УДК 551.513.1

В.М.Хохлов

ЗАПАСИ РІЗНИХ ВИДІВ ЕНЕРГІЇ В АТМОСФЕРІ ПІВНІЧНОЇ ПІВКУЛІ

Досліджено запаси середньозональної кінетичної, вихрової кінетичної та вихрової доступної потенціальної енергій. Показано, що запаси вихрової доступної потенціальної енергії визначаються впливом механізмів генерації, що мають значні відмінності влітку і взимку. Запаси середньозональної кінетичної енергії зосереджені у верхній тропосфері і визначаються впливом чарунки Гадлея, причому максимуми збігаються з найбільшими величинами вихрової кінетичної енергії.

Пояснити велику увагу, яка протягом розвитку фізики атмосфери приділялась дослідженню енергетиці атмосферних процесів, можна тим, що енергетика дозволяю розглядати динамічні процеси, що відбуваються у атмосферних системах різного масштабу, у всьому їх різноманітті. Ледве не єдиним концептуальним припущенням, цілком реальним та неодноразово доведеним експериментально і теоретично, є існування перетворення одних видів енергії в інші та, за рахунок цього, енергетичне „підживлення” процесів одного масштабу іншими. Таким чином, проблема, яка розв’язувалась та розв’язується у теперішній час багатьма дослідниками, полягає у найточнішому з фізичної точки зору описуванні зазначених перетворень енергії.

В межах системи атмосфера – океан – суша перенесення з одного району в інший або від атмосфери до підстильної поверхні і навпаки здійснюється за рахунок випромінювання і теплопровідності. Тільки ці процеси і вплив будь-якої сили можуть спричиняти зміни кінетичної енергії. Наприклад, низхідні рухи є причиною перетворення потенціальної енергії в кінетичну, а висхідні – навпаки, кінетичної – в потенціальну. Кінетична енергія є єдиним джерелом (чи стоком) внутрішньої енергії [2].

Далеко не вся частина повної потенціальної енергії, або ентальпії у випадку ізобаричної системи координат, перетворюється в кінетичну.

Наук. праці УкрНДГМІ. – 2002. – Вип. 250

Доступна потенціальна енергія, поняття якої було уведене Лоренцем, саме і є тією частиною повної потенціальної енергії, яка може перетворитися в кінетичну енергію. За Лоренцем, складовими частинами основного енергетичного циклу загальної циркуляції атмосфери є: генерація доступної потенціальної енергії за рахунок притоку тепла, перетворення її в кінетичну енергію у випадку адіабатичних процесів і дисипація кінетичної енергії за рахунок тертя [2]

Більш детально цей цикл можна розглянути, якщо використати поняття середньозональної величини і відхилення від неї:

$$\overline{f} = \frac{1}{L}\int_{-L/2}^{L/2} f dx, \qquad f' = f - \overline{f},$$

де L – довжина широтного кола.

Тоді традиційний цикл набуває вигляду: зональна доступна потенціальна енергія перетворюється у вихрову доступну потенціальну енергію, яка, в свою чергу, у вихрову кінетичну енергію; остання є джерелом зональної доступної потенціальної енергії [2].

Надалі було помічено (див., наприклад, роботи Макінтайра [6] або Івасакі [4]), що зазначений вище цикл, який є математично вірним, не виконується для деяких видів атмосферних хвиль. Тому Пламом [7] було запропоноване інше формулювання енергетичного циклу, в якому був відсутній перехід середньозональної потенціальної енергії у вихрову потенціальну, тобто $P_E \rightarrow K_E \rightarrow K_M \rightarrow P_M$. Тут вихрова доступна потенціальна енергія

$$P_E = -\frac{R}{2p}\left(\frac{p}{1000}\right)^{\kappa} \frac{\overline{\theta'^2}}{\partial\overline{\theta}/\partial p}; \tag{1}$$

вихрова кінетична енергія

$$K_E = \frac{\overline{u'^2} + \overline{v'^2}}{2}; \tag{2}$$

середньозональна кінетична енергія

$$K_M = \frac{\overline{u}^2 + \overline{v}^2}{2}; \tag{3}$$

середньозональна потенціальна енергія

$$P_M = c_p\overline{T} - P_E. \tag{4}$$

Тут R – газова стала, p – тиск, $\kappa = R/c_p$, c_p – питоме тепло при сталому тиску, $\theta = T\left(\frac{1000}{p}\right)^{\kappa}$ – потенціальна температура, T – температура повітря, u і v – зональна і меридіональна складові вектора швидкості вітру.

З (4) видно, що P_M в першу чергу визначається середньозональною величиною температури повітря ($c_p\overline{T} \gg P_E$) і тому розподіл цього виду енергії, взагалі, тривіальний.

В цій роботі розглядаються запаси P_E, K_E и K_M в північній півкулі на різних географічних широтах і висотах. Як вихідні використовувались дані архіву GDAAC середньомісячних значень метеорологічних величин на 18 ізобаричних поверхнях з 1980 по 1993 рр. Метою цієї роботи є з'ясування фізичних причин, що зумовлюють просторово–часовий розподіл запасів різних видів енергії.

Зупинимось спочатку на інтегральних запасах зазначених величин в різних широтних поясах. На рисунках 1 і 2 показані запаси енергій у шарі від поверхні землі до рівня 20 гПа для широтних поясів (на рисунках на осі x показані середини двоградусних широтних поясів). Так, запаси усіх видів енергії взимку більші, ніж влітку, що можна пов'язати з більшою активністю атмосфери у холодний період року.

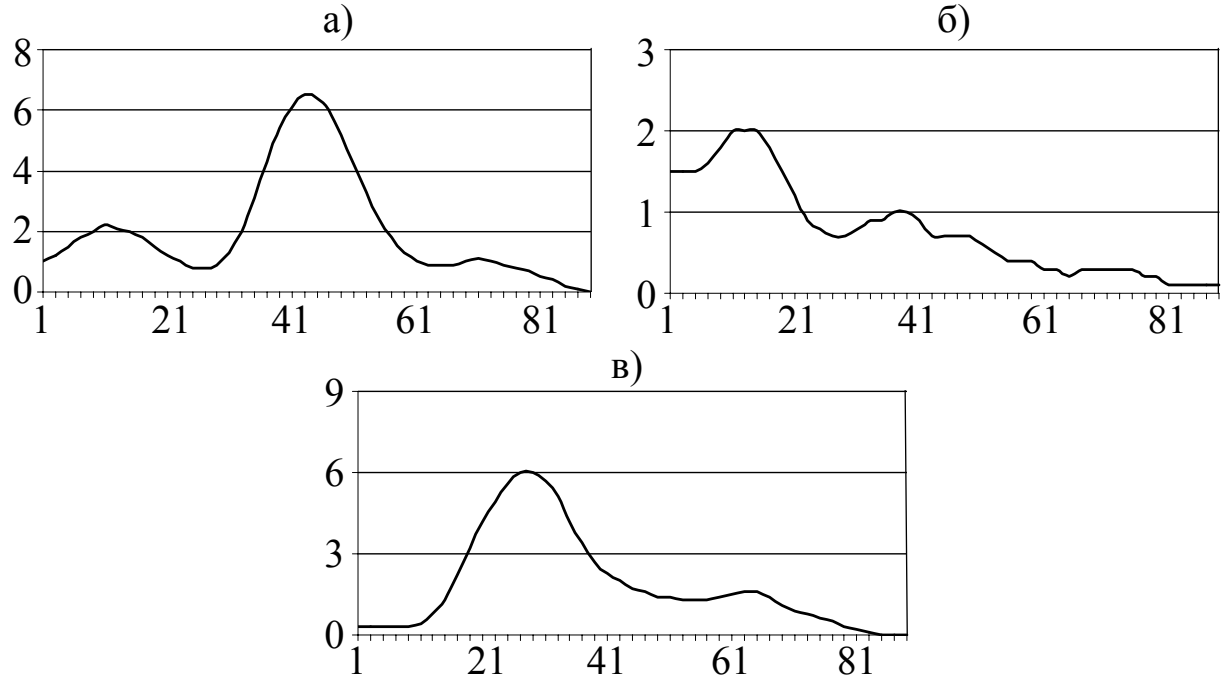

Рис. 1. Запаси в широтних поясах K_M (а), K_E (б) і P_E (в) влітку для північної півкулі ($\times 10^6$ Дж м$^{-2}$)

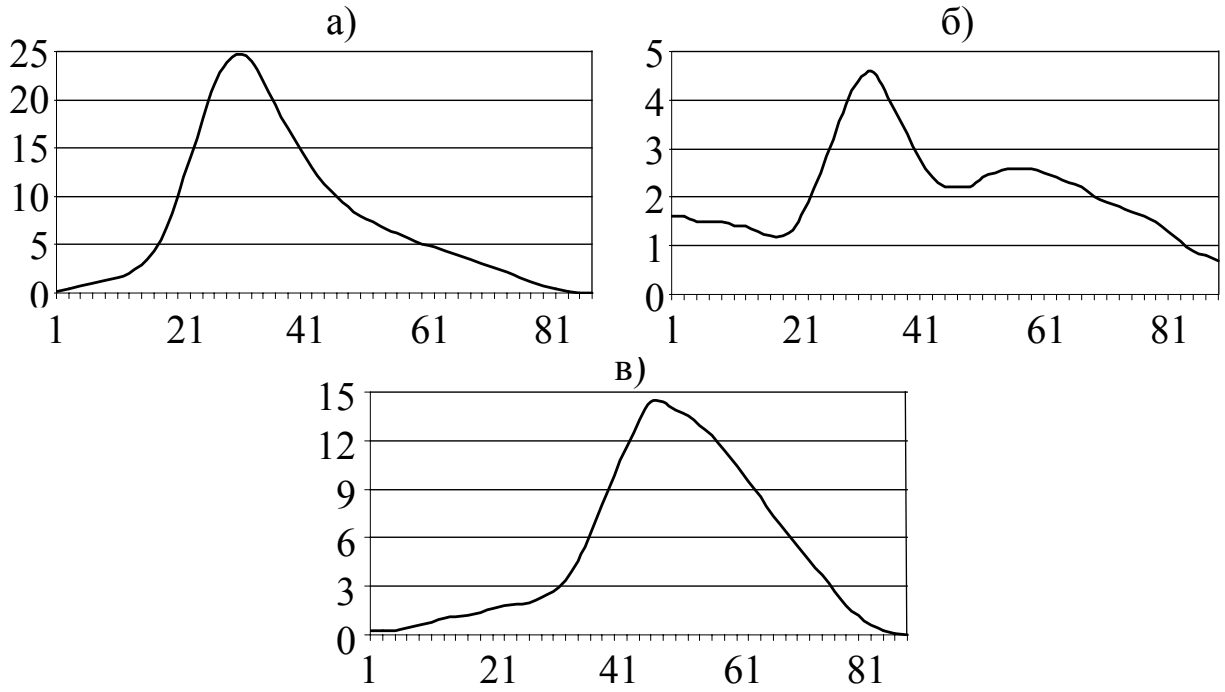

Рис. 2. Запаси в широтних поясах K_M (а), K_E (б) і P_E (в) взимку для північної півкулі ($\times 10^6$ Дж м$^{-2}$)

Влітку максимум запасів P_E (рис.1в) розташований біля 28° півн.ш. ($6{,}0 \cdot 10^6$ Дж м$^{-2}$), а взимку (рис.2в) – 48° півн.ш. ($14{,}4 \cdot 10^6$ Дж м$^{-2}$). Видно, що влітку максимум розташований приблизно в районі осі чарунки Гадлея і пояснюється відомим механізмом опускання більш холодного повітря і підняттям теплого [2]. Взимку максимум спостерігається на низхідній гілці чарунки Ферреля і тут основним є інший механізм – нагрівання більш теплих (океанічних) і вихолодження більш холодних (материкових) районів, що знаходяться на одній широті.

Взагалі, широтне розташування найбільших запасів P_E не дуже добре узгоджується з положенням максимумів K_E і K_M (порів. рис. 1а і 1б, 2а і 2б) як взимку, так і влітку. В той же час максимуми вихрової і середньозональної кінетичної енергій майже співпадають.

Влітку (рис.1а) відзначається два максимуми запасів K_M: перший в районі 10° півн.ш. ($2{,}2 \cdot 10^6$ Дж м$^{-2}$) і другий, головний, в районі 48° півн.ш. ($6{,}4 \cdot 10^6$ Дж м$^{-2}$), тобто приблизно в зоні висхідної гілки чарунки Гадлея південної та низхідної гілки аналогічної чарунки північної півкулі відповідно. Така картина повністю відповідає усталеному погляду про чарунки Гадлея як про генеруючі середньозональну кінетичну енергію. Приблизно така ж картина спостерігається і для зими (рис.2а), хоч тут

максимум K_M в районі 10° півн.ш. майже в чотири рази більший ($24{,}7\cdot10^6$ Дж м$^{-2}$). Останнє пояснюється більшою активністю чарунки Гадлея у цей сезон [3].

Тепер розглянемо в якій частині атмосфери зосереджені основні запаси енергії. На рис. 3 і 4 показані вертикальні розрізи вздовж меридіана запасів енергії (на осі *y* показані середини шарів товщиною 100 гПа; значення у шарі 100-20 гПа збільшені на 20%).

Влітку у поясі 20-30° півн.ш. є два майже однакових максимуми (рис.3в) запасів P_E: перший у шарі 900-800 гПа ($11{,}7\cdot10^5$ Дж м$^{-2}$), другий – у шарі 300-200 гПа ($12{,}6\cdot10^5$ Дж м$^{-2}$), тобто поблизу нижньої і верхньої межі сумарної середньої меридіональної циркуляції, що пов'язана з чарункою Гадлея [3]. Це підтверджує вищевказаний висновок про вплив зазначеної циркуляційної чарунки на генерацію доступної потенціальної енергії влітку. Взимку (рис.4в) максимум запасів P_E зосереджений біля поверхні землі ($56{,}6\cdot10^5$ Дж м$^{-2}$), а два другорядних – в шарах 500-400 гПа ($16{,}2\cdot10^5$ Дж м$^{-2}$) і 100-20 гПа ($12{,}6\cdot10^5$ Дж м$^{-2}$); другий з цих другорядних максимумів пов'язаний зі збільшенням вертикального градієнта потенціальної температури в стратосфері. Наявність основного максимуму запасів P_E поблизу земної поверхні цілком підтверджує зроблений раніше висновок про різний температурний режим підстильної поверхні в цьому широтному поясі взимку. Крім того, саме на цих широтах спостерігаються інтенсивні опади, що пов'язані з полярним фронтом [5], і теплота фазових переходів, яка звільнюється при цьому, сприяє збільшенню запасів вихрової доступної потенціальної енергії [3].

Запаси вихрової кінетичної енергії влітку (рис.3б) у тропіках визначаються двома максимумами: в шарах 900-800 гПа ($3{,}3\cdot10^5$ Дж м$^{-2}$) і 200-100 гПа ($5{,}3\times10^5$ Дж м$^{-2}$). В останньому шарі існує також максимум близько 40° півн.ш. ($2{,}4\times10^5$ Дж м$^{-2}$), який і визначає, в деякій мірі, великі запаси K_M ($20{,}2\times10^5$ Дж м$^{-2}$) у цьому районі (рис.3а).

Взимку (рис.4б) основний максимум K_E, що розташований у шарі 200-100 гПа в районі 30° півн.ш. ($11{,}6\times10^5$ Дж м$^{-2}$), також визначає максимум K_M ($80{,}0\times10^5$ Дж м$^{-2}$) (рис. 4а). Взагалі, основні запаси як вихрової, так і середньозональної кінетичної енергії, зосереджені у верхній тропосфері, причому і взимку, і влітку вони добре узгоджуються з максимумами $\overline{u}$ [1].

Хоч в цій роботі не робиться аналіз чисельних величин перетворень і потоків енергій, але навіть такий наближений підхід до дослідження

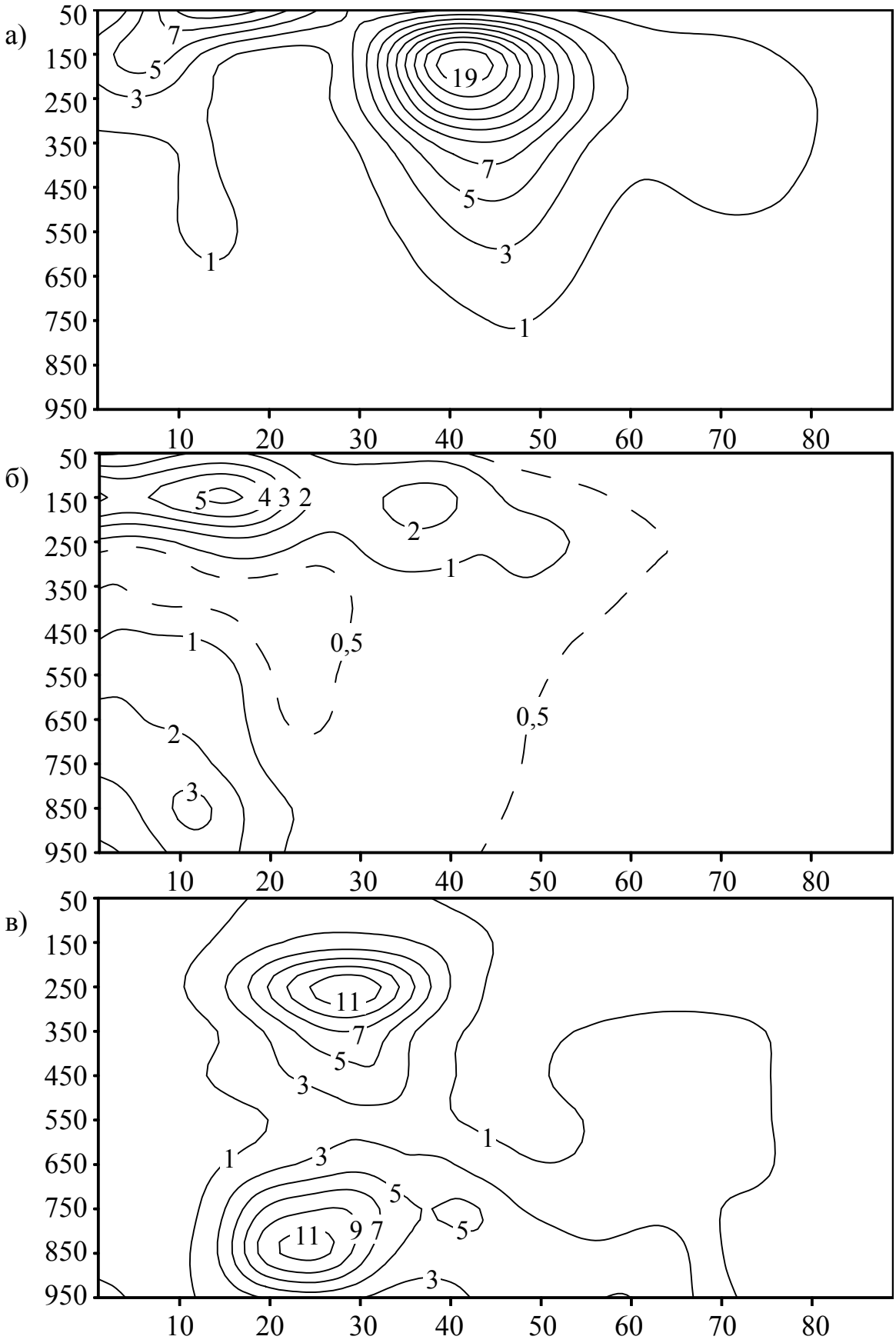

Рис. 3. Розподіл K_M (а), K_E (б) і P_E (в) влітку для північної півкулі ($\times 10^5$ Дж м$^{-2}$)

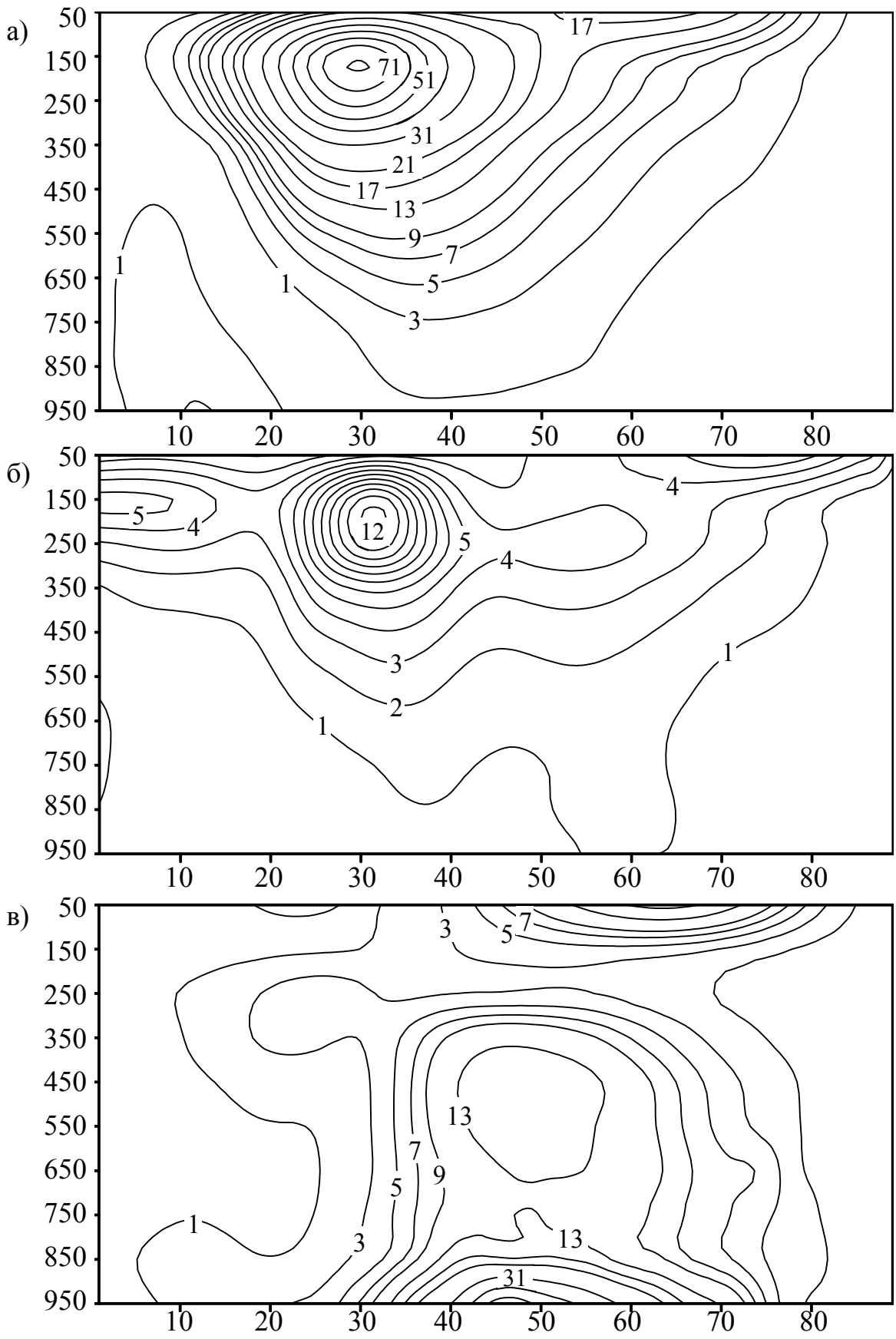

Рис. 4. Розподіл K_M (а), K_E (б) і P_E (в) взимку для північної півкулі ($\times 10^5$ Дж м$^{-2}$)

енергетики атмосфери дозволив отримати низку цікавих фактів, які не суперечать усталеному погляду у цьому питанні. Проте, аналіз потоків і перетворень різних видів енергій (наприклад, на основі рівнянь в [4, 7]) допоможе виявити деякі питання, що залишилися тут не розглянутими.

* *

Исследованы запасы среднезональной кинетической, вихревой кинетической и вихревой доступной потенциальной энергий. Показано, что запасы вихревой доступной потенциальной энергии определяются влиянием механизмов генерации, имеющими существенные отличия летом и зимой. Запасы среднезональной кинетической энергии сосредоточены в верхней тропосфере и определяются влиянием ячейки Гадлея, причем максимумы совпадают с наибольшими величинами вихревой кинетической энергии.

* *

1. *Дроздов О.А., Васильева В.А., Кобышева Н.В*. и др. Климатология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – 568 с.

2. *Лоренц Э.Н.* Природа и теория общей циркуляции атмосферы: Пер. с англ. – Л.: Гидрометеоиздат, 1970. – 259 с.

3. *Пальмен Э., Ньютон Ч.* Циркуляционные системы атмосферы: Пер. с англ. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. – 616 с.

4. *Iwasaki T.* Atmospheric energy cycle viewed from wave–mean-flow interaction and Lagrangian mean circulation // J. Atmos. Sci. – 2001. – Vol. 58. – P. 3039-3052.

5. *Khokhlov V.N.* Zonal mean precipitation and evaporation over Northern Hemisphere // Proc. Climate Conference 2001. – Utrecht (Netherlands). – 2001. – P. 115-116.

6. *McIntire M.E.* An introduction to the generalized Lagrangian-mean description of wave, mean-flow interaction // Pure Appl. Geophys. – 1980. – Vol. 118. – P. 152-176.

7. *Plumb R.A.* A new look at the energy cycle // J. Atmos. Sci. – 1983. – Vol. 40. – P. 1669-1688.