

Ing. Milan Burša, DrSc.

**Dynamický způsob určení souřadnic družicových stanovišť**  
(v ruském znění: „Динамический метод определения координат  
пунктов наблюдения ИСЗ“)

Спутниковая геодезия проделала за короткий срок всего шестнадцати лет своего существования значительный прогресс. Она стала весьма эффективной дисциплиной не только в области решения научных геодезических задач, связанных с определением фигур и гравитационных полей небесных тел, но и в области решения практических задач, связанных с определением координат пунктов земной поверхности.

В течение примерно первых десяти лет точность определения геоцентрических векторов ИСЗ была значительно ниже точности определения топоцентрических векторов с наземных станций на ИСЗ. Если иметь в виду направления, то точность определения направлений геоцентрических векторов сравнительно долго уступала точности определения направлений топоцентрических векторов, она была не лучше чем  $\pm 10''$ , тогда как первоклассные оптические камеры с соответствующими затворами давали точность  $\pm 4''$ , или даже лучшую.

В результате такого положения геометрическими методами спутниковой геодезии, т.е. без наличия точных элементов орбит ИСЗ, определялись положения наземных станций точнее, чем динамическими спутниковыми методами. Именно это положение дало направление развитию и содержанию геометрической спутниковой геодезии, которой решались все геодезические задачи, не нуждаю-

щиеся в точных орбитах ИСЗ, в их числе и определение элементов трансформирования геодезических систем относимости. За динамической спутниковой геодезией же оставались задачи, которые не под силу было решать геометрическим путем, то есть, прежде всего задачи, связанные с определением положения центра масс Земли и геоцентрических координат пунктов земной поверхности.

Однако, в последние 3 - 5 лет положение вещей коренным образом изменилось. Хотя и точность геометрических методов спутниковой геодезии осталась практически прежней, точность динамических же возросла значительно. Это видно, например, по материалам [1], где точность определения координат 104 спутниковых станций геометрическим и динамическим методами практически та же самая, около  $\pm 2$  м,  $\pm 3$  м.

Такое увеличение точности динамических спутниковых методов стало возможным, прежде всего, в результате возможности уточнения самых орбит некоторых ИСЗ. Эта точность, по [1], около  $\pm 4$  м -  $\pm 10$  м. Но есть реальная возможность добиться и высшей точности, порядка  $\pm 1$  м. Таким образом, перед динамической спутниковой геодезией открываются, точнее уже открыты, новые возможности. Некоторые ИСЗ могут стать носителями достаточно точных координат и т.о. динамическими методами можно решать основные геодезические задачи, в том числе и определять координаты точек земной поверхности так, что достаточно наблюдений с одной лишь, именно определяемой, точки.

Однако, прежде всего рассмотрим более подробно и по-своему оценим точность данных [1], полученных динамическим методом.

Представленная совокупность геоцентрических координат

и высот над уровнем моря 104 спутниковых станций и гармоник геопотенциала до 23-й степени в случае зональных  $J_n^{(0)}$  и до 18-й степени в случае тессеральных и секториальных  $J_n^{(k)}$ ,  $S_n^{(k)}$ , включительно всех порядков, позволяют вычислить линейный масштабный фактор

$$(1) \quad R_0 = \frac{fM}{W_0} ;$$

$f$  - гравитационная постоянная,  $M$  - масса Земли,  $W_0$  - геопотенциал регуляризованного и сглаженного геоида, как это соответствует степени удержанных гармоник.

Вычисление фактора (1) можно выполнить для каждой спутниковой станции в отдельности и это даст возможность дать некоторую сравнительную оценку точности координат станций. Строго говоря, здесь следовало бы учесть некоторые тонкие эффекты, связанные с возмущениями масс между земной поверхностью и сферой сходимости, т.е. геоцентрической сферой с радиусом, равным геоцентрическому радиусу-вектору спутниковой станции. Но это мы сделаем впоследствии, в целях более точного решения.

В таблице 1 приведены названия и номера станций, в таблице 2 список использованных ИСЗ, в таблице 3 геоцентрические координаты станций.

В таблице 4 даны высоты над уровнем моря станций, значения

$$(2) \quad \rho_{\text{геоид}} \doteq \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - H$$

точек  $P'$  на геоиде, соответствующих положениям  $P$  станций наблюдения ИСЗ на земной поверхности, дальше геоцентрические

Таблица 1

Спутниковая станция №	Название, страна
7050	Greenbelt, США
1021	Blossom Point, США
7060	Guam, США
7816	Stephanion, Греция
7818	Colomb-Béchar, Алжир
8015	Haute Provence, Франция
7815	Haute Provence, Франция
7809	Haute Provence, Франция
9001	Organ Pass, США
7901	Organ Pass, США
9002	Olifantsfontein, Южно-Африканская Республика
7902	Olifantsfontein, Южно-Африканская Республика
9022	Olifantsfontein, Южно-Африканская Республика
9003	Woomera, Австралия
9023	Island Lagoon, Австралия
9004	San Fernando, Испания
7804	San Fernando, Испания
9005	Tokyo, Япония
9025	Dodaira, Япония
9006	Naini Tal, Индия
9007	Arequipa, Перу
7907	Arequipa, Перу
9027	Arequipa, Перу
9008	Shiraz, Иран
9009	Curacao, Антильские острова
9010	Jupiter, США
9011	Villa Dolores, Аргентина
9012	Maui, США
7912	Maui, США
9020	Dakar, Сенегал
7820	Dakar, Сенегал
9021	Mt. Hopkins, США
7921	Mt. Hopkins, США
9028	Addis Abeba, Эфиопия
9029	Natal, Бразилия
7929	Natal, Бразилия
9039	Natal, Бразилия
9031	Comodoro Rivadavia, Аргентина
9091	Dionysos, Греция
7930	Dionysos, Греция
9030	Dionysos, Греция
9113	Rosamond, США
9114	Cold Lake, Канада
9115	Harestua, Норвегия
9117	Johnston IS., США
8019	Nice, Франция
9066	Zimmerwald, Швейцария
9074	Рига, СССР
9077	Ужгород, СССР
9080	Malvern, Великобритания

Таблица 1 (Продолжение)

4711	California JPL, США
4712	California JPL, США
4714	California JPL, США
4741	Австралия JPL
4742	Австралия JPL
4751	Южная Африка JPL
4761	Испания JPL
4762	Испания JPL
6002	Beltsville, США
6003	Moses Lake, США
6004	Shemya, США
6006	Tromso, Норвегия
6007	Azores, Португалия
6008	Paramaribo, Нидерланд
6009	Guito, Эквадор
6011	Maui, США
6012	Wake Is., США
6013	Kanoya, Япония
6015	Mashhad, Иран
6016	Catania, Италия
6019	Villa Dolores, Аргентина
6020	Easter Is., Чили
6022	Tutuila, Самоа США
6023	Thursday Is., Австралия
6031	Invercargill, Новая Зеландия
6032	Caverham, Австралия
6038	Revilla Gigedo, Мексико
6039	Pitcairn Is., Великобритания
6040	Cocos Is., Австралия
6042	Addis Abeba, Эфиопия
6043	Cerro Soumoro, Чили
6044	Heard Is., Австралия
6045	Mauritius, Великобритания
6047	Zamboanga, Филиппины
6050	Palmer Sta., Антарктида
6051	Mawson Sta., Антарктида
6052	Wilkes Sta., Антарктида
6053	McMurdo Sta., Антарктида
6055	Ascension Is., Великобритания
6059	Christmass Is., Великобритания
6060	Culgoora, Австралия
6061	So. Georgia, Великобритания
6063	Dakar, Сенегал
6064	Fort Lamy, Чад
6065	Hohenpreissenberg, Германская Федеральная Респ.
6067	Natal, Бразилия
6068	Johannesburg, Южно-Африканская Республика
6069	Tristan da Cunha, Великобритания
6072	Chiang Mai, Таиланд
6073	Chagos,
6075	Seychelles, Великобритания
6078	New Hebrides, Великобритания
6111	Wrightwood, США
6123	Point Barrow, Великобритания
6134	Wrightwood, США

Таблица 2. Список использованных ИСЗ

ИСЗ	i Наклонность	e Эксцентриситет	а	Расстояние
			Вольшая полуось [км]	в перигее [км]
Dial	5°	0,088	7344	301
Peole	15	0,017	7070	635
Courier 1B 60 v 1	28	0,016	7465	965
Vanguard 2 59 α 1	33	0,165	8300	557
59 η 1	33	0,188	8483	515
61 δ 1	39	0,119	7960	700
DID	39	0,053	7337	569
DIC	40	0,052	7336	579
Explorer 24 BE-C	41	0,026	7311	941
Telstar 1 62 α E1	44	0,241	9672	962
6012	47	0,011	7971	1512
ANNA 1B 62 β μ 1	50	0,007	7508	1077
Geophysical Research	50	0,062	7237	424
Explorer 29 GEOS 1	59	0,073	8074	1121
Transit 4A 6101	67	0,008	7318	885
Injun 1 6102	67	0,008	7316	896
Secor 5	69	0,079	8159	1137
	70	0,002	7301	921
Explorer 22 BE-B	80	0,012	7362	912
ØGØ - 2	87	0,075	7344	420
Oskar 07	89	0,023	7417	868
5BN - 2	90	0,005	7473	1070
Midas 4 61 α δ 1	96	0,013	10005	3503
Explorer 36 GEOS 2	106	0,031	7709	1101
ov 1 - 2	144	0,182	8306	416

Таблица 3. Геоцентрические координаты станций

Спутниковая станция №	x	y	z
	[м]	[м]	[м]
1	2	3	4
7050	1130678,1	-4831368,3	3994109,8
1021	1118031,1	-4876315,3	3942983,8
7060	-5068959,5	3584104,9	1458760,8
7816	4654337,0	1959179,1	3884358,3
7818	5426328,1	- 229326,6	3334606,4
8015	4578324,7	457967,0	4403182,7
7815	4578367,7	457951,0	4403137,7
7809	4578348,7	457958,0	4403163,7
9001	-1535765,4	-5166989,5	3401037,0
7901	1535765,4	-5166989,5	3401037,0
9002	5056127,8	2716511,9	-2775778,6
9022	5056126,8	2716510,9	-2775782,6
9003	-3983772,8	3743099,0	-3275557,4
9023	-3977762,9	3725114,0	-3303026,1
9004	5105584,4	- 555242,5	3769651,5
7804	5105602,4	- 555265,5	3769617,5
9005	-3946694,1	3366299,8	3698827,9
9025	-3910439,1	3376362,8	3729214,9
9006	1018205,4	5471111,9	3109624,0
9007	1942771,3	-5804089,1	-1796924,3
7907	1942771,3	-5804089,1	-1796924,3
9027	1943037,3	-5804210,1	-1796488,3
9008	3376897,9	4403975,7	3136243,0
9009	2251820,3	-5816912,4	1327143,6
9010	976284,9	-5601389,5	2880231,1
9011	2280586,3	-4914575,1	-3355413,0
9012	-5466068,8	-2404276,9	2242179,0
7912	-5466068,8	-2404276,9	2242179,0
9020	5886246,9	-1845645,8	1615271,8
7820	5886254,9	-1845662,8	1615239,8
9021	-1936785,5	-5077705,3	3331912,0
7921	-1936784,5	-5077702,3	3331917,0
9028	4903748,2	3965208,7	963872,0
9029	5186462,9	-3653860,7	- 654322,8

Таблица 3 (Продолжение)

1	2	3	4
7929	5186462,9	-3653861,7	- 654322,8
9039	5186457,9	-3653859,7	- 654326,8
9031	1693804,9	-4112342,7	-4556655,9
9091	4595159,1	2039465,8	3912647,2
7930	4595215,1	2039447,8	3912600,2
9030	4595206,1	2039447,8	3912610,2
9113	-2450013,8	-4624414,9	3635032,2
9114	-1264841,0	-3466894,9	5185445,2
9115	3121278,9	592630,5	5512685,1
9117	-6007413,8	-1111853,0	1825735,0
8019	4579467,9	586612,1	4386404,4
9066	4331302,0	567516,4	4633100,8
9074	3183870,1	1421473,3	5322802,1
9077	3907425,3	1602440,1	4763881,4
9080	3920159,3	- 134742,5	5012713,8
4711	-2351453,0	-4645069,2	3673763,4
4712	-2350466,5	-4651968,6	3665628,1
4714	-2353645,2	-4641331,9	3677051,7
4741	-3978700,1	3724866,6	-3302205,0
4742	-4460963,4	2682434,1	-3674609,9
4751	5085450,0	2668245,1	-2768716,4
4761	4849240,4	- 360304,2	4114857,3
4762	4840698,0	- 370221,9	4116880,5
6002	1130772,5	-4830831,4	3994708,8
6003	-2127828,1	-3785844,3	4656034,5
6004	-3851773,4	396432,4	5051332,3
6006	2102939,4	721672,5	5958172,5
6007	4433638,3	-2268136,0	3971637,5
6008	3623251,9	-5214229,0	601534,3
6009	1280840,8	-6250939,8	- 10816,8
6011	-5446019,4	-2404395,9	2242214,9
6012	-5858529,5	1394533,6	2093789,7
6013	-3565850,3	4120732,1	3303415,7
6015	2604367,0	4444160,1	3750315,3
6016	4896398,2	1316170,4	3856666,4
6019	2280638,3	-4914538,1	-3355432,0
6020	-1888600,3	-5354863,9	-2895765,8



Таблица 3 (Продолжение)

1	2	3	4
6022	-6099945,3	- 997318,9	-1568597,7
6023	-4955346,9	3842269,0	-1163859,9
6031	-4313794,5	891367,3	-4597278,7
6032	-2375367,6	4875567,5	-3345401,3
6038	-2160981,2	-5642694,3	2035356,4
6039	-3724752,2	-4421198,3	-2686102,0
6040	- 741939,3	6190804,2	-1338554,1
6042	4900756,0	3968241,9	966334,2
6043	1371390,9	-3614737,4	-5055959,8
6044	1098928,3	3684646,7	-5071874,6
6045	3223453,1	5045338,3	-2191802,6
6047	-3361921,6	5365824,3	763619,7
6050	1192695,9	-2450984,0	-5747067,3
6051	1111364,4	2169281,3	-5874344,8
6052	- 902567,1	2409551,0	-5816563,1
6053	-1310816,6	311288,0	-6213292,4
6055	6118336,1	-1571739,1	- 878607,2
6059	-5885328,2	-2448335,6	221659,4
6060	-4751614,2	2792088,6	-3200177,1
6061	2999940,1	-2219349,9	-5155270,4
6063	5884454,9	-1853486,2	1612844,9
6064	6023393,1	1617931,0	1331731,1
6065	4213574,9	820828,6	4702764,1
6067	5186418,5	-3653922,0	- 654285,6
6068	5084849,7	2670344,4	-2768104,4
6069	4978438,5	-1086861,0	-3823169,9
6072	- 941669,3	5967457,0	2039304,9
6073	1905159,1	6032280,6	- 810730,9
6075	3602838,0	5238237,1	- 515944,8
6078	-5952299,0	1231944,4	-1925942,2
6111	-2448854,0	-4667968,6	3582749,5
6123	-1881784,6	- 812421,1	6019587,6
6134	-2448907,7	-4668058,7	3582444,2

- 10 -  
Таблица 4

Спутниковая станция №	Н	R <sub>геоид</sub>	φ	λ
	[м]			
1	2	3	4	5
7050	54,81	6369675,6	38,832°	283,172°
1021	5,76	6369889,5	38,243	282,913
7060	85,87	6377071,9	13,223	144,737
7816	803,11	6370183,9	37,567	22,828
7818	855,65	6372309,0	31,549	357,580
8015	658,85	6367921,0	43,740	5,712
7815	657,83	6367920,6	43,740	5,712
7809	657,82	6367925,5	43,740	5,712
9001	1651,33	6371998,2	32,250	253,447
7901	1648,00	6372001,5	32,250	286,553
9002	1544,10	6374098,0	-25,809	28,248
9022	1543,34	6374099,3	-25,809	28,248
9003	159,21	6372478,6	-30,931	136,784
9023	137,91	6372385,4	-31,220	136,879
9004	26,00	6370653,6	36,279	353,793
7804	25,40	6370650,5	36,279	353,793
9005	59,77	6370944,6	35,491	139,538
9025	855,89	6370831,8	35,823	139,192
9006	1927,00	6372990,2	29,195	79,458
9007	2451,86	6376478,1	-16,362	288,507
7907	2452,27	6376477,7	-16,362	288,507
9027	2450,23	6376548,1	-16,357	288,509
9008	1597,40	6372919,2	29,472	52,520
9009	7,44	6377176,5	12,012	291,162
9010	15,13	6373714,4	26,865	279,887
9011	608,00	6372218,6	-31,771	294,893
9012	3034,14	6375509,8	20,580	203,743
7912	3034,14	6375509,8	20,580	203,743
9020	24,59	6376762,5	14,673	342,591
7820	28,48	6376762,9	14,673	342,591
9021	2383,12	6372243,7	31,512	249,122
7921	2383,14	6372243,6	31,512	249,122
9028	1925,20	6377626,2	8,690	38,959

Таблица 4 (Продолжение)

1	2	3	4	5
9029	45,34	6377903,7	- 5,888 <sup>0</sup>	324,835 <sup>0</sup>
7929	45,06	6377904,5	- 5,888	324,835
9039	41,60	6377903,2	- 5,888	324,835
9031	186,54	6367187,4	-45,694	292,386
9091	466,25	6370068,8	37,892	23,933
7930	473,02	6370067,7	37,892	23,933
9030	472,64	6370067,8	37,892	23,933
9113	784,23	6371126,0	34,784	242,085
9114	704,60	6363886,9	54,561	249,956
9115	575,92	6362072,1	60,045	10,751
9117	5,00	6376400,5	16,638	190,486
8019	377,42	6367996,3	43,534	7,300
9066	903,44	6366817,9	46,685	7,465
9074	8,00	6363154,5	56,773	24,059
9077	189,00	6366156,4	48,443	22,299
9080	113,19	6364877,4	51,957	358,031
4711	1036,30	6370975,7	35,208	243,150
4712	988,90	6371007,2	35,119	243,194
4714	1031,80	6370963,0	35,244	243,110
4741	148,28	6372390,0	-31,211	136,887
4742	656,08	6371031,7	-35,219	148,981
4751	1391,00	6374118,7	-25,739	27,685
4761	788,40	6369219,6	40,239	355,751
4762	738,30	6369210,8	40,263	355,632
6002	44,30	6369671,3	38,839	283,174
6003	368,74	6366650,0	46,993	240,662
6004	36,80	6364652,9	52,528	174,124
6006	106,00	6359374,0	69,537	18,941
6007	53,30	6369836,4	38,572	332,907
6008	18,38	6377910,9	5,412	304,795
6009	2682,10	6378142,2	- 0,097	281,580
6011	3049,27	6358379,4	20,638	203,821
6012	3,50	6375813,9	19,171	166,611
6013	65,90	6372396,5	31,224	130,871
6015	991,00	6370676,9	36,057	59,629
6016	9,24	6370304,4	37,259	15,046

Таблица 4 (Продолжение)

1	2	3	4	5
6019	608,18	6372218,5	-31,771 <sup>0</sup>	294,894 <sup>0</sup>
6020	230,80	6373687,8	-27,021	250,573
6022	5,34	6376865,1	-14,240	189,285
6023	60,50	6377483,3	-10,515	142,211
6031	0,90	6366970,9	-46,224	168,325
6032	26,30	6372197,8	-31,668	115,975
6038	23,20	6375909,3	18,616	249,045
6039	339,40	6374291,4	-24,921	229,887
6040	4,40	6377162,5	-12,116	96,834
6042	1886,46	6377624,1	8,712	38,998
6043	80,70	6364647,9	-52,596	290,776
6044	3,80	6364599,6	-52,834	73,393
6045	149,40	6375592,7	-20,107	57,426
6047	9,39	6377898,0	6,876	122,069
6050	16,44	6360693,4	-64,625	295,948
6051	11,30	6359928,9	-67,465	62,873
6052	18,00	6360246,9	-66,137	110,535
6055	70,94	6377730,5	- 7,918	345,593
6059	2,75	6378129,3	1,992	202,588
6060	211,08	6372757,6	-30,142	149,561
6061	4,20	6364111,5	-54,101	323,506
6063	26,30	6376766,7	14,651	342,517
6064	295,40	6377202,0	12,053	15,035
6065	943,20	6366471,0	47,610	11,023
6067	40,63	6377903,6	- 5,888	324,835
6068	1523,80	6374120,3	-25,732	27,707
6069	24,80	6370434,0	-36,880	347,685
6072	319,20	6375890,4	18,653	98,967
6073	3,90	6377717,1	- 7,303	72,472
6075	588,98	6377950,7	- 4,640	55,480
6078	15,20	6376253,6	-17,581	168,307
6111	2284,41	6371326,1	34,203	242,318
6123	8,30	6358967,7.	71,196	203,351
6134	2198,37	6371327,2	34,200	242,318
6053	19,00	6357664,8	-77,766	166,641

широты

$$(3) \quad \phi = \operatorname{arctg} \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

и долготы

$$(4) \quad \Lambda = \operatorname{arctg} \frac{y}{x}$$

точек  $P'$ .

По этим данным и отмеченным Стоксовым постоянным Земли линейный масштабный фактор (1) представляется так:

$$(5) \quad R_o = \rho_{\text{геоид}} \left\{ 1 + \sum_{n=2}^N \left( \frac{a_o}{\rho_{\text{геоид}}} \right)^n J_n^{(o)} P_n^{(o)}(\sin \phi) + \right. \\ + \sum_{n=2}^N \sum_{k=1}^n \left( \frac{a_o}{\rho_{\text{геоид}}} \right)^n (J_n^{(k)} \cos k\Lambda + \\ + S_n^{(k)} \sin k\Lambda) P_n^{(k)}(\sin \phi) + \\ \left. + \frac{1}{3} \left( \frac{a_o}{\rho_{\text{геоид}}} \right)^3 q \left[ 1 - P_2^{(o)}(\sin \phi) \right] \right\}^{-1} \\ q = \frac{a_o^3 \omega^2}{fM} ;$$

$\omega$  - угловая скорость вращения Земли,

$a_o$  - произвольная постоянная в линейной мере,

$P_n^{(k)}(\sin \phi)$  - полиномы Лежандра степени  $n$  и порядка  $k$ .

Величина  $R_0$  не зависит в явном виде от геоцентрической постоянной  $fM$ , однако, последняя косвенно входит в нее через геоцентрические координаты станций наблюдения ИСЗ, которые получены из анализа динамики ИСЗ.

Числовые результаты приведены в таблице 5. По разбросу значений  $R_0$  можно судить об общей сравнительной точности всех использованных материалов.

Станции № 9027 Arequipa, Peru и 6011 Maui, США дали результаты явно ошибочные. Если их из всей совокупности исключить, то получается результат

$$(6) \quad R_0 = (6\ 363\ 672,9 \pm 1,4) \text{ м} .$$

Поправки  $v_{R_0}$  относительно среднего значения (6) для отдельных спутниковых станций приведены также в таблице 5. По ним можно судить о надежности полученных координат (и измеренных высот) отдельных станций. Однако, следует иметь в виду, что совокупность поправок  $v_{R_0}$  обусловлена также погрешностями Стоксовых постоянных  $J_n^{(0)}$ ,  $J_n^{(k)}$ ,  $S_n^{(k)}$ , которые на разных станциях сказываются в общем по-разному в зависимости от широты и долготы станций.

В целях сравнения в таблицах 6 и 7 даны значения линейного масштабного фактора  $R_0$ , как они получились [ 5, 6 ] и по прежним данным [ 2 ] (обозначение SE II, всего 15 станций), [ 3 ] (обозначение SE I, 39 станций); результаты по новым данным [ 1 ] обозначены соответственно SE III.

Из приведенных данных следует, что если определять координаты станций вместе со всей совокупностью тессеральных и секториальных гармоник геопотенциала, то точность при-

Таблица 5

Спутниковая станция	$R_0$	$v_{R_0}$	$\frac{v_{R_0}}{R_0}$
№	[м]	[м]	[ $10^{-6}$ ]
1	2	3	4
7050	6363674,50	1,61	0,25
1021	674,18	1,29	0,20
7060	688,21	15,32	2,40
7816	667,59	- 5,30	- 0,83
7818	670,59	- 2,30	- 0,36
8015	657,28	-15,61	- 2,46
7815	656,68	-16,21	- 2,55
7809	661,65	-11,24	- 1,77
9001	670,28	- 2,61	- 0,41
7901	683,62	10,73	1,69
9002	673,18	0,29	0,05
9022	674,40	1,51	0,24
9003	688,15	15,26	2,40
9023	691,00	18,11	2,85
9004	649,46	-23,43	- 3,68
7804	646,28	-26,61	- 4,18
9005	670,21	- 2,68	- 0,42
9025	674,93	2,04	0,32
9006	684,03	11,14	1,75
9007	687,93	15,04	2,36
7907	687,53	14,64	2,30
9008	656,46	-16,43	- 2,58
9009	675,03	2,14	0,34
9010	652,43	-20,46	- 3,21
9011	676,03	3,14	0,49
9012	701,21	28,32	4,45
7912	701,21	28,32	4,45
9020	655,21	-17,68	- 2,78
7820	655,46	-17,43	- 2,74
9021	675,78	2,89	0,45
7921	675,75	2,86	0,45
9028	651,46	-21,43	- 3,37
9029	671,46	- 1,43	- 0,22

Таблица 5 (Продолжение)

1	2	3	4
7929	6363672,31	- 0,58	- 0,09
9039	671,00	- 1,89	- 0,30
9031	685,50	12,61	1,98
9091	671,50	- 1,39	0,22
7930	670,21	- 2,68	- 0,42
9030	670,37	- 2,52	- 0,40
9113	687,15	14,26	2,24
9114	670,06	- 2,83	- 0,44
9115	651,68	-21,21	- 3,33
9117	686,40	13,51	2,12
8019	655,15	-17,74	- 2,79
9066	654,34	-18,55	- 2,91
9074	656,78	-16,11	- 2,53
9077	659,37	-13,52	- 2,12
9080	658,00	-14,89	- 2,34
4711	683,62	10,73	1,69
4712	683,71	10,82	1,70
4714	683,62	10,73	1,69
4741	692,59	19,70	3,10
4742	693,81	20,92	3,29
4751	673,09	0,20	0,03
4761	655,81	-17,08	- 2,68
4762	655,90	-16,99	- 2,67
6002	672,75	- 0,14	- 0,02
6003	675,50	2,61	0,41
6004	678,43	5,54	- 0,87
6006	666,81	- 6,08	- 0,96
6007	662,03	-10,86	- 1,71
6008	673,65	0,76	0,12
6009	658,12	-14,77	- 2,32
6012	648,93	-23,96	- 3,77
6013	669,15	- 3,74	- 0,59
6015	660,00	-12,89	- 2,03
6016	663,25	- 9,64	- 1,51
6019	676,03	3,14	0,49
6020	666,15	- 6,74	- 1,06
6022	669,56	- 3,33	- 0,52



Таблица 5 (Продолжение)

1	2	3	4
6023	6363660,43	-12,46	- 1,96
6031	682,71	9,82	1,54
6032	682,78	9,89	1,55
6038	669,21	- 3,68	- 0,58
6039	655,37	-17,52	- 2,75
6040	685,00	12,11	1,90
6042	651,90	-20,99	- 3,30
6043	692,06	19,17	3,01
6044	708,06	35,17	5,53
6045	676,28	3,39	0,53
6047	673,59	0,70	0,11
6050	684,87	11,98	1,88
6051	707,53	34,64	5,44
6052	691,46	18,57	2,92
6053	682,34	9,45	1,48
6055	660,71	-12,18	- 1,91
6059	675,00	2,11	0,33
6060	677,18	4,29	0,67
6061	689,62	16,73	2,63
6063	655,37	-17,52	- 2,75
6064	668,68	- 4,21	- 0,66
6065	652,62	-20,27	- 3,19
6067	671,37	- 1,52	- 0,24
6068	672,78	- 0,11	- 0,02
6069	690,78	17,89	2,81
6072	667,09	- 5,80	- 0,91
6073	674,90	2,01	0,32
6075	675,62	2,73	0,43
6078	689,56	16,67	2,62
6111	685,03	12,14	1,91
6123	678,25	5,36	0,84
6134	685,12	12,23	1,92
Среднее значение	6363672,89	± 1,36	

Таблица 6

Спутниковая станция	$R_o$		
	SE I	SE II	SE III
	[м]	[м]	[м]
9001	6363672,50	6363673,93	6363670,28
9002	686,56	676,93	673,18
9003	682,21	684,40	688,15
9004	666,81	656,37	649,46
9005	684,46	674,75	670,21
9006	667,25	675,59	684,03
9007	687,25	689,96	687,93
9008	665,59	658,18	656,46
9009	668,43	681,25	675,03
9010	668,87	680,59	652,43
9011	694,84	687,78	676,03
9012	675,62	682,21	701,21
9114	678,59	673,53	670,06
9115	644,03	659,21	651,68
9117	677,96	669,50	686,40

Таблица 7

Спутниковая станция	$R_o$	
	SE II	SE III
	[м]	[м]
7050	6363680,12	6363674,50
7815	651,62	656,68
7901	677,25	683,62
9021	671,12	675,78
9023	687,50	691,00
9025	677,56	674,93
1021	680,31	674,18
7818	670,09	670,59
8015	652,81	657,28
9028	661,71	651,46
9029	665,56	671,46
9031	668,28	685,50
9066	650,15	654,34
9074	633,65	656,78
9077	642,96	659,37
9080	657,84	658,00
9091	655,28	671,50
9113	683,06	687,15

мерно - 15 м.

Однако, этим возможности динамической спутниковой геодезии далеко еще не исчерпаны. Точность можно значительно увеличить, если совместно с координатами станций не определять Стоксовы постоянные. Если гравитационное поле можно будет считать заданным а priori, тогда задача решается значительно точнее и проще.

В таком случае остается по возможности точнее определить орбиту ИСЗ. Если ИСЗ правильной формы и достаточно тяжелый (лучше всего шар из тяжелого металла, с уголковыми отражателями по поверхности для лазерных наблюдений, как например в случае ИСЗ CANNONBALL [ 4 ]), и помимо плотных слоев атмосферы, то его орбита не будет возмущена трудно учитываемыми эффектами от атмосферы и давления световых лучей Солнца, и есть реальная возможность добиться точности не хуже чем  $\pm 1$  м определения его орбиты.

Тогда, имея такой носитель точных координат - пространственный геодезический "опознак" - т.е. опорный геодезический пункт в околоземном пространстве, то уже коренным образом изменятся и упростятся задачи динамической спутниковой геодезии по определению координат пунктов земной поверхности.

Если иметь в виду лазерные наблюдения, то точность определения координат наземных станций будет примерно той же как и точность координат самого их пространственного носителя.

Если сделать такие наблюдения не менее чем в трех удобных положениях такого ИСЗ, то остается лишь решить хорошо известную, элементарную геодезическую задачу: по наблюдаемым расстояниям от известных (минимум трех) точек определить

положение четвертой, не известной точки. Это схематически показано на рис. 1,

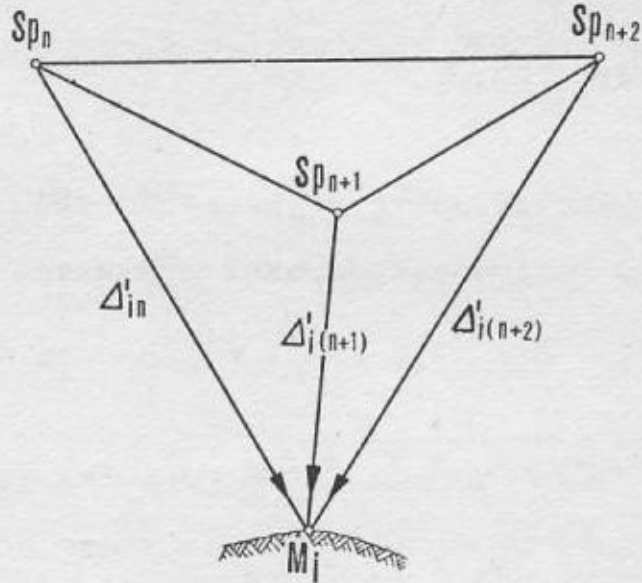


Рис. 1

где

$Sp_n(x_n, y_n, z_n)$ ,

$Sp_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1}, z_{n+1})$ ,

$Sp_{n+2}(x_{n+2}, y_{n+2}, z_{n+2}) \dots$  известные положения ИСЗ,

$M_i(x_i, y_i, z_i) \dots \dots \dots$  определяемая точка на земной поверхности,

$\Delta'_{in}, \Delta'_{i(n+1)}, \Delta'_{i(n+2)} \dots$  наблюдаемые топоцентрические расстояния ИСЗ.

Если ввести некоторые приближенные значения  $x_i^0, y_i^0, z_i^0$  координат определяемого пункта  $M_i$ , и по ним вычисленные соответственно приближенные расстояния

$$(7) \quad \Delta'_{in}{}^0 = \sqrt{(x_n - x_i^0)^2 + (y_n - y_i^0)^2 + (z_n - z_i^0)^2},$$

то уравнения поправок будут иметь вид

$$(8) \quad v_{in} = d\Delta'_{in} - (\Delta'_{in} - \Delta'_{in}{}^0) = \\ = (x_n - x_i^0)dx_i + (y_n - y_i^0)dy_i + (z_n - z_i^0)dz_i - \\ - (\Delta'_{in} - \Delta'_{in}{}^0) .$$

В результате решения системы уравнений типа (8) под условием минимума суммы квадратов поправок получатся координаты точки  $M_i$

$$(9) \quad \begin{aligned} x_i &= x_i^0 + dx_i , \\ y_i &= y_i^0 + dy_i , \\ z_i &= z_i^0 + dz_i . \end{aligned}$$

Мы получили координаты геоцентрические, т.к. исходная информация  $x_n, y_n, z_n$  представляет собой геоцентрические координаты ИСЗ, вычисленные по оскулирующим элементам орбит ИСЗ и их изменениям во времени.

От (9) нетрудно перейти к координатам в геодезической референц-системе  $X_i, Y_i, Z_i$ , т.к. в настоящее время уже известны координаты  $\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0$  геодезических референц-эллипсоидов относительно центра масс Земли почти для всех геодезических референц-систем, получивших по крайней мере континентальное распространение. Однако, точное решение задачи требует знать и малые углы  $\epsilon, \psi, \omega$ , определяющие взаимные направления осей  $x$  и  $X, y$  и  $Y, z$  и  $Z$  [7]. Задача определения последних в свою очередь как раз и стоит в насто-

ящее время на повестке дня перед спутниковой геодезией.

Трансформирование системы  $x, y, z$  в систему  $X, Y, Z$  можно кратко описать в линейной форме, из-за малости углов  $\xi, \psi, \omega$ , вряд ли превышающих  $1'' - 2''$  :

$$(10) \quad \begin{aligned} X_i &= x_i - \Delta x_0 - \omega y_i + \psi z_i, \\ Y_i &= y_i - \Delta y_0 + \omega x_i - \xi z_i, \\ Z_i &= z_i - \Delta z_0 + \psi x_i - \xi y_i. \end{aligned}$$

Имея (10), легко уже получить и геодезические координаты  $B_i, L_i$  определяемой точки  $M_i$  в геодезической референц-системе с известными 8-ю параметрами

$$a, e^2, \Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0, \xi, \psi, \omega.$$

Задача эта уже многократно решалась на страницах геодезических журналов.

Отметим, что динамический метод определения координат точек земной поверхности более гибок, чем геометрический.

Если орбита ИСЗ устойчива, надежно определяема и хорошо прогнозируема, то достаточно наблюдать ИСЗ с одной лишь, именно определяемой, станции.

В приведенном примере предполагались лазерные наблюдения ИСЗ в виду их высокой точности. Кроме того, преимуществом расстояний, измеренных с помощью лазера, является их замечательное свойство инвариантности относительно выбора системы координат. Если наблюдать направления, то погрешности около  $\pm 4''$  будут при расстояниях ИСЗ порядка 1000 км вносить погрешности в определяемые координаты уже  $\pm 20$  м. Но в случае, когда

орбита ИСЗ не будет хорошо прогнозируема, или при постановке задачи определения координат неизвестных пунктов меньшей точности, наблюдения направлений будут вполне оправданы. Их обработка не представляет принципиальных трудностей, но они уже зависят от системы примененных топоцентрических координат.

#### Литература

- [ 1 ] E.M. Gaposchkin, M.R. Williamson, Y. Kozai, G. Mendes: Smithsonian Institution Standard Earth III. Geopotential. SAO, 1973.
- [ 2 ] E.M. Gaposchkin, K. Lambeck: 1969 Smithsonian Standard Earth (II). SAO Spec. Rep. 315, 1970.
- [ 3 ] G. Veis: The Determination of the Radius of the Earth and Other Geodetic Parameters, as Derived from Optical Satellite Data. SAO Spec. Rep. 264, 1967; XIVth Gen. Ass. IUGG, Lucerne 1967.
- [ 4 ] G.C. Weiffenbach, T.E. Hoffman: A Passive Stable Satellite for Earth-Physics Application (Cannonball, a Satellite for Accurate Laser Ranging). SAO Spec. Rep., 1970.
- [ 5 ] M. Burša: Fundamental Geodetic Parameters of the Earth's Figure and the Structure of the Earth's Gravity Field Derived from Satellite Data. *Studia geoph. et geod.*, 16 (1972), 10.
- [ 6 ] M. Burša: Potential of the Geoidal Surface, the Scale Factor for Lengths and Earth's Figure Parameters from Satellite Observations. *Studia geoph. et geod.*, 13 (1969), 337.
- [ 7 ] M. Burša: К вопросу определения направлений малой оси референц-эллипсоида и исходного геодезического меридиана по наблюдениям искусственных спутников Земли. *Studia geoph. et geod.*, 9 (1965), 14.