półkuli południowej oczywiście wir powietrza kręci się w przeciwną stronę. W przypadku ośrodka wyżowego na półkuli północnej siła odśrodkowa działa zgodnie z kierunkiem gradientu, siła Coriolisa musi równoważyć obie te siły. Ruch odbywa się w stronę zgodną z ruchem wskazówek zegara, ale przy tym samym gradiencie z większą liniową prędkością niż w przypadku ośrodka niżowego.

Można to inaczej ująć: Przy takiej samej prędkości wiatrów w antycyklonie i cyklonie gradienty w antycyklonie są mniejsze.

Rozważmy teraz przypadek niedostosowania wiatru do wyluszczonej poprzednio reguły. Jeśli wiatr wieje z odchyleniem od izobary ku kierunkowi gradientu, powietrze doznaje przyspieszenia. Skoro zaś wzrasta prędkość ruchu, wzrasta siła Coriolisa, a przy tym niż się wypełnia, więc słabnie gradient. Wiatr pod wpływem przeważającej siły Coriolisa zbacza w prawo, ku izobarze. Następuje więc jak gdyby automatyczna regulacja kierunku i prędkości wiatru. Jeśli zaś odchylenie od izobary było w kierunku przeciwnym do kierunku gradientu, wiatr zwalnia, maleje siła Coriolisa, spotęgowany wyż tym bardziej przechyla szalę na korzyść gradientu, wiatr dostosowuje się do kierunku izobary.

Rozważmy teraz cykloniczny układ wędrujący na półkuli północnej i przesuwany się ku północy. Ponieważ w miarę wzrostu szerokości geograficznej wzrasta siła Coriolisa, przeto w takim wędrownym układzie zyskuje ona przewagę. Wiatr teraz wieje — o dziwo — ze składową ku wyższemu ciśnieniu. Pogłębia się niż baryczny, gradient się zwiększa i przywraca równowagę, ale teraz cyklon wiruje na nieco zwolnionych obrotach. Przesuwanie się cyklonicznego układu ku równikowi pociąga za sobą przeciwne skutki. Ponieważ słabnie siła Coriolisa, przeważa zrazu siła gradientu, niż baryczny się wypełnia, równocześnie jednak wiatr się nasila.

W niskich szerokościach geograficznych, gdzie siła Coriolisa jest znikomo mała, ruchy wirowe muszą mieć bardzo wielką prędkość, aby w układzie cyklonicznym siłą gradientu równoważyła siła odśrodkowa ledwo wzmocniona siłą Coriolisa. Stąd owe huraganowe prędkości w cyklonach tropikalnych.

Jeśli rozpatrujemy wiatry wiejące tuż przy podłożu, musimy uwzględnić siłę tarcia o podłoże. Hamuje ona wiatr, a skoro zmniejsza się prędkość wiatru, przewagę zyskuje siła gradientu. Przyziemne wiatry zbaczają z kierunku izobary ku kierunkowi gradientu. Wiatry te tym silniej odchylają się ku niżowi barycznemu, im większe jest tarcie o podłoże, a więc znacznie silniej nad lądem, zwłaszcza o urozmaiconej rzeźbie, niż nad morzem.

ZAKOŃCZENIE

W rozdziale o obrotowym ruchu Ziemi wymienia się zbaczanie wiatru czy rzek jako argument przemawiający za przyjęciem teorii Kopernika odnośnie do obrotowego ruchu Ziemi. Argument ten jest jednak zupełnie nieprzekonywający dla młodzieży, nie widzi ona żadnego związku między tymi zjawiskami. A jeśli próbuje sobie ów związek wyjaśnić, dochodzi do wniosku, że wszelkie ciała w ruchu powinny zbaczać na zachód bez względu na początkowy kierunek ruchu, jak owa kropla wody na globusie. Uważam za wskazane

jako argument za obrotowym ruchem Ziemi przytaczać jedynie doświadczenie z wahadłem Foucaulta. O sile Coriolisa należy moim zdaniem traktować dopiero w klasie VI przy tematach: Cyrkulacja powietrza atmosferycznego; Prądy morskie; Rzeźbotwórcza działalność rzek. Nawet jednak w tej klasie nie można w sposób dostatecznie ścisły wyjaśniać siły Coriolisa, przestać musimy na pogładowym omówieniu tematu bez ilościowego określania siły i przyspieszenia nią wywołanego.

JAN FLIS

LA FORCE DE CORIOLIS ET SES EFFETS
— SUJET D'UNE LEÇON DE GÉOGRAPHIE,
DANS L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

L'auteur justifie d'abord le besoin de traiter «la force de Coriolis», dans le processus de l'enseignement de la géographie au niveau de l'enseignement secondaire; ensuite il analyse la place à laquelle ce sujet devrait se trouver dans le programme d'enseignement; puis il présente ce phénomène du point de vue physique; enfin il propose, conformément au programme élaboré, plusieurs moyens de traiter la force de Coriolis. A l'occasion, l'auteur attaque «le mouvement apparent» universellement utilisé dans les écoles pour déterminer les déplacements visibles des corps célestes. L'auteur démontre que la méthode la plus effective pour introduire «la force de Coriolis» est la démonstration du pendule de Foucault. Il propose aussi de supprimer la formule du vecteur et de n'introduire que l'explication démonstrative limitée aux mouvements horizontaux et aux résultats obtenus par rapport à la surface horizontale. Pour terminer, l'auteur souligne son refus envers l'introduction de la dérivation des vents et de courants maritimes, employés comme arguments soulignant la théorie de Copernic et concernant la rotation de la Terre, cet argument étant complètement incompréhensible pour les élèves qui n'auraient pas assimilé le mécanisme du fonctionnement de la force de Coriolis.

ЯН ФЛИС

„КОРИОЛИСОВА СИЛА ИНЕРЦИИ” И ЕЕ ПОСЛЕДСТВИЯ
КАК ТЕМА УРОКА ГЕОГРАФИИ
В ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ШКОЛЕ

Во вступительной части статьи автор доказывает необходимость введения темы „Кориолисова сила инерции” в процесс обучения географии в общеобразовательном лицее. Далее он рассматривает место этой темы в учебной программе; а также исследует это явление с точки зрения физики и, наконец, предлагает приемы обучения при реализации вышеназванной темы в процессе прохождения предлагаемой учебной программы. Здесь же автор

подвергает критике повсеместно принятый в школьной практике обучения термин „мнимое движение” по отношению к видимому движению небесных тел. В качестве целесообразного приема в изучении кориолисовой силы инерции автор предлагает демонстрацию маятника Фуко. Он предлагает также в процессе обучения избегать векторной формулировки ускорения, а предлагает применять только лишь наглядное объяснение, сводимое к показу горизонтального движения (с горизонтальной составляющей) и показу следствий, рассматриваемых исключительно по отношению к горизонтальной плоскости. В заключение автор высказывается против объяснения на уроке изменений направления ветров и морских течений как доказательств теории Коперника о вращении Земли вокруг своей оси, что, по его мнению, является аргументом, совершенно непонятным для учеников до тех пор, пока они не поймут действия кориолисовой силы инерции.