

ЗА ПЛЪТНОСТТА НА АТМОСФЕРАТА ОКОЛО 600 И 1050 km ПО ДАННИ ОТ „ЕХО 2“ И „ЕКСПЛОРЪР 19“

Румен Божков и Митко Гогошев

Сведенията за масата, движението и състава на високата част от атмосферата представляват изключителен интерес за много клонове от науката. Преди 6—7 години плътността и условията за пренос над 30—35 km можеха да се определят само в най-общ вид. Като допустимо приближение се приемаха стойности на плътността, които, както се оказа, се различават 8 до 12 пъти от истинските. И досега над 150 km сведенията за състава са крайно оскъдни.

Използвайки специалните метеорологични ракети, през последното десетилетие и особено през и след Международната геофизична година и Международната година на спокойното слънце стана възможно да се постигнат нива, лежащи високо над максималната височина на балонното сондиране. Въпреки че това са все още епизодични измервания, те все пак обогатяват познанията с моментните стойности на някои параметри, отнасящи се до височини 150—180 km, които рядко се надминават. Има данни, че много от особеностите, забелязани на синоптичните карти, се отнасят и са свързани с процесите, които стават на още по-големи височини. Над 200 km обаче преки измервания на плътността са вече фактически невъзможни с изключение на някои оптически методи.

Известно е, че за определяне плътността се използва еволюцията на орбитите на изкуствените спътници на Земята (ИСЗ). Фактически почти всички сведения за плътността над 200 km са добити косвено чрез ИСЗ. Само няколко дни след изхвърлянето на първия спътник от Съветския съюз стана ясно, че на височина 225 km атмосферата е почти 8 пъти по-плътна и температурата по-висока, отколкото се предполагаше дори в началото на Международната геофизична година (1957).

Изчисления за плътността се правят само за областта, в която се намира перигеят на орбитите на ИСЗ, който в 95% от случаите лежи между 200 и 400 km. За описване на общото състояние на атмосферата са необходими системни наблюдателни данни, обхващащи и по-големите височини. Броят на спътниците обаче, които имат по-висок перигей, е нищожен и за по-голямата част от тях отношението на масата им към площта на обвиващата ги повърхност е много голямо, а то не е изгодно

при определяне на плътността на слоевете, в които се движат. През 1960 г. беше изхвърлен спътник балон „Ехо 1“, който даде възможност да се определи плътността на 1700—1500 km, а 1964 г. беше първата година, през която бяха в орбита други два специални ИСЗ — „Експлорър 19“ и „Ехо 2“ с много малко отношение на масата към обвивната им площ. Данните от тях позволяват за пръв път да се изчисли по-точно плътността за 600 и 1050 km.

Задачата на настоящата работа е чрез данните от „Експлорър 19“ и „Ехо 2“ да се изчисли плътността за около 600 и 1050 km и нейните изменения през първата година на изхвърлянето на тези ИСЗ.

Данни и метод на обработка

Отношението между масата m и обвивната площ A за „Експлорър 19“ е $0,01680 \text{ g.cm}^{-2}$, а за „Ехо 2“ — $0,00485 \text{ g.cm}^{-2}$. „Експлорър 19“ е изхвърлен на 19 декември 1963 г. от нос Аргульо, Калифорния. Първоначалната му орбита е с перигей 590 km, апогей 2394 km, ексцентрицитет 0,113, наклон спрямо екватора $78^\circ,62$ и период 115,81 min. Той е алуминизирана сфера с диаметър 365 cm и тегло 7 kg.

„Ехо 2“ е изхвърлен на 25 януари 1964 г. от Ванденберг, Калифорния. Първоначалната му орбита е с перигей 1024 km, апогей 319 km, наклон $81^\circ,48$, ексцентрицитет 0,02 и период 108,8 min. Има сферична форма с диаметър 5100 cm и тегло 256 kg.

Когато един спътник се намира около своя перигей, тогава точно той изпитва най-голямо съпротивление поради нарастващата плътност и увеличаващата се скорост. Установено е [5, 7], че е възможно да се изчисли плътността за височината на перигея, ако са известни теглото на спътника, ефективното му сечение и изменението на периода за всяка обиколка — $\Delta P/\Delta t$.

Когато едно тяло се движи в силно разрежена среда, каквато е високата атмосфера, съпротивлението R , което то изпитва, може да се изчисли от

$$(1) \quad R = \frac{1}{2} c S_e \rho v^2,$$

където c е коефициент на аеродинамичното съпротивление, ρ — плътност на средата, в която се движи тялото, v е скоростта му, а S_e — ефективната му площ. За сферичен спътник с радиус r $S_e = \pi r^2$. Ако спътникът има форма, отличаваща се от сферата, и извършва въртеливи движения в различни посоки, както доста често се забелязва, поради неточното определяне на S_e грешките при пресмятането на плътността достигат до 20%. При „Експлорър 19“ и „Ехо 2“ допускането на подобна грешка е невъзможно, защото те са сфери.

За спътниците с ексцентрицитет $0,02 < e < 0,15$ повече от 95% от оказаното им съпротивление от атмосферата се получава, когато те имат истинска аномалия до $\pm 40^\circ$. Може да се сметне, че данните за плътността, изчислени по „Експлорър 19“, се отнасят за слой с височина от h_n (перигея) до $h_n + 178 \text{ km}$, а по „Ехо 2“ — за слой от h_n до $h_n + 35 \text{ km}$. Това се прави по формулата

$$p = \frac{r}{1 + e \cos \vartheta},$$

където p е параметър на орбитата, r — радиус-вектор на спътника, e — ексцентрицитет на орбитата, а ϑ — истинската аномалия ($\pm 40^\circ$).

Най-важният ефект от съпротивлението на атмосферата при преминаване на спътника през перигея е намаляването на периода P на спътника с времето t . Величината $\Delta P/\Delta t$ се нарича вековно ускорение и се установява чрез последователни наблюдения на спътника (ΔP в минути, Δt — една обиколка). Ефектът на атмосферното съпротивление принуждава спътника да премине постепенно на по-ниска орбита. При това скоростта му v се увеличава с Δv , за да може да се задържи той на новата орбита. Разделено Δv на времето, за което спътникът е изпитал съпротивлението на атмосферата ($v = \pm 40^\circ$), дава ускорението a m.s⁻². Като заместим в (1) $R = at$, за плътността в областта на перигея получаваме

$$\rho_n = \frac{2am}{c S_e v^2}.$$

По тази формула са извършени по-нататък всички изчисления.

Данните за вековното ускорение $\Delta P/\Delta t$, радиус-векторите r_n и r_a , ректасцензията на възходящия възел α_p , аргумента на перигея ω и аномалистичния период на обиколката са взети от бюлетина на Смитсоновия астрофизическа обсерватория в Кембридж, Масачусет [1]. Те са необходимите изходни данни за по-нататъшното изчисление.

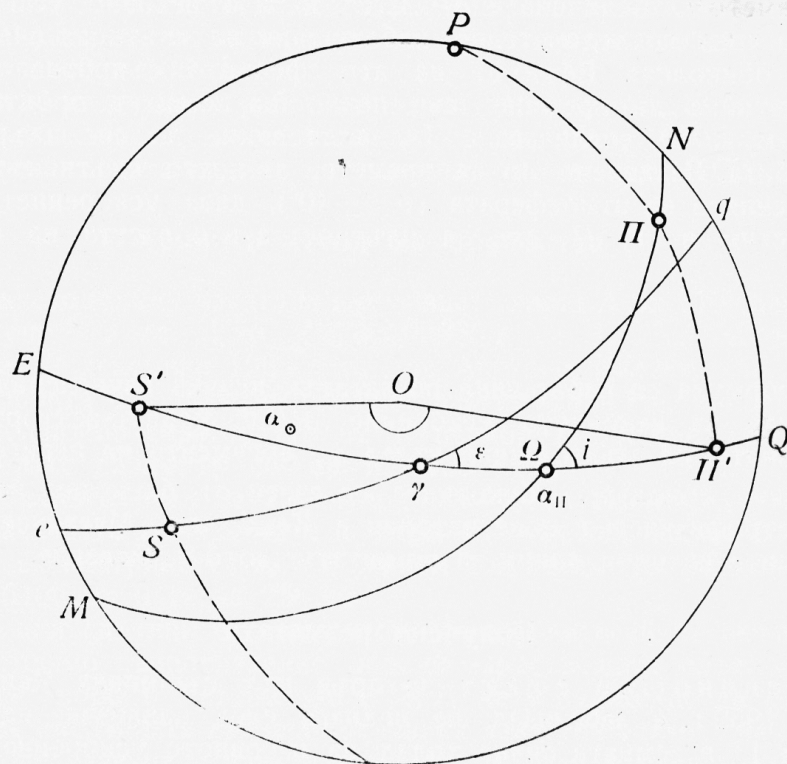
Получени резултати

За денонощен ефект за пръв път съобщава Якия [3], който през юли 1959 г. е забелязал, че веднага след навлизане на перигея на „Авангард 1“ в земната сянка ходът на вековното ускорение рязко се е изменил. След това Кинг-Хили [7] посочва този ефект за други 5 ИСЗ с перигей 550—600 km и доказва, че плътността на една и съща височина е много по-голяма, когато атмосферата е осветена, отколкото ако се намира в нощната сянка. Той намира, че за 600 km тази разлика е 6 пъти, а за 500 km — 3 пъти; за 200—300 km плътността не се изменя с повече от 10%.

Поради несферичната форма на Земята равнината, в която лежи орбитата на спътника, прецесира; по същата причина точката на перигея Π се движи по орбитата. В резултат перигеят може да остане малко време в осветената от слънцето атмосфера и бавно да се измества към неосветената страна. Това може да се изрази чрез геоцентричния ъгъл между Слънцето и перигея на орбитата $SO\Pi$ (фиг. 1). В общия случай този ъгъл е равен на разликата между ректасцензията на Слънцето и перигея.

За изясняване на редица от изчисленията е съставена схемата на фиг. 1, където EQ е небесният екватор, eq — еклиптиката, MN — орбитата на спътника, ε — наклонът на еклиптиката към екватора ($23^\circ 27'$), i — наклонът на орбитата към екватора, γ — пролетната равноденствена точка, O — центърът на Земята, Ω — възходящият възел на орбитата, S — Слънцето, Π — перигеят на орбитата на спътника, P — небесният полюс; дъгата $\gamma\Pi' = \alpha_n$ е ректасцензията на перигея, дъгата $\gamma S' = \alpha_\odot$ е ректасцензията на Слънцето. Прието е с известно приближение, че геоцентричният ъгъл между перигея и Слънцето е $S'O\Pi'$, $\alpha_n - \alpha_\odot$.

Тогава, ако се нанесе, както е направено на фиг. 2, по абсцисата времето, а по ординатата разликата $\alpha_n - \alpha_{\odot}$, ще може да се определи кога спътникът е имал перигея си в осветената част на атмосферата ($\alpha_n - \alpha_{\odot} < 90 + \beta$) и кога — в нощната сянка (тук $\beta = f(h_n, \delta_n, \delta_{\odot})$; за „Ехо 2“



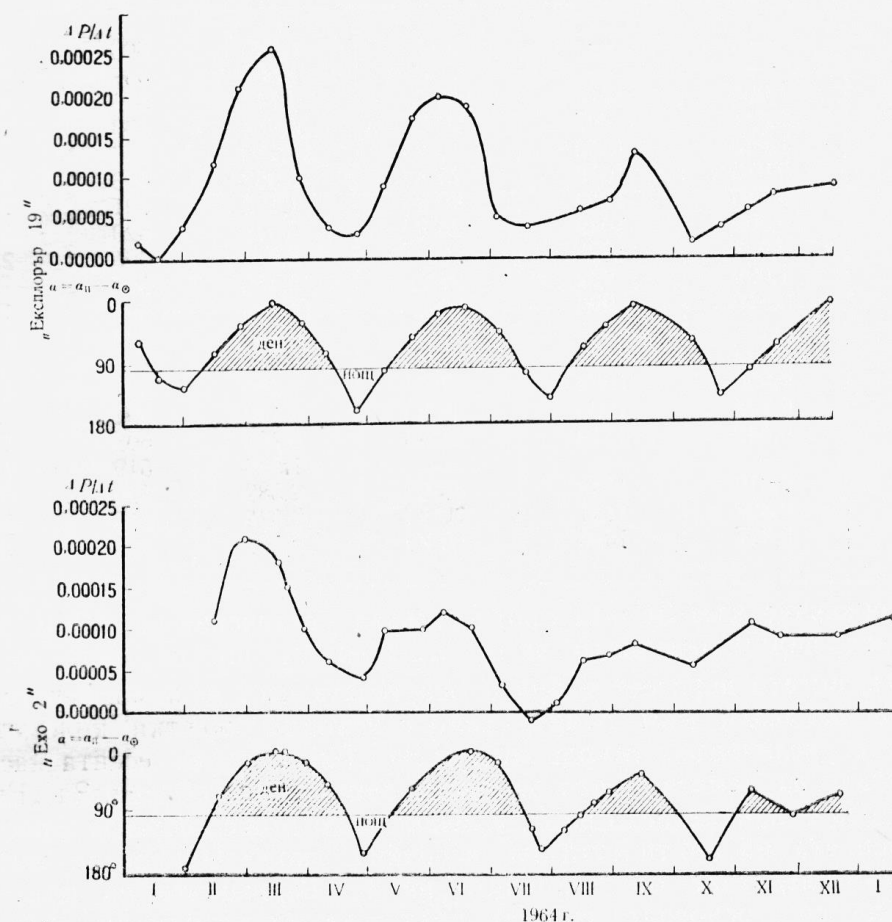
Фиг. 1

и „Ексилорър 19“ числено $\beta < 90^\circ$ и затова няма нужда от непрекъснатото му пресмятане). Правата с уравнение $\alpha_{\text{п}} - \alpha_{\odot} = 90 + \beta$ отделя тези два периода. Вижда се, че перигеят на спътника се е намирал периодично около 2 месеца в осветената част на атмосферата и около 1 месец в земната сянка. Престоят на перигея на „Ехо 2“ в осветената част към края на годината намалява.

Денонощният ефект оказва съществено влияние върху движението на ИСЗ чрез изменение на плътността. От фиг. 2 се вижда връзката между изменението на вековното ускорение и положението на перигея. Когато перигеят навлиза в осветената част на атмосферата, $\Delta P/\Delta t$ бързо нараства, а когато той се измести в областта на нощната сянка, $\Delta P/\Delta t$ бързо намалява. Това показва, че с навлизането в осветената част на атмосферата спътникът започва да изпитва по-голямо съпротивление. Той започва да се движи в по-плътна среда — това е логичното обяснение. Към увеличението на плътността като причина за ръста на $\Delta P/\Delta t$ вероятно се прибавя и ефектът на слънчевия вятър, на който ще се спрем след малко.

Ясно е от разгледаните дотук данни, че денонощният ефект на изменението на плътността е пряко свързан с положението на перигея спрямо Слънцето. Както се предполага [2, 6], денонощният ефект се дължи

на интензивно поглъщане на ултравиолетовата радиация с дължина под 1000 Å и корпускулярната радиация от Слънцето. Те са основна причина за загряването на високата атмосфера и наред с приливния ефект в тези височини могат до голяма степен да дадат представа за механизма на възникване на денонощния ефект.



Фиг. 2

От данните за около 600 km се получи, че стойностите на плътността през „деня“ са средно около 7 пъти по-големи от стойностите през „нощта“, като максималната разлика е 13 пъти. За 1050 km най-големите разлики в плътността достигат 18 пъти. Изчислените стойности на плътността са дадени в табл. 1.

Преди да се премине по-нататък, не е излишно да се припомни, че съгласно с теоретични изчисления, потвърдени от наблюденията, $\Delta P/\Delta t \sim \rho H^{1/2}$. Понеже височината на еднородната атмосфера H е константа за дадена височина, може, без да се допуска грешка, да се разглеждат измененията на $\Delta P/\Delta t$ вместо плътността ρ , което е по-удобно.

Изменението на височината на перигея на двата спътника е съпоставено с хода на вековното ускорение на фиг. 3. Забелязва се, че

Таблица 1

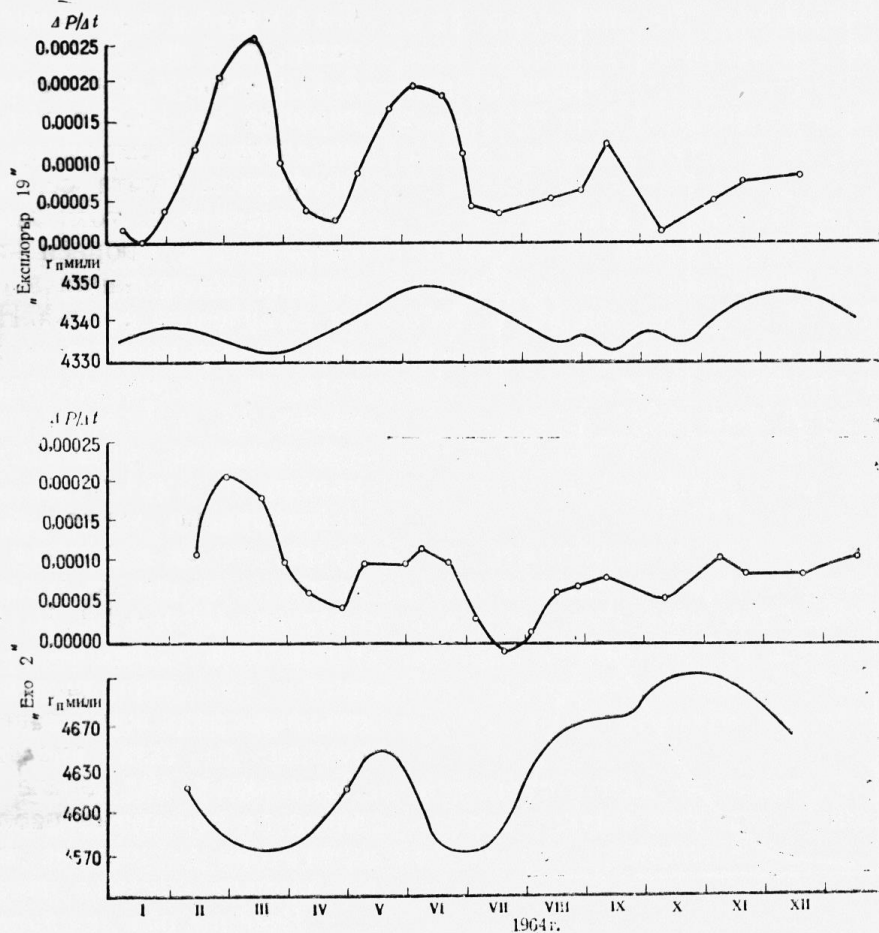
Дата 1964 г.	„Ехо 2“			„Експлорър 19“		
	$10^{-17} \rho_{\text{п}}$ г . см ⁻³	перигей		$10^{-17} \rho_{\text{п}}$ г . см ⁻³	перигей	
		височина, km	ширина		височина, km	ширина
4. I	—	—	—	0,790	600	45°С
1. II	—	—	—	1,585	607	70°С
15. II	1,005	1019	45°С	4,740	603	43°С
29. II	2,011	997	20°С	9,954	600	18°С
14. III	1,643	1010	3°Ю	10,290	593	3°Ю
28. III	0,915	1010	25°Ю	3,962	603	28°Ю
25. IV	0,366	1052	80°Ю	1,189	621	78°Ю
9. V	0,906	1049	35°Ю	3,539	620	55°Ю
24. V	0,916	1023	0°	6,681	605	28°Ю
6. VI	1,099	992	20°С	15,450	599	3°Ю
20. VI	0,916	990	50°С	14,680	595	17°С
18. VII	—	—	—	1,190	593	65°С
1. VIII	0,092	1068	48°С	—	—	—
15. VIII	0,550	1084	17°С	2,380	594	45°С
12. IX	0,734	1093	38°Ю	5,140	594	3°Ю
10. X	0,549	1119	45°Ю	0,793	605	55°Ю
24. X	—	—	—	1,590	619	76°Ю
7. XI	1,010	1144	35°Ю	2,382	620	60°Ю
21. XI	0,827	1141	70°Ю	9,528	616	30°Ю
19. XII	0,827	1096	55°Ю	3,577	604	12°С

на приближаване към Земята съответствува увеличение на $\Delta P/\Delta t$. Ако се вземе пред вид изменението на $\alpha_{\text{п}} - \alpha_{\odot}$ (фиг. 2), ще се види, че през периодите, когато перигеят е бил в осветената част на атмосферата, ИСЗ са се приближавали към Земята само с няколко десетки километра, а $\Delta P/\Delta t$ се е увеличавало твърде много. За „Ехо 2“ през есента настъпва отдалечаване на Земята, което засега не може да се обясни. За „Експлорър 19“ обаче изменението на $h_{\text{п}}$ е малко и то може добре да илюстрира, че измененията на плътността на височина около 600 km не могат да бъдат само следствие от промените на $h_{\text{п}}$. Вариациите на плътността остават да са в основната си част следствие на слънчевата дейност, а приносът от изменението на $h_{\text{п}}$ е минимален, особено като се знае, че градиентът на плътността на тези големи височини е много малък.

Слънчев вятър е прието да се нарича непрекъснатото корпускулярно излъчване от Слънцето за разлика от много по-интензивните, но краткотрайни потоци, свързани с петна, факли, ерупции и т. н. [8]. Той упражнява налягане, което е забелязано по отместването на газообразните опашки на кометите в страна, противоположна на Слънцето. Според [7] налягането на слънчевия вятър при дифузно отразяваща повърхност на разстоянието на земната орбита е $p = 5 \cdot 10^{-4} \text{ г . см}^{-2}$. В хода на изследването е изяснено, че ефектът на слънчевия вятър при определяне на плътността със спътници балони като „Ехо 2“ и „Експлорър 19“ е съществен.

Силата F , с която слънчевият вятър действа върху спътника, когато неговият перигей се намира в осветената част от атмосферата, е $F = pS_{\text{е}}$, където p е налягането на слънчевия вятър, а $S_{\text{е}}$ е напречното

сечение на спътника. От фиг. 4 става ясно, че когато ъгълът между ректасцензиите на Слънцето и перигея $\alpha = \alpha_{\odot} - \alpha_{\perp}$ е нула, компонентата F' , насочена към Земята, е равна на F ($F' = F \cos \alpha$). Компонентата F' е допирателна към траекторията и сменя посоката си, когато $\alpha = 0$. По



Фиг. 3

всяка вероятност тя оказва влияние върху промяната на наклона на орбитата на спътника.

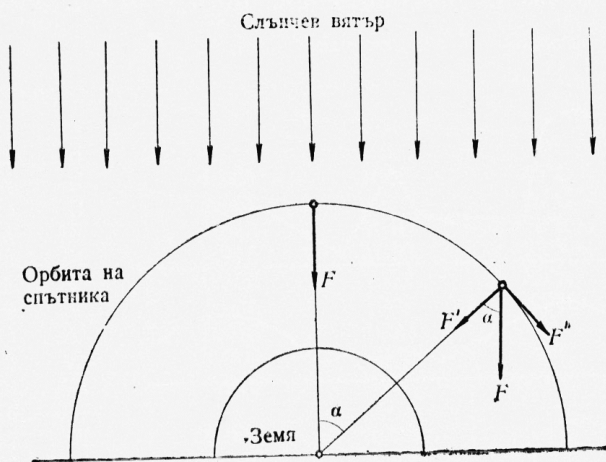
За силата $\bar{F}'$, която действа от „изгрева“ на перигея $\alpha = -\pi/2$ до неговия „залез“ $\alpha = \pi/2$, може да се вземе следният израз:

$$\bar{F}' = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} F \cos \alpha d\alpha.$$

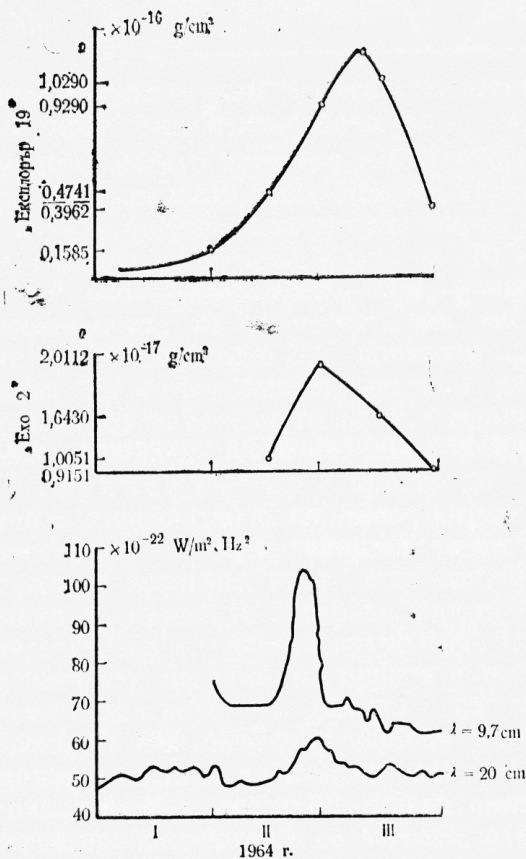
След пресмятането на интеграла се получава $\bar{F}' = 2F/\pi$, или за „Ехо 2“ приблизително $\bar{F}' \sim 4,202 \cdot 10^{-1} \text{ g}$. Тази сила създава на спътника ускорение $a = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-2}$, което е средно около 35% от действителното измерено ускорение за времето, когато „Ехо 2“ се е намирал в осветената от Слънцето атмосфера. То довежда до повишено отчитане на истинската

плътност средно с 35% и при особено прецизни изчисления трябва да се отчита точно за всяка точка.

За „Експлорър 19“ ефектът на слънчевия вятър не надминава 10%, защото диаметърът му е само 365 см.



Фиг. 4



Фиг. 5

Радиоизлъчването от Слънцето с дължина на вълната от 3 до 20 см според [3, 4, 7] корелира с измененията на периода на ИСЗ в резултат на изменение на плътността на атмосферата. Смята се, че радиоизлъчването в този диапазон е резултат на процеси на т. нар. гореща кондензация в областта на слънчевата корона. На фиг. 5 са сравнени кривите за интензитета на радиоизлъчването на вълни 9,7 и 20 см с вековното ускорение на спътниците за началото на 1964 г. За „Ехо 2“

действително може да се допусне, че за достигане на най-голямата за цялата година стойност на $\Delta P/\Delta t = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ min}$ за 1 обиколка е допринесло и влиянието на енергетичния поток, свързан с радиоизлъчването, проникнал до тази височина. За „Експлорър 19“ обаче поради липса на конкретни наблюдения през този период не може да се направи никакъв извод.

Въобще разглежданата 1964 год. спада към МГСС. и общото ниво на радиоизлъчването е много ниско. Например за $\lambda = 9,7 \text{ cm}$ от средно $250 \cdot 10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-2}$ през 1958 г. е спаднало на около $50 \cdot 10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-2}$ през разглежданата година. Изобщо липсват резки увеличения, които биха могли да служат като реперни точки при изследване на връзката между радиоизлъчването и плътността.

Заклучение

Разглеждането на данните от двата спътника дава възможност да се отбележат следните по-съществени особености.

Установено е значително нарастване на плътността при навлизането на перигея в осветената част на атмосферата — за 600 km около 7 пъти, а за 1050 km до 22 пъти спрямо плътността в нощната сянка.

Вариациите на височината на перигея особено за „Експлорър 19“ са незначителни. Това от своя страна показва, че големите промени в плътността не са причинени от тях, а са следствие от денонощния ефект, при който плътността на атмосферата зависи от поглъщането на слънчевата корпускуларна и ултравиолетова радиация.

Отчетен е ефектът на слънчевия вятър и се установява, че за „Ехо 2“ той причинява завишение на плътността средно с 35 %, а за „Експлорър 19“ — с 10 %.

Сравняването на стойностите на плътността на около 600 — 700 km с данни от 1958 г. („Авангард 1“) показва, че през 1964 г. плътността е по-малка средно около 10 пъти. За 1000 km чрез сравняване на публикуваните резултати за „Ехо 1“ (1960 г.) и нашите за „Ехо 2“ (1964 г.) се вижда, че имаме намаление около 9 пъти. Това е потвърждение на възгледа за пряка връзка между цикъла на слънчевата активност и изменението на плътността във високата атмосфера. През 1964 г. се намираме в минимума на слънчевата активност и затова не може да се провери съществуването на 27-дневна периодичност в изменението на плътността, отбелязана от други автори.

От данните може да се види, че атмосферната плътност не зависи съществено от географската ширина и годишното време. Действително има случаи, когато плътността е по-голяма през деня над екватора и по-ниска над полюсите през зимата, но това не може да се нарече вариации с ширината (по аналогия със земната география), защото истинският източник на тези промени е слънчевото, а не земното геометрично положение.

По получените стойности за плътността има възможност да се изчисли температурата на тези сравнително големи височини. Това е между другото и един от приносите на настоящото изследване.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bulletin Smithson. Astrophys. obs., Cambridge Mass., 1964.
2. Harris J. & W. Prister, NASA Goddard Space Flight Centre, April 12, 1962.
3. Jacchia L. G., Smithson. Inst. Astrophys. Obs., Special Rep., No. 29, 1959.
4. Jacchia L. G., Jour Geophys. Res., 65, 1960, 2775.
5. King-Hele D. G., Nature, 183, 1959, 1224.
6. King-Hele D. G., Nature, 186, 1960, 4729.
7. King-Hele D. G., Satellites and Scientific Research, London, 1962.
8. Паркер Е. Н., Динамические процессы в межпланетной среде (перев. с англ.), Москва, 1965.

Постъпила на 1. V. 1966 г.

О ПЛОТНОСТИ АТМОСФЕРЫ НА ВЫСОТЕ 600 И 1050 km
ПО ДАННЫМ „ЭХО 2“ И „ЭКСПЛОРЕР 19“

Р. Божков и М. Гогошев

(Резюме)

По сокращению орбитальных периодов искусственных спутников „Эхо 2“ и „Эксплорер 19“, в настоящей работе вычислена плотность атмосферы на высоте 600 и 1050 km. В изменении плотности обнаружены суточный эффект и зависимость от солнечной активности. Вычислено также влияние солнечного ветра.

THE DENSITY OF THE ATMOSPHERE AT ABOUT 600 AND 1,050 km
ACCORDING TO DATA FROM "ECHO 2" AND "EXPLORER 19"

R. Bozhkov and M. Gogoshev

(Summary)

The density of the atmosphere at altitudes of 600 and 1,050 km is calculated in this paper on the basis of the contraction of the orbital periods of the satellites "Echo 2" and "Explorer 19". The change in the density has been confirmed by the diurnal effect and the dependence on solar activity. The influence of the solar wind has also been calculated.