

Ветар

1

- Настанак ветра
 - Градијентна сила притиска
 - Кориолисова сила и центрифугална сила
 - Сила трења
- Модели ветра
 - Геострофски ветар
 - Градијентни ветар
 - Циклострофски ветар
 - Утицај силе трења на ветар
 - Термални ветар
- Глобална циркулација у атмосфери

2

- Кретања ваздуха - у свим правцима
- Преовладава хоризонтално – ветар
- За опис ветра треба познавати сем интензитета и правац и смер.
 - Интензитет се изражава обично преко брзине (м/с)
 - Правац и смер дефинишу навођењем стране света са које ветар дува

3

Настанак ветра

- Настаје променом стања кретања делова атмосфере у односу на Земљу
- Промена стања кретања изазивају силе
- Њутнови закони у нешто измењеној форми

4

Зашто ветар дува?

- 1. Њутнов закон: “Сваки делић ваздуха остаје у стању мировања или равномерно праволинијског кретања докле год под дејством неке силе не буде принуђен да промени то своје стање.”
- 2. Њутнов закон: Промена или $\vec{F} = m\vec{a}$ чине кретања) делића ваздуха ср резултујућој сили која делује на њега и врши се у правцу деловања силе.
- 3. Њутнов закон: “При интеракцији два тела, сила којом прво тело делује на друго, једнака је по интензитету и по правцу, а супротног је смера од силе којом друго тело делује на прво.”

5

Настанак ветра

- Силе које делују на ваздух (сем гравитационе)
 - Градијентна сила притиска
 - Кориолисова сила
 - Центрифугална сила
 - Сила трења

6

Гравитациона сила

- Услед велике масе Земље веома је јака
- Усмерена је ка центру Земље

$$\vec{F} = \rho \Delta V \vec{g},$$

7

Градијентна сила притиска

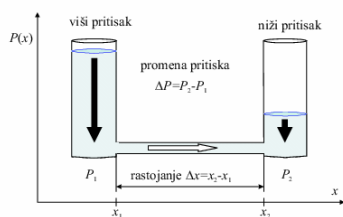
- Градијент неке физичке величине
 - Количник разлике њених вредности у две тачке и растојања те две тачке
 - Нпр. код притиска – флуид струји са места где је притисак већи ка месту где је мањи
 - Градијент је векторска величина
 - Има правац паралелан са правцем дуж кога се мења притисак,
 - смер му се поклапа са смером смањења притиска
 - а интензитет је једнак промени притиска на јединичном растојању дуж датог правца.
- Примери:
 - градијент температуре $\Delta T/\Delta z$, концентрације $\Delta n/\Delta z$

8

Градијентна сила притиска

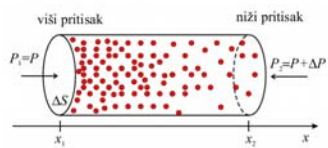
- Сила која доводи до кретања ваздуха услед постојања градијента притиска, паралелна је са градијентом притиска
- Градијентна сила притиска је сразмерна са " $-\Delta P/\Delta x$ "

$$\frac{P_1 - P_2}{x_2 - x_1} = -\frac{\Delta P}{\Delta x}.$$



Slika 3.1: Gradijent pritiska usled razlike visine vode u dva rezervoara.

9



Slika 3.2: Gradient pritiska u vazduhu.

- Сила која делује на ваздух услед разлике у притисцима је сразмерна тој разлици $F_x \sim \Delta P$
- Ако је $\Delta P < 0$ сила је задата изразом $F_x = -\Delta P \Delta S$,
- Ако је $\Delta P > 0$ сила је такође задата изразом
- А убрзање делића је

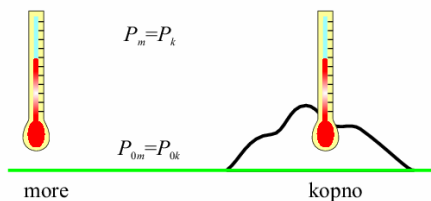
$$a_p = \frac{F_x}{m} = -\frac{\Delta P \Delta S}{\rho \Delta S \Delta x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{\Delta x}$$

10

- Почетни узрок ветра – хоризонтална градијентна сила притиска
 - Остале (Кориолисова и сила трења) након тога “обликују” ветар – оне не делују на делиће који се не крећу у односу на земљу

11

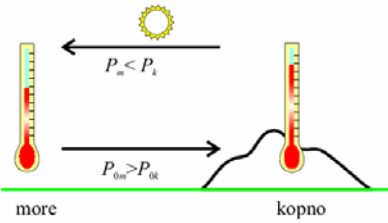
Настанак градијентне силе притиска



Slika 3.3: Pritisak na nivou mora i na bilo kojoj visini je jednak i iznad mora (P_m) i iznad kopna (P_k).

12

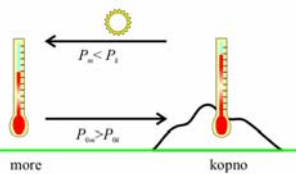
Настанак градијентне силе притиска



Slika 3.4: Pritisak na nivou mora je manji iznad kopna dok je na visini veći iznad kopna nego iznad mora.

13

Настанак градијентне силе притиска



Slika 3.4: Pritisak na nivou mora je manji iznad kopna dok je na visini veći iznad kopna nego iznad mora.

- Сунце греје тло
- Температура тла расте брже због мање специфичне топлотне капацитивности
- Ствара се хоризонтални градијент температуре
- Копно загрева ваздух изнад себе провођењем топлоте - он постаје ређи па настаје вертикална конвекција
- Она је изнад копна интензивнија него изнад мора па се на некој висини формира градијент притиска обрнутог смера.

14

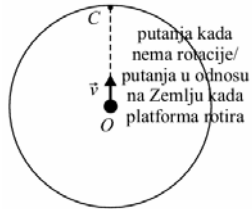
Земља као референтни систем, 15.4.2013.

- Земља нити мирује нити се униформно и праволинијски креће
- Тела чврсто везана за њу стога неком силом приморава да прате криволинијску путању
- Тела која нису чврсто везана - флуиди - ће тежити да се крећу праволинијски
- Гледано са Земље та путања неће бити таква - закривиће се под дејством инерцијалних сила - последица убрзања датог система референце
- Постоје две силе изазване ротацијом Земље
 - Кориолисова - делује само када тело има неку брзину
 - Центрифугална сила - делује и када се тело не креће у односу на Земљу

15

Кориолисова сила

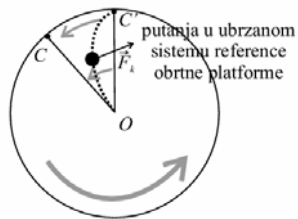
- Пример - котрљање лопте из центра платформе која може да ротира



16

Кориолисова сила

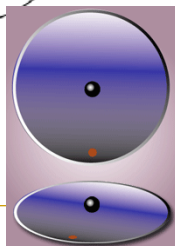
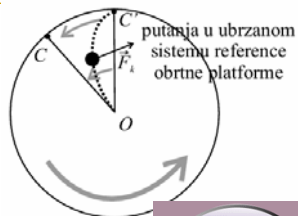
- Пример - котрљање лопте из центра платформе која може да ротира
- Кугла је усмерена ка тачки C али се она помера и "бежи" од кугле јер има већу периферијску брзину од ње
- Гледано из система платформе закривљена путања лопте је последица постојања **силе**



17

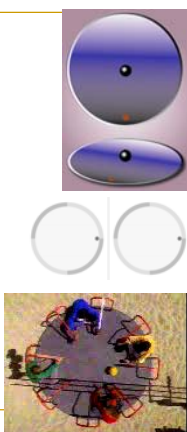
Кориолисова сила

- Пример - котрљање лопте из центра платформе која може да ротира
- Кугла је усмерена ка тачки C али се она помера и "бежи" од кугле јер има већу периферијску брзину од ње
- Гледано из система платформе закривљена путања лопте је последица постојања **силе**



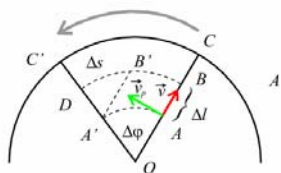
Кориолисова сила

- гледано из нашег система референце лопта се креће по правој линији
- гледано са платформе она заостаје у смеру супротном од смера ротације
- у ротационом систему референце се појављује “привидна” сила која изазива промену правца кретања
- промена правца се јавља код кретања у свим правцима, а што се тело брже креће је већа



Кориолисова сила

- Човек из тачке А иде по платформи дуж њеног полупречника брзином v у однос на платформу
- За време Δt прелази пут Δl
- Услед ротације полупречник OC ће се померити за угао $\Delta\varphi$ и човек ће заправо доћи из тачке А у тачку D



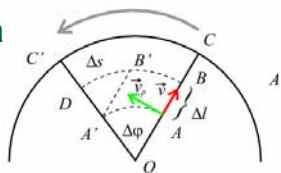
$$\Delta l = \overline{AB} = v\Delta t$$

$$\Delta\varphi = \omega\Delta t$$

20

Кориолисова сила

- Гледано са стране – он учествује у два кретања
 - У односу на диск брзином v
 - Ротира заједно са диском
- Периферијска брзина ротације делова диска расте при удаљавању од центра
- Нека је у тачки А једнака v_p
- Ротирајући заједно са диском човек би прешао AA'
- Крећући се укупном брзином $v + v_p$ би прешао BB'
- Али он долази у тачку D
- Разлог – док се креће расте му и периферијска брзина ротације јер нема клизања између његових ђонова и платформе.
- Ако му расте брзина следи да на њега делује нека сила



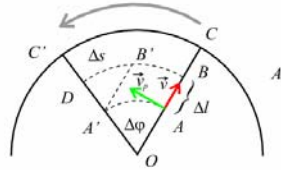
$$\Delta s = \overline{B'D}$$

- Вредност убрзања се може одредити на основу додатног пута који је прешао за посматрани интервал времена

21

Кориолисова сила

$$\Delta s = B'D$$



- Према слици је
- За равномерно убрзано кретање иначе важи
- Упоређивање даје

$$\Delta s = A'B' \Delta \varphi \quad A'B' = \Delta l$$

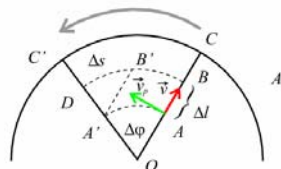
$$\Delta s = \omega v (\Delta t)^2$$

$$\Delta s = \frac{1}{2} a (\Delta t)^2$$

$$a = 2v\omega \quad F_k = ma = 2mv\omega$$

22

Кориолисова сила



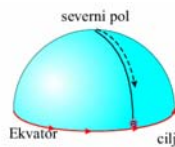
- Уколико се тело креће по кружници са центром на оси ротације такође се јавља Кориолисова сила а општи израз је
- "х" векторски производ брзине и угаоне брзине
- Вектор угаоне брзине има правац осе ротације а смер се одређује правилом десног завртња
- закривљеност путање је то већа што је дуже "путовање" тела

$$\vec{F}_k = 2m\vec{v} \times \vec{\omega}$$

23

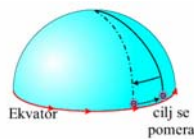
Кориолисова сила на Земљи

- Северна хемисфера и аналогија са ротирајућом платформом



$$F_k = 2mv\omega \sin \varphi$$

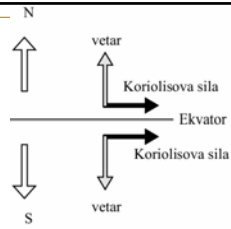
- φ - географска ширина тела – дела ваздуха/воде



24

Закључци

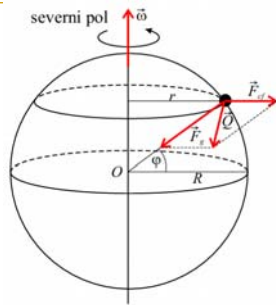
- Делује само на тела у покрету
- Директно сразмерна брзини тела
- Интензитет силе расте са порастом географске ширине
 - На екватору је једнака нули (ако се кретање одвија дуж меридијана) јер је вектор брзине паралелан вектору угаоне брзине
 - На половима је најјача
- На ветар – уколико је усмерен од екватора делује тако да је
 - На северној хемисфери га скреће удесно
 - На јужној улево



25

Центрифугална сила

- Такође последица ротације
- Утиче и на тела која се не крећу у односу на Земљу
- Највећа је на екватору а на половима је 0
- Увек је нормална на осу ротације
- На екватору је у правцу силе теже и умањује је
- Иначе јој мења правац и умањује је!



$$F = m \frac{v^2}{r} = m\omega^2 r. \quad F_{cf} = m\omega^2 R \cos \varphi$$

26

Процена утицаја Кориолисове и центрифугалне силе

- Центрифугална на екватору (где је максимална)

$$\frac{m\omega^2 R}{mg} = \frac{\omega^2 R}{g} = \frac{\left(\frac{2\pi}{24 \cdot 3600}\right)^2 \cdot 6,37 \times 10^6}{9,81} \approx 0,003 = 3 \cdot 10^{-3}$$

27

Процена утицаја Кориолисове и центрифугалне силе

- Кориолисова нпр за Голфску струју након једног сата кретања

$$\varphi = 38^\circ \quad v = 1 \text{ m/s}$$

$$a_k = 2\omega v \sin \varphi = 2 \left(\frac{2\pi}{24 \cdot 3600 \text{ s}} \right) \left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \sin 38^\circ \approx 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\Delta s = \frac{1}{2} a_c \Delta t^2 \approx \frac{1}{2} \left(10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) (3600 \text{ s})^2 \approx 650 \text{ m.}$$

$$\frac{a_k}{g} \approx = \frac{10^{-4}}{9,81} \approx 10^{-5}$$

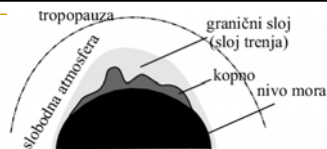
28

Сила трења

- Сила трења – величина отпора релативном кретању два тела која се додирују
- Површинско – спољашње (додир ваздуха и тла)
- Унутрашње – вискозно (релативно померање делића ваздуха)

29

Сила трења



- Приземни ваздух наилази на препреке
- Предаје део кинетичке енергије
- Храпавост подлоге доста утиче на слој атмосфере у коме се осећа деловање трења
 - Изнад планина 2-3000 метара
 - Изнад океана 100 метара
- Слој атмосфере у коме се осећа трење – **слој трења**
- Онај у коме се не осећа – **слободна атмосфера**

30

- Сила вискозног трења је последица различитих импулса молекула у различитим слојевима (уз претпоставку о ламинарном струјању) атмосфере
- Тропосфера се највише греје од земљишта
- Трење је највеће у приземном слоју
 - Постоје и следећи **приземни процеси**
 - Транспорт топлоте
 - Водене паре,
 - Језгара кондензације
 - Полутаната, ...
- тај слој се назива *гранични слој* који се практично подударе са *слојем трења*
- Слободна атмосфера – део атмосфере у коме нема приземних процеса

31

Модели ветра

- Делује више сила увек
- Доминантна одређује модел који се користи за опис ветра

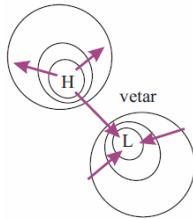
32

Геострофски ветар

- Изнад слоја трења спољашње трење не постоји и унутрашње може да се занемари
- Једине битне силе су
 - Градијентна сила притиска
 - Кориолисова сила
- Када су избалансиране струјање је униформно – постигнута је **геострофска** равнотежа
- гео - земља
- *strophā* – окретање

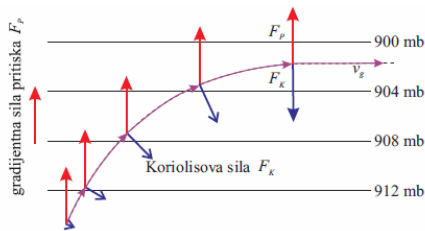
33

- На неротирајућој Земљи кретање би изазивала градијентна сила притиска
- Кретање ваздуха од места са вишим притиском ка месту са нижим – под правим углом на изобаре
- Ротирајућа Земља – Кориолисова сила под правим углом у односу на брзину и изазива скретање делића



34

- Ротирајућа Земља – Кориолисова сила под правим углом у односу на брзину и изазива скретање делића
- геострофско подешавање



Слика 4.12: Ефекат резултујућег деловања градијентне силе притиска и Кориолисове силе на ваздух

35

Брзина геострофског ветра

- Када се постигне баланс важиће

~~$$\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{\Delta x} = 2\omega v_g \sin \varphi,$$~~

$$\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{\Delta x} = 2v_g \omega \sin \varphi,$$

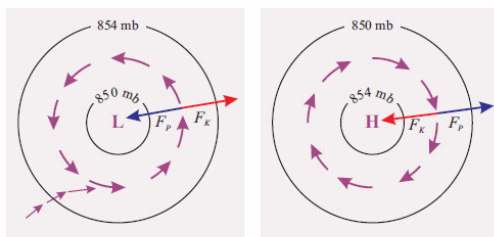
~~$$v_g = \frac{1}{2\rho\omega \sin \varphi} \frac{\Delta P}{\Delta x}.$$~~

$$v_g = \frac{1}{2\rho\omega \sin \varphi} \frac{\Delta P}{\Delta x}.$$

36

- Геоострофски ветар теоретски не треба да постоји само на екватору
- Али не постоји у појасу од око 15° северно и јужно од екватора
- Карактеристике:
 - Струјање је паралелно са изобарама
 - На северној полулопти је низак притисак са леве стране смера ветра
 - На јужној полулопти обрнуто
 - Бејс-Балотов закон: *Ако ветар дува у леђа посматрача, низак ваздушни притисак на северној хемисфери лежи са леве стране.* Такав начин кретања назива се циклонски.
 - Ветар струји око циклона (места са нижим притиском) у смеру супротном од казаљке на часовнику а око антициклона у смеру. На јужној полулопти је обрнуто.

37



Slika 4.13: Pravac i smer vetra na severnoj polulopti oko ciklona i anticiklona

38

- Брзина ветра се повећава услед повећања градијента притиска
- За исти градијент притиска, у областима ближим екватору, брзина ветра је већа него изнад региона ближих половима
- Геоострофски балансе не може да се успостави на малој скали – малим растојањима где се јављају планински и долински ветрови, грмљавинске непогоде, ... јер је градијентна сила притиска много већа од Кориолисове.

39

Градијентни ветар

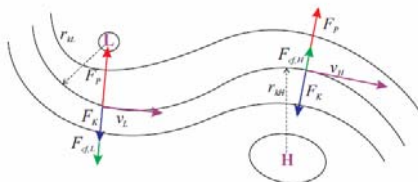
- Геострофски ветар у слободној атмосфери – само уколико су изобаре праве и паралелне.
- Често су закривљене услед чега се јавља центрифугална сила
- Путања делића увек одговара равнотежи релевантних сила:
 - Градијентна сила притиска
 - Кориолисова
 - Центрифугална
- У таквом случају дува *градијентни ветар*.

40

- Градијентни ветар на северној полулопти
- Центрифугална сила има исти смер као и Кориолисова у близини циклона а супротан од ње у близини антициклона
- Услед тога може да се деси да ветар мање брзине поништи градијентну силу притиска и доведе до равнотеже

41

$$F_{cf} = m \frac{v^2}{r_k}$$



Slika 4.14: Gradijentni vetar

$$F_{cf,L} + F_K = F_P, \quad F_K = F_P + F_{cf,H}$$

42

- Струјање делића у моделу градијентног ветра личи на кретање у шољи чаја када се мешањем доведе у обртно кретање
- Површина заузима левкаст облик (низак притисак у центру шољице)
- Кретање у извесном периоду може бити стационарно
- (Кориолисова сила је у ово случају занемарљива због малих димензија шоље)

43

Циклострофски ветар

- На малим географским ширинама где је Кориолисова сила занемарљива или
- При кретању на малим растојањима (неколико метара до неколико стотина метара),
- Долази до *циклострофског баланса*, при коме важи

$$F_{cf} = F_P.$$

44

Циклострофски ветар

$$F_{cf} = F_P.$$

- У близини центра ротирајућих олуја – код торнада, водених и копнених пијавица.
- Једине значајне силе су градијентна и центрифугална
 - Шоља чаја је пример
- Ротирајуће олује постоје само ако је у њиховом центру нижи притисак.
- Док код градијентног ветра смер зависи од хемисфере у циклострофском су могућа оба смера на обе полулопте.
 - Исти пример.
- У близини екватора су према томе ветрови углавном циклострофског типа

45

Утицај силе трења на ветар

- Геострофска апроксимација – добра на великим висинама
- У близини земље се брзина ветра смањује услед силе трења

$$\vec{F}_{tr} = -b\vec{v},$$

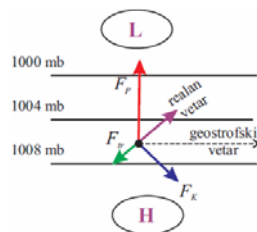
46

Утицај силе трења на ветар

- Мања брзина па је мања и Кориолисова сила
- Последице:
 - Не може да се успостави баланс између ње и градијентне силе притиска
 - Вектор брзине није паралелан са изобарама већ их сече под неким углом и то тако да конвергира ка циклонима а дивергира од антициклона

47

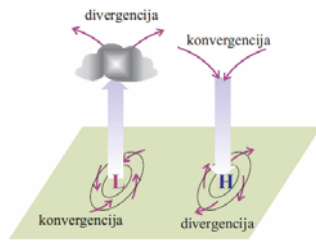
- Вектор брзине није паралелан са изобарама већ их сече под неким углом и то тако да конвергира ка циклонима а дивергира од антициклона
- Сила трења међутим опада са висином
- Последица:
 - Угао између брзине и изобаре је највећи у близини површине а са висином опада



Slika 4.15: Realan vetar u blizini površine Zemlje

48

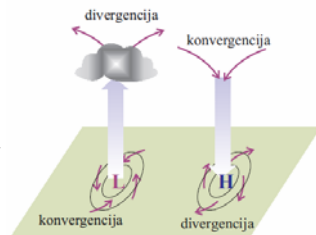
- Угао између брзине и изобаре је највећи у близини површине а са висином опада
- Формира се Екманова спирала



Slika 4.16: Ekmanova spirala

49

- Формира се Екманова спирала
- У близини површине ваздух стога конвергира ка центру спирале (циклону)
- То се компензује вертикалним подизањем делића и дивергирањем на већој висини



Slika 4.16: Ekmanova spirala

50

Термални ветар

- На различитим висинама облаци могу да се крећу у различитим смеровима и различитим брзинама.
- Последица различитих температура
- изглед геострофског ветра са висином
- Зависност притиска од висине

$$P_1 = P_0 e^{-\frac{M g z_1}{RT}}, \quad P_2 = P_0 e^{-\frac{M g z_2}{RT}}$$

- T је просечна температура ваздуха између изобарних површи на датим висинама

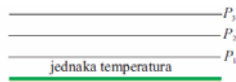
51

Термални ветар

- Растојање суседних изобара, тј. дебљина слоја ваздуха између њих је

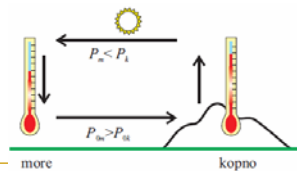
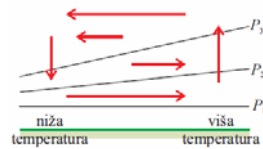
$$z_2 - z_1 = \frac{RT}{M_{\text{sr}}g} \ln \frac{P_1}{P_2}$$

- Ако нема разлике у температурама изобаре су хоризонталне и паралелне



52

- Ако постоји разлика у температурама та се слика мења
- Тамо где је ваздух топлији растојање између изобара је веће
- Јавља се већи градијент притиска и струјање које се назива *термални ветар* (морски поветарци, механизам конвекције)



53

Глобална циркулација у атмосфери

- Услед сферног облика највише енергије долази на екватор
 - Зраци падају под скоро правим углом а и алbedo је знатно мањи него на половима
- Почетне претпоставке
 - Земља глатка лопта без испупчења
 - свуда једнаке површине,
 - без трења између ње и атмосфере
 - Ротира у истом смеру али знатно спорије

54

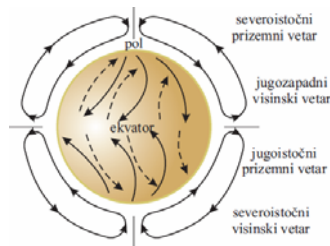
Глобална циркулација у атмосфери

- Земља глатка лопта без испупчења
 - свуда једнаке површине,
 - без трења између ње и атмосфере
 - Ротира у истом смеру али знатно спорије
- У том случају формира се једноставна конвекциона петља у којој се ваздух на екватору подиже увис а на половима пада
- Хедлијева петља/ћелија
- Одвија се у простору димензија око 20 000 км а период износи око 1 године.

55

Глобална циркулација у атмосфери

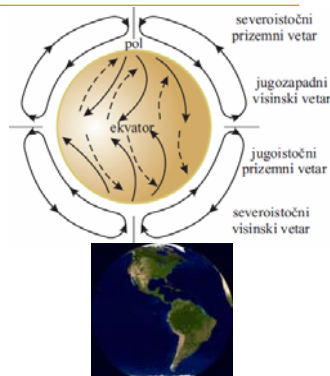
- Хедлијева петља
- Слична је термичкој циркулационој петљи
- Разлике
 - Хеделијева је много већа па је модификује Кориолисова сила



56

Глобална циркулација у атмосфери

- Утицај Кориолисове силе на Хедлијеву петљу
- На северној хемисфери скреће удесно у приземном слоју а на већој висини у супротном смеру
- Претпоставимо сада да ротација има уобичајену брзину

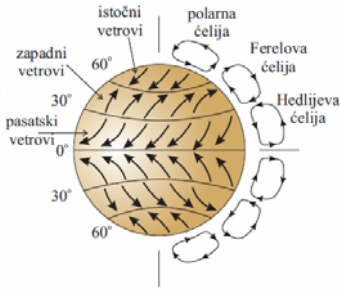


$$v_o = \frac{2R\pi}{T} = \frac{40030km}{86164s} = 465 m/s$$

57

Глобална циркулација у атмосфери

- Услед ротације циркулациони ветар постаје још увијенији а Хедлијева петља се ломи на три
 - Хедлијева
 - Ферелова
 - Поларна ћелија



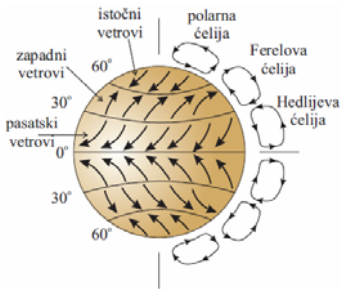
58

- Једна петља уколико дан траје 100 сати

59

Глобална циркулација у атмосфери

- Ћелије (у близини површине Земље) доводе до:
 - Североистичних ветрова између екватора и 30° ширине - трговачки ветрови/пасати
 - Западних ветрова између 30° и 60° ширине
 - Поларних или источних ветрова изнад 60° ширине.



60

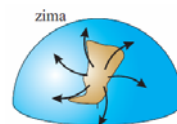
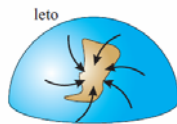
Монсунска циркулација

- Планета није идеална - њена површина нема исте особине свуда
- Постоје океани и континенти
- Монсуни – сезонски ветрови који мењају смер кретања
- Приземни ветар у влажном монсуну током лета дува од океана ка континенту а суви супротно
- Размер монсуна - око 10 000 км, ред величине континента.

61

Монсунска циркулација

- Настанак:
 - Различита специфична топлотна капацитивност земљишта и воде
 - С обзиром на велике просторне размере сада мора да се узме у обзир и Кориолисова сила
 - Изнад копна преко лета спирала ветра има смер обрнут од казаљке на часовнику, током зиме је обрнуто
 - Монсуни се, због расподеле копна, јављају само у неким регионима (Југоисточна Азија)



62
