

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ КАТАЛОГ СОЛНЕЧНО-СИНХРОННЫХ ШИРОТНО-СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ОРБИТ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ЭКОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО НАБЛЮДЕНИЯ

НПП ВНИИЭМ является пионером освоения в нашей стране солнечно-синхронных орбит (с 29.06.1977), а затем (с 04.11. 1994) и широтно-стабилизированных по высоте и местному времени орбит. Это стало возможным благодаря запуску космических аппаратов (КА) с космодрома Байконур в юго-восточном вместо северного направления ракетносителями (РН) «Восток», а затем и РН «Зенит» с их существенно более высокими точностями выведения непосредственно на широтно-стабилизированные близкие к солнечно-синхронным орбиты без дополнительных коррекционных затрат. Для оперативных КА, передающих информацию по радиоканалу (КА ОЭГФН), устойчивое достижение на близких к солнечно-синхронным орбитах изоширотной стабильности местного времени и высоты является принципиально важным, поскольку при этом достигается требуемая идентичность на длительных временных интервалах условий гидрометеорологического, природоресурсного и экологического наблюдения по освещённости и пространственному разрешению. Рассматриваемый на диаграмме и в таблицах орбитальный каталог, геометрически представляет собой двухпараметрическое семейство обратной зависимости высоты восходящего узла h_{Ω} от компонент обзорно-параметрического индекса орбит $N\{M/k\}n$ - (ОПИ). Здесь: $N=erts(NM+k)/M$ - суточное число витков, как ближайшее целое к его точному значению $N_T=n/M$, где M и n - показатели периодичности изотрассового прохождения КА (в сутках и витках), $k < M/2$ -показатель суточного смещения трасс (N и k - параметры, а M - аргумент зависимости) [1-3].

Высота восходящего узла является функционалом драконического периода обращения T_{Ω} как функции орбитальных элементов q , зависящих от компонент ОПИ и геофизических констант C

$$h_{\Omega} = \Phi \{ T_{\Omega} [q(N, M, k, C)] \}.$$

В этом функционале C включает: $\omega_3 = 7,292115 \cdot 10^{-5} c^{-1}$ - угловая скорость вращения Земли, $\mu = 3,986005 \cdot 10^5 \text{ км}^3 c^{-2}$ - произведение гравитационной постоянной на её массу, $a_e = 6378,14 \text{ км}$ - экватори-

альный радиус, $C_{20} = -1082,627 \cdot 10^{-6}$, $C_{30} = 2,536 \cdot 10^{-6}$, $C_{40} = 1,625 \cdot 10^{-6}$, $C_{50} = 0,227 \cdot 10^{-6}$ и $C_{60} = -0,545 \cdot 10^{-6}$ – безразмерные коэффициенты разложения гравитационного потенциала в ряд по сферическим функциям [4], $T_{C,c} = 86400$ с – продолжительность средних солнечных суток, $V_{3,\Gamma} = 31558150$ с – продолжительность звездного года [5].

Алгоритм расчёта формируется на основе задаваемой для каждой орбиты (точка на рисунке) L -й совокупности исходных параметров ОПИ $\{N, M, k\}_L$, итеративного вычисления (j –номер итерации) орбитальных элементов $q_{L,j} \supset (T_{др}$ и T_0 – драконический и оскулирующий периоды обращения, a –большая полуось, i – наклонение, e –эксцентриситет, ω –аргумент перигея L, j . Высотная область существования солнечно-синхронных орбит ограничена: снизу превышением орбиты в восходящем узле над экватором, сверху – максимумом $i = 180^\circ$. В табл. 1 представлены параметры и орбитальные элементы в точках N -перехода к очередным значениям ОПИ $\{N, M, k\}$ на границах высотных диапазонов каталога.

Таблица 1

Параметры и орбитальные элементы на границах высотных диапазонов

$N; M; k$	$T_{др}$, мин	a , км	i , град	e	ω , град	h_Ω , км	$T_{др}-T_0$, с	dT ср, с
6; 3.; 1..	227,368	12350,6	179,97..	4,34E-04	4,89	5967,12	-17,651	
7; 1; 0	205,714	11551,3	142,182	5,43E-04	46,904	5168,89	-12,587	-15,119
7; 2; 1	192	11031,1	132,215	6,08E-04	55,493	4649,12	-10,199	-11,393
8; 1; 0	180	10565,8	125,332	6,64E-04	60,285	4184,22	-8,5451	- 9,372
8; 2; 1	169,412	10146,9	120,131	7,13E-04	63,198	3765,48	-7,3774	- 7,961
9; 1; 0	160	9767,21	116,058	7,58E-04	65,032	3385,94	-6,5398	- 6,958
9; 2; 1	151,579	9421,24	112,78	7,99E-04	66,197	3040,06	-5,9313	- 6,236
10; 1; 0	144	9104,42	110,091	8,38E-04	66,92	2723,29	-5,4848	- 5,708
10; 2; 1	137,143	8813	107,851	8,74E-04	67,342	2431,88	-5,1548	- 5,32
11; 1; 0	130,909	8543,86	105,963	9,10E-04	67,552	2162,75	-4,9101	- 5,032
11; 2; 1	125,217	8294,41	104,355	9,44E-04	67,611	1913,28	-4,7282	- 4,819
12; 1; 0	120	8062,42	102,973	9,77E-04	67,559	1681,27	-4,5936	- 4,661
12; 2; 1	115,2	7846,03	101,777	1,01E-03	67,424	1464,85	-4,4951	- 4,544
13; 1; 0	110,769	7643,62	100,734	1,04E-3	67,229	1262,39	-4,4237	- 4,46
13; 2; 1	106,667	7453,79	99,82	1,07E-03	66,988	1072,52	-4,3737	- 4,399
14; 1; 0	102,857	7275,34	99,014	1,10E-03	66,713	894,018	-4,3401	- 4,357
14; 2; 1	99,31	7107,22	98,301	1,14E-03	66,412	725,843	-4,3195	- 4,329
15; 1; 0	96	6948,5	97,666	1,17E-03	66,092	567,067	-4,3091	- 4,314
15; 2; 1	92,903	6798,36	97,098	1,20E-03	65,758	416,877	-4,3067	- 4,308
16; 1; 0	90	6656,1	96,589	1,23E-03	65,413	274,552	-4,3108	- 4,309
16; 2; 1	87,273	6521,06	96,131	1,26E-03	65,061	139,455	-4,3201	- 4,315
17; 1; 0	87,706	6392,68	95,717	1,29E-03	64,703	11,014	-4,3334	- 4,327

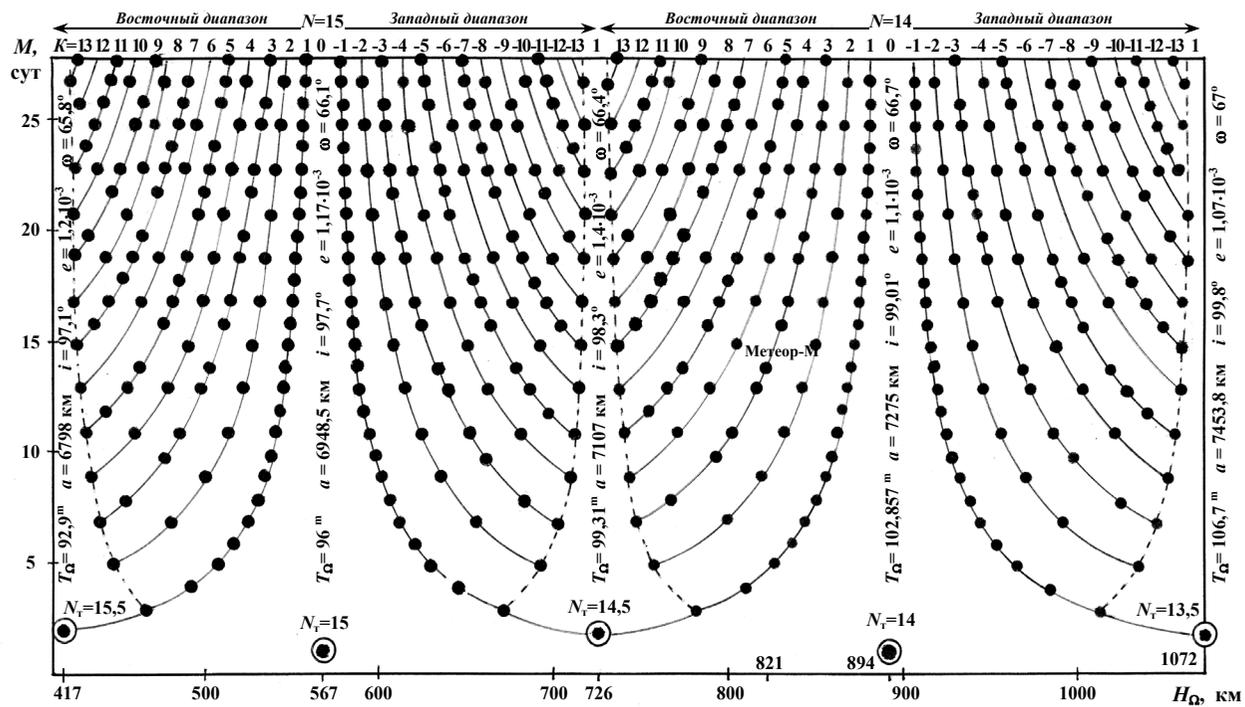


Диаграмма обзорных параметров солнечно-синхронных широтно-стабилизированных орбит
 КА типа «Метеор-М» и «Ресурс-О»

В последнем столбце табл. 1 даны средние величины разности между драконическим и оскулирующим периодами обращения $T_{\Omega} - T_O$. Эти величины (dT_{CP}) указаны как полусуммы значений текущей и предыдущей строк. Оценки показали, что примерно метровая дискретность итеративного расчета высот внутри соответствующих диапазонов каталога достигается для трех последовательных приближений, начиная с $dT_J = dT_{CP}$ и, соответственно, $P_J = a_0$, при решении ниже приведенной системы уравнений. В табл. 1 выделена также преимущественная область применения солнечно-синхронных широтно-стабилизированных орбит для КА ОЭГФН. Верхний по высоте опасный предел, больший ~ 1000 км, ограничивает область применения длительно существующих КА, поскольку обусловлен вредным воздействием космической радиации на требуемое долговременное (5-10 лет) функционирование бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Этому соответствует на диаграмме область применения, ограниченная значениями параметров 14-й и 15-й (по N) подобластей области существования.

Масштаб диаграммы как качественной зависимости h_{Ω} от N , M и k принят по h_{Ω} примерно 4,25 км в 1 мм. А строгая упорядоченная соответственно монотонным изменениям h_{Ω} зависимость представлена в табл.2, которая позволяет строить диаграмму в любом удобном для потребителя масштабе.

Подсчитано, что в четырех (по совокупности N и $signk$) высотных диапазонах, инвариантных по числу орбит на принятых 4-недельных (по M) интервалах, содержится суммарно 485 орбит: $120 \cdot 4$ внутри, плюс 5 на границах диапазонов для $h_{\Omega} \approx 417, 567, 729, 894$ и 1072 км и $N_T = 15,5; 15; 14$ и $13,5$ ($\{M; k\} = \{2;1\}, \{1;0\}, \{2;1\}, \{1;0\}$ и $\{2;1\}$ соответственно. В начале высотных диапазонов на диаграмме, в соответствии с табл.1., представлен полный набор значений орбитальных элементов, допускающий линейную интерполяцию внутри каждого высотного диапазона.

Значения орбитальных элементов q_{LJ} обеспечивают: солнечную синхронность прецессии орбитальной плоскости i ; периодичность изотрассового прохождения $T_{др} = T_{CC} / NT = T_{CC} M / n$ и a [4-6]; изоширотную стабильность высоты e и местного времени ω [7]. Необходимые для итеративного вычисления q_{LJ} зависимости для вычисления коэффициентов разности между драконическим $T_{др}$ и оскулирующим T_O периодами обращения dT_J , констант для большой полуоси a_J и наклона i_J - (C_{dT} , C_A , и C_i), а также изоширотно стабильные значения e_J и ω_J рассчитываются путем тождественных преобразований зависимостей систематизированных в работах [4-7].

В результате получаем систему уравнений:

$$dT_J = C_{dT} (a_e/r_J)^{1/2} [(5 \cos^2 i_J - 1)(r/p)_J^{5/2} + 2(a/r)_J^{5/2}], \text{ где } C_{dT} = 3/4(T_{\text{om}} C_{20}) = -4,1161596 \text{ с};$$

$$a_J = [(T_{\text{др}} - dT_J) C_A]^{2/3}, \text{ где } C_A = \mu^{1/2}/2\pi = 100,48218 \text{ км}^{3/2} \text{ с}^{-1};$$

$$i_J = \text{Arccos}(C_i T_{\text{др}} p_J^2), \text{ где } C_i \approx 2/3(Y_{3B} C_{20} a_e^2)^{-1} = -4,796564 \cdot 10^{-13};$$

$$e_J = [0,25(a_e/p_J)^4 (3 - 2 \sin^2 i_J)^2 C_{20}^2 + \sin^2 i_J (C_{30}/C_{20})^2]^{1/2};$$

$$\omega_J = \arctg[(p_J/a_e) \sin i_J / (3 - 2 \sin^2 i_J)] (C_{30}/C_{20})^2,$$

где: r_J и p_J – экваториальный радиус и фокальный параметр орбиты, $T_{\text{om}} = 2\pi a_e^{3/2} \mu^{-1/2} = 84,48913$ мин – минимум оскулирующего периода обращения гипотетической экваториальной орбиты, $T_o = 2\pi a_J^{3/2} \mu^{-1/2} = T_{\text{др}} - dT_J$ – оскулирующий период обращения текущей орбиты.

Окончание расчетов осуществляется по достижении дискретности вычисления высоты восходящего узла порядка десятка метров, $\text{Mod}(h_{\Omega, j+1} - h_{\Omega, j}) \leq \sim 10$ м, эквивалентной точности определения орбиты по данным автономной системы навигации (АСН).

Таблица 2

**Высотная область применения
стабильных солнечно-синхронных орбит КА ОЭГФН**

№ орбиты	M; k	N = 15		N = 14	
		k > 0	k < 0	k > 0	k < 0
«0»*	1; 0 2; 1		567,067		894,019
1	27;13	416,877	719,800	731,899	1065,709
2	25;12	422,729	719,318	732,384	1065,166
3	23;11	423,238	718,751	732,954	1064,527
4	21;10	423,845	718,076	733,632	1063,767
5	19;9	424,579	717,26	734,453	1062,848
6	17;8	425,487	716,252	735,467	1061,713
7	15;7	426,637	714,975	736,753	1060,275
8	28;13	427,336	714,201	737,534	1059,403
9	13;6	428,142	713,307	738,435	1058,396
10	24;11	429,083	712,265	739,487	1057,223
11	11;5	430,195	711,034	740,730	1055,836
12	20;9	431,530	709,557	742,224	1054,173
13	9;4	433,164	707,753	744,049	1052,142
14	25;11	434,471	706,311	745,511	1050,518
15	16;7	435,206	705,500	746,333	1049,605
16	23;10	436,006	704,619	747,228	1048,613

Продолжение табл. 2.					
17	7;3	437,835	702,606	749,273	1046,346
18	26;11	439,454	700,826	751,083	1044,343
19	19;8	440,050	700,171	751,750	1043,605
20	12;5	441,344	698,751	753,196	1042,007
21	17;7	442,790	697,166	754,814	1040,222
22	22;9	443,579	696,301	755,696	1039,249
23	27;11	444,076	695,757	756,252	1038,636
24	5;2	446,264	693,364	758,699	1035,943
25	28;11	448,375	691,058	761,060	1033,347
26	23;9	448,834	690,557	761,574	1032,783
27	18;7	449,543	689,778	762,373	1031,906
28	13;5	450,813	688,400	763,787	1030,356
29	21;8	451,897	687,219	765,000	1029,027
30	8;3	453,860	685,302	766,972	1026,869
31	27;10	455,032	683,811	768,507	1025,192
32	19;7	455,610	683,184	769,153	1024,486
33	11;4	457,029	681,645	770,740	1022,754
34	25;9	458,956	680,475	771,947	1021,438
35	14;5	458,956	679,557	772,896	1020,405
36	17;6	460,203	678,207	774,432	1018,882
37	20;7	461,077	677,285	775,269	1017,823
38	23;8	461,723	676,584	775,992	1017,038
39	26;9	462,220	676,028	776,548	1016,434
40	3;1	466,032	671,916	780,814	1011,808
41	28;9	469,578	668,103	784,782	1007,519
42	25;8	470,003	667,646	785,258	1007,005
43	22;7	470,545	667,064	785,864	1006,35
44	19;6	471,258	666,297	786,863	1005,489
45	16;5	472,240	665,247	787,760	1004,306
46	13;4	473,674	683,710	789,386	1002,578
47	23;7	474,672	662,641	790,483	1001,376
48	10;3	475,970	661,253	791,936	999,814
49	27;8	477,077	660,070	793,175	998,485
50	17;5	477,728	659,375	793,904	997,703
51	24;7	478,461	658,593	794,724	996,824
52	7;2	480,241	656,695	796,716	994,689
53	25;7	481,951	654,874	798,631	992,641
54	18;5	482,616	654,166	799,375	991,846
55	11;3	484,129	652,558	801,069	990,037
56	26;7	485,176	651,446	802,242	988,786
57	15;4	485,945	650,630	803,102	987,869
58	19;5	486,997	649,514	804,280	986,615
59	23;6	487,683	648,787	805,048	989,797
60	27;7	488,166	648,275	805,589	985,221

Продолжение табл. 2					
61	4;1	490,946	645,334	808,701	981,915
62	25;6	493,950	642,160	812,066	978,348
63	21;5	494,523	641,556	812,707	977,669
64	17;4	495,366	640,668	813,651	976,671
65	13;3	496,727	639,235	815,175	975,059
66	22;5	497,780	638,127	816,354	973,814
67	9;2	499,301	636,528	818,057	972,017
68	23;5	500,756	635,000	819,688	970,299
69	14;3	501,692	634,017	820,736	969,196
70	19;4	502,826	632,829	822,006	967,860
71	24;5	503,488	632,136	822,747	967,081
72	5;1	506,003	629,504	825,564	964,123
73	26;5	508,327	627,077	828,167	961,396
74	21;4	508,880	626,499	828,787	960,746
75	16;3	509,780	625,560	829,795	959,692
76	27;5	510,480	624,831	830,580	958,872
77	11;2	511,499	623,770	831,721	957,680
78	28;5	512,481	622,747	832,822	956,531
79	17;3	513,117	622,086	833,534	955,780
80	23;4	513,892	621,280	834,402	954,843
81	6;1	516,087	619,000	836,861	952,322
82	25;4	518,108	616,904	839,126	949,967
83	19;3	518,77	616,243	839,842	949,224
84	13;2	519,975	614,971	841,218	947,795
85	20;3	521,143	613,763	842,526	946,439
86	27;4	521,705	613,182	843,157	945,786
87	7;1	523,312	611,522	844,958	943,921
88	22;3	525,286	609,436	847,170	941,634
89	15;2	526,208	608,536	848,203	940,568
90	23;3	527,090	607,628	849,191	939,548
91	8;1	528,744	605,926	851,045	937,636
92	25;3	530,267	604,361	852,752	935,879
93	17;2	530,984	603,625	853,555	935,053
94	26;3	531,873	602,918	854,328	934,258
95	9;1	532,976	601,582	855,789	932,758
96	28;3	534,186	600,342	857,145	931,365
97	19;2	534,760	599,754	857,788	930,706
98	10;1	536,366	598,111	859,589	928,861
99	21;2	537,821	596,625	861,219	927,192
100	11;1	539,143	595,274	862,702	925,676
101	23;2	540,352	594,042	864,057	924,292
102	12;1	541,460	592,913	865,299	923,025
103	25;2	542,479	591,874	866,442	921,859
104	13;1	543,421	590,916	867,498	920,783

Продолжение табл. 2.					
105	27;2	544,293	590,029	868,476	919,788
106	14;1	545,103	589,206	869,384	918,863
107	15;1	546,562	587,724	871,020	917,200
108	16;1	547,839	586,429	872,452	915,746
109	17;1	548,967	585,286	873,716	914,463
110	18;1	549,969	584,271	874,841	913,324
111	19;1	550,866	583,363	875,847	912,305
112	20;1	551,674	582,546	876,753	911,387
113	21;1	552,405	581,807	877,572	910,558
114	22;1	553,070	581,135	878,318	909,804
115	23;1	553,677	580,522	878,998	909,116
116	24;1	554,234	579,960	879,623	908,486
117	25;1	554,748	579,447	880,198	907,906
118	26;1	555,219	578,966	880,728	907,370
119	27;1	555,657	578,524	881,219	906,874
120	28;1	556,064	578,114	881,675	906,414

Примечание. Нулевые номера орбит («О»*) соответствуют границам высотных диапазонов, указанных в табл. 1.

Таким образом, графоаналитический каталог широтно-стабилизированных по высоте и местному времени солнечно-синхронных орбит, представленный на диаграмме и в табл. 2 содержит монотонно упорядоченную последовательности M и k , соответствующую изменениям высоты восходящего узла. При этом, как следует из рассмотрения табл. 2, для восточного направления суточного смещения трасс ($k > 0$) имеет место монотонное возрастание высоты, а для западного ($k < 0$) её монотонное убывание.

Каталог позволяет осуществлять оперативное обозрение и выбор орбит КА ОЭГФН в рекомендованной области их применения ($N=14$ и 15), отвечающих требованиям по периодичности изотрассового покрытия подстилающей поверхности $M \subseteq 4$ -х недель, с учётом направления суточного смещения трасс k . Каталог может быть продолжен за указанные пределы по M с использованием аналитической процедуры работы [3] в виде минимизируемых значений модуля целочисленной разностной функции $M_j \Delta k_{j+1} - k_j \Delta M_{j+1} = \pm 1$ и экстраполируемых данных табл. 2.

В качестве примера отметим, что для варьируемой орбиты КА типа «Ресурс-О1» №4 и «Метеор-М» (порядковый номер номинала по табл. 2 соответствует №69) приращение $\Delta M_{j\pm 1} = \pm 9$ и $\Delta K_{j\pm 1} = \pm 2$. Экстраполируемые значения обзорных параметров приведены в табл. 5 на стр. 232 настоящего сборника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубровинский Я.В. Параметрические инварианты солнечно-синхронных орбит геофизического наблюдения. М.: Труды ВНИИЭМ. Т. 83. 1987.
2. Глобальный геофизический мониторинг из космоса. Особенности динамики КА и управления информационными комплексами /Трифонов Ю.В., Чуткерашвили Г.Д., Дубровинский Я.В. М.: Труды ВНИИЭМ. Т. 91. 1989.
3. Особенности эволюции орбит космических аппаратов оперативного геофизического наблюдения /Дубровинский Я.В., Чуткерашвили Г.Д., Смирнов Г.С. М.: Труды ВНИИЭМ. Т. 93. 1990.
4. Journal of Geophysical Research V. 84, p. 138, July 30, 1979.
5. Вингардт П.М., Эльясберг П.Е. Солнечно-синхронные и кратные орбиты. ИКИ АН СССР. Препринт-542. М.: 1980. 14 с.
6. Основы теории полёта космических аппаратов /Под редакцией Нариманова Г.С. и Тихонравова М.К. М.: Изд-во «Машиностроение». 1972.
7. Долгосрочный прогноз движения ИСЗ по почти круговым орбитам с учетом произвольного числа зональных гармоник /Б.В. Кугаенко, П.Е. Эльясберг // Сб. Математические методы моделирования в космических исследованиях. М.: «Наука». 1971.