

УДК 521.8

ПРЕДСТОЯЩИЕ СБЛИЖЕНИЯ ПЛАНЕТ С РАДИОИСТОЧНИКАМИ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ОТО

© 2009 г. З. М. Малкин, В. Н. Львов, С. Д. Цекмейстер

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, С.-Петербург

Поступила в редакцию 30.10.2008 г.

Во время тесных видимых сближений планет Солнечной системы с астрометрическими радиоисточниками видимое положение последних изменяется из-за релятивистских эффектов, и таким образом, эти явления могут служить тестом общей теории относительности, что и было успешно продемонстрировано в экспериментах 1988 и 2002 гг. по измерению смещений радиоисточников во время сближений с Юпитером. Анализ, проведенный в настоящей работе, показал, что при наблюдении источника вблизи края планетного диска, фактически во время покрытий, релятивистский эффект может быть измерен на современном уровне точности для всех планет. Однако покрытия радиоисточников довольно редкие явления. В то же время из всех планет только Юпитер и Сатурн дают значимый релятивистский эффект при их угловом сближении с радиоисточником на расстояние нескольких радиусов планеты. В результате нашего анализа составлен каталог предстоящих покрытий и сближений планет и геодезических радиоисточников на 2008–2050 гг., который может быть использован для планирования экспериментов по тестированию теорий гравитации и в других целях. Для всех вошедших в каталог явлений рассчитаны основные релятивистские поправки для наземных и космических (Земля–Луна) баз интерферометра.

PACS: 04.80.Cc, 95.10.Gi, 95.75.Kk

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени кроме общепринятой в среде физиков и астрономов общей теории относительности (ОТО) предложены альтернативные теории гравитации. Наиболее серьезные из них не противоречат имеющимся наблюдательным фактам, однако прогнозируют отличие эффектов от ОТО при условиях, отличающихся от наблюдаемых до сих пор, либо предсказывают отличие наблюдаемых величин от ОТО за пределами достигнутой точности наблюдений. Поэтому тестирование теорий гравитации с использованием разных методов и все более точных наблюдений является весьма актуальной астрономической и физической задачей.

Одним из предложенных тестов ОТО являются наблюдения радиоисточников методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) в моменты их видимых тесных сближений с планетами Солнечной системы (Treuhaft, Lowe, 1991; Kopeikin, 2001; Fomalont, Kopeikin, 2003; 2008). В частности, в этих работах описаны наблюдения релятивистской задержки сигнала радиоисточника в моменты близкого прохождения Юпитера в 1988 и 2002 гг. Аналогичные наблюдения Юпитера и Сатурна по предложению О.А. Титова планируются Комитетом по наблюдательным программам Международной службы РСДБ для геодезии и астрометрии IVS (Schlüter, Behrend, 2007) в 2008–2009 гг. (<http://ivscc.gsfc.nasa.gov/program/opc.html>). Однако обработка результатов уже проведенных экспериментов

показала, что не на все вопросы, которые ставили их инициаторы, были получены однозначные ответы, в частности, из-за недостаточной точности результатов, что объясняется, в первую очередь, довольно большим угловым расстоянием между Юпитером и радиоисточником. Поэтому необходимо проведение дальнейших наблюдений в наиболее благоприятных условиях, в первую очередь при более тесных сближениях (в дальнейшем мы будем иметь в виду видимые сближения) и покрытиях.

Нужно заметить, что проведенные до сих пор наблюдения носят, во многом, случайный характер, т.е. инициатор того или иного эксперимента использует ближайшее прохождение планеты рядом с известным астрометрическим радиоисточником. Другой исследователь, желающий провести аналогичный эксперимент, вынужден проводить свой поиск предстоящих сближений. При этом наиболее интересные явления, т.е. наиболее тесные сближения, могут быть пропущены. К тому же наблюдения релятивистских эффектов, обусловленных отклонением и гравитационной задержкой радиосигнала вблизи планеты, требуют значительных, обычно международных, ресурсов и планируются загодя. Поэтому желательно иметь возможность заблаговременного планирования экспериментов при наиболее выгодных условиях.

Целью настоящей работы является составление каталога сближений планет Солнечной системы с астрометрическими радиоисточниками для удоб-

Таблица 1. Максимальная величина релятивистских эффектов при наблюдении на краю планетного диска

База, тыс. км	Эффект, нс	Меркурий	Венера	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон
8	Δ	0.01	0.06	0.02	2.1	0.77	0.27	0.33	0.00
	Δ_p	0.15	0.32	0.13	1.2	0.68	0.73	1.14	0.09
400	Δ	0.5	3.2	0.75	110	39	14	16	0.05
	Δ_p	7.3	16	6.7	62	34	37	57	4.3

Таблица 2. Величина релятивистских эффектов при удалении центра планеты от радиосточника на 30''

База, тыс. км	Эффект, нс	Меркурий	Венера	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон
8	Δ	0.00	0.01	0.00	1.1	0.20	0.02	0.01	0.00
	Δ_p	0.00	0.01	0.00	0.33	0.04	0.00	0.00	0.00
400	Δ	0.04	0.51	0.05	56	9.8	0.78	0.60	0.00
	Δ_p	0.05	0.41	0.03	17	2.2	0.12	0.08	0.00

ного и надежного планирования наблюдений. В процессе работы оказалось, что две, считавшиеся очевидными характеристики подобных экспериментов являются ошибочными. Во-первых, такие явления происходят намного чаще, чем принято считать. Во-вторых, один из наиболее интересных релятивистских эффектов, связанных со скоростью распространения гравитации, может эффективно наблюдаться не только для планет-гигантов, но и для остальных планет и даже для Плутона. Кроме того, развитие космической техники делает реальным проведение РСДБ-наблюдений с базами в несколько сот тысяч километров, на которых также могут наблюдаться основные релятивистские эффекты для всех планет, включая наиболее крупные карликовые.

НАБЛЮДАЕМЫЕ ЭФФЕКТЫ

В случае наблюдения радиосточника вблизи планеты можно наблюдать два релятивистских эффекта, вносящих вклад в измеряемую интерферометрическую задержку, определяемую как разность моментов прихода фронта электромагнитной волны, излученной радиосточником, на две антенны базы РСДБ. Этими эффектами являются задержка Шапиро Δ и задержка распространения гравитационного взаимодействия Δ_p , обусловленная распространением луча вблизи движущегося тела, в нашем случае планеты. Как показано в (Koreikin, 2001), их измерение позволяет определить два фундаментальных релятивистских параметра: параметр γ (равен 1 в ОТО) и параметр распространения гравитационного взаимодействия δ (равен 0 в ОТО, т.е. скорость распространения гравитации равна скорости света). Величина указанных эффектов может быть оценена по формулам, полученным в

(Koreikin, 2001, уравнение (13)), которые после очевидных преобразований приводятся к виду

$$\Delta \cong \frac{2(1+\gamma)GMrB}{c^3 R d}, \quad \Delta_p \cong (1+\delta) \frac{\Delta v}{cd}, \quad (1)$$

где GM – планетоцентрическая гравитационная постоянная, B – длина базы интерферометра, r – видимый угловой радиус планеты, d – угловое расстояние между направлениями со станции на источник и центр планеты, R – радиус планеты, v – ее орбитальная скорость, c – скорость света. Очевидно, что Δ и Δ_p достигают максимальной величины при наблюдениях на краю планетного диска, т.е. $d = r$. Для этого случая (1) может быть переписано в рамках ОТО как

$$\Delta \cong \frac{4GM B}{c^3 R}, \quad \Delta_p \cong \frac{\Delta v}{cr}. \quad (2)$$

Из (2) видно, что при наблюдении на краю диска Δ не зависит от размера видимого диска, т.е. от расстояния до планеты, а Δ_p достигает максимальной величины при максимальном удалении планеты от Земли. Числовые значения максимальных наблюдаемых релятивистских эффектов приведены в табл. 1 для случая наземной и космической (Земля–Луна) базы интерферометра. Учитывая линейную зависимость рассматриваемых эффектов от B , приведенные значения легко можно пересчитать на любую базу.

Следует отметить, что релятивистские эффекты, имеющие величину порядка наносекунд, могут быть измерены с использованием наиболее простой интерферометрической техники определения групповой задержки. В то же время эффекты на уровне единиц пикосекунд могут быть измерены только методом дифференциальных фазовых измерений при тщательном планировании наблюдательного

Таблица 3. Покрытия планетами астрометрических радиоисточников

Планета	Дата, г м д	Источник	α и δ источника, J2000		Примечания, видимость
			ч мин с	град угл. мин угл. с	
Венера	2011 02 26.6	1946–200	19 49 53	–19 57 13	Ю. Америка, Австралия, Антарктида
Марс	2011 05 03.8	0127+084	1 30 28	+8 42 46	Америка
Венера	2012 12 24.4	1631–208	16 34 30	–20 58 26	Африка, Ю. Америка, Антарктида
Венера	2015 08 06.8	0947+064	9 50 03	+6 15 04	Америка
Венера	2020 01 16.7	2220–119	22 22 56	–11 44 26	Европа, Африка, Ю. Америка
Венера	2020 07 17.7	0446+178	4 49 13	+17 54 32	Америка
Юпитер	2025 09 18.6	0725+219	7 28 21	+21 53 06	Америка, Антарктида
Сатурн	2028 10 24.8	0223+113	2 25 42	+11 34 25	Покрытие кольцом; Азия, Африка, Европа
Юпитер	2033 02 04.2	2104–173	21 07 27	–17 08 10	Ю. Америка, Австралия, Антарктида
Венера	2035 07 03.3	0558+234	6 01 47	+23 24 53	Европа, Азия, Африка
Венера	2037 01 03.8	1734–228	17 37 02	–22 51 55	Ю. Америка, Австралия, Антарктида
Юпитер	2043 02 01.1	1734–228	17 37 02	–22 51 55	Австралия, Азия, Африка, Антарктида
Венера	2043 02 15.6	1858–212	19 01 04	–21 12 01	Америка
Венера	2043 02 17.7	1908–211	19 11 54	–21 02 44	Америка, Австралия
Юпитер	2045 09 24.4	2221–116	22 24 08	–11 26 21	Ю. Америка, Австралия, Антарктида
Венера	2049 01 13.5	2243–081	22 45 49	–7 55 19	Азия, Европа, Африка
Венера	2049 11 02.2	1333–082	13 36 08	–8 29 52	Африка, Антарктида

эксперимента. Есть вполне обоснованная надежда, что точность измерения релятивистских эффектов существенно возрастет с вводом в строй РСДБ-станций нового поколения в стандарте VLBI2010 (Behrend и др., 2008).

Результаты расчетов показывают, что почти все планеты в моменты максимального сближения с радиоисточниками обеспечивают вполне измеримые релятивистские эффекты даже на земных базах, особенно для Δr . Однако уже при увеличении расстояния от центра планеты до радиоисточника до 30'' величина релятивистских эффектов для земной базы становится практически неизмеримой с достаточной точностью для всех планет, кроме Юпитера и Сатурна (табл. 2).

ПРЕДВЫЧИСЛЕНИЕ ПОКРЫТИЙ И СБЛИЖЕНИЙ

На основании результатов, полученных в предыдущем разделе, можно сделать вывод, что имеет смысл предвычислять моменты покрытий для всех планет от Венеры до Нептуна, а более подробные обстоятельства сближений предвычислять для Юпитера и Сатурна. При этом будут охвачены все явления сближений планет с радиоисточниками, обеспечивающие наиболее заметные релятивистские эффекты в распространении сигнала. Их число представляется вполне достаточным для практи-

ческого планирования экспериментов без привлечения наблюдений Меркурия, Марса и карликовых планет, для которых релятивистские эффекты хотя и могут быть измерены, но со сравнительно большой относительной ошибкой. Впрочем, опущенные в этой работе данные легко могут быть восполнены авторами по запросу заинтересованных лиц.

Основные расчеты обстоятельств сближений планет с радиоисточниками были выполнены с помощью программ APPROACH и OCCULT, которые используют данные и среду программной системы ЭПОС (Эфемеридная Программа для Объектов Солнечной системы, Львов и др., 2001). Координаты источников взяты из каталога Годдардского центра космических полетов NASA (Petrov, 2008) с добавлением недостающих источников каталога ICRF-2 (Feu и др., 2004). Всего оказалось 3958 источников, список которых и их оптические характеристики могут быть найдены на http://www.gao.spb.ru/english/as/ac_vlbi/sou_car.dat.

Список покрытий радиоисточников планетами приведен в табл. 3, а обстоятельства сближений Юпитера и Сатурна с радиоисточниками – в табл. 4 и 5 соответственно. В таблицах показаны обстоятельства всех покрытий и сближений на расстояние, не превышающее 10', за период с сентября 2008 г. (момента написания настоящей работы) до 2050 г. Для Урана и Нептуна покрытий на рассмотренном интервале времени нет. Интересной особенностью

Таблица 4. Видимые сближения Юпитера с астрометрическими радиоисточниками

Дата, Г М Д	Источник	α и δ источника, J2000		d , угл. с	r , угл. с	Δ , пс	$\Delta\rho$, пс
		ч мин с	град угл. мин угл. с				
2008 11 19.0	1922 – 224	19 25 40	–22 19 35	83	17	443	48
2009 03 08.6	2104 – 173	21 07 27	–17 08 10	277	16	127	4.1
2011 07 03.6	0210 + 119	2 13 05	+12 13 11	341	18	116	3.0
2011 09 13.1	0229 + 131	2 31 46	+13 22 55	149	23	328	20
2012 02 04.0	0201 + 113	2 03 47	+11 34 45	490	19	83	1.5
2012 02 20.3	0210 + 119	2 13 05	+12 13 11	342	18	114	3.0
2013 02 28.1	0420 + 210	4 23 02	+21 08 02	216	19	191	8.0
2013 10 23.0	0723 + 219	7 26 14	+21 53 20	123	20	343	25
2013 11 07.0	0725 + 219	7 28 21	+21 53 06	388	21	114	2.6
2013 11 22.1	0723 + 219	7 26 14	+21 53 20	351	21	132	3.4
2017 10 13.7	1352 – 104	13 54 47	–10 41 03	69	15	471	62
2019 10 28.4	1723 – 229	17 26 59	–22 58 02	184	16	192	9.4
2020 08 02.0	1922 – 224	19 25 40	–22 19 35	79	23	631	72
2020 10 24.2	1922 – 224	19 25 40	–22 19 35	355	18	112	2.8
2021 02 19.9	2104 – 173	21 07 27	–17 08 10	149	16	232	14
2022 11 13.8	2354 – 021	23 57 25	– 1 52 16	159	22	304	17
2022 12 04.1	2354 – 021	23 57 25	– 1 52 16	177	21	257	13
2023 06 11.1	0210 + 119	2 13 05	+12 13 11	28	17	1321	426
2023 11 05.4	0229 + 131	2 31 46	+13 22 55	199	24	261	12
2024 01 02.1	0210 + 119	2 13 05	+12 13 11	396	21	117	2.6
2025 09 15.4	0723 + 219	7 26 14	+21 53 20	215	17	174	7.3
2025 10 25.0	0741 + 214	7 44 47	+21 20 00	30	19	1374	406
2025 11 29.1	0741 + 214	7 44 47	+21 20 00	274	22	169	5.5
2029 03 15.3	1333 – 082	13 36 08	– 8 29 52	432	21	105	2.2
2029 09 28.5	1352 – 104	13 54 47	–10 41 03	47	15	704	136
2031 02 23.2	1734 – 228	17 37 02	–22 51 55	261	17	142	4.9
2031 06 07.1	1734 – 228	17 37 02	–22 51 55	55	23	877	143
2031 10 05.6	1723 – 229	17 26 59	–22 58 02	312	18	121	3.5
2033 02 27.2	2126 – 158	21 29 12	–15 38 41	417	16	83	1.8
2034 01 28.9	2245 – 091	22 47 52	– 8 50 22	342	17	105	2.8
2035 05 14.0	0201 + 113	2 03 47	+11 34 45	433	16	81	1.7
2035 05 24.1	0210 + 119	2 13 05	+12 13 11	173	17	206	11
2037 05 28.4	0558 + 234	6 01 47	+23 24 53	306	16	112	3.3
2037 08 27.9	0725 + 219	7 28 21	+21 53 06	159	16	222	13
2037 09 19.0	0741 + 214	7 44 47	+21 20 00	29	17	1271	391
2041 09 11.6	1352 – 104	13 54 47	–10 41 03	74	16	455	55
2045 01 20.1	2104 – 173	21 07 27	–17 08 10	192	16	180	8.4
2045 02 12.0	2126 – 158	21 29 12	–15 38 41	283	16	121	3.8
2045 05 29.4	2245 – 091	22 47 52	– 8 50 22	459	19	91	1.8
2045 09 20.3	2223 – 114	22 25 44	–11 13 41	228	24	224	8.9
2045 12 04.5	2223 – 114	22 25 44	–11 13 41	466	19	89	1.7
2046 01 10.7	2245 – 091	22 47 52	– 8 50 22	83	17	449	48
2047 04 28.4	0201 + 113	2 03 47	+11 34 45	294	16	118	3.6
2047 05 08.3	0210 + 119	2 13 05	+12 13 11	308	16	113	3.3
2049 05 11.4	0558 + 234	6 01 47	+23 24 53	129	16	272	19
2049 08 29.5	0741 + 214	7 44 47	+21 20 00	179	16	196	9.9

Таблица 5. Видимые сближения Сатурна с астрометрическими радиоисточниками

Дата, г м д	Источник	α и δ источника, J2000		d, угл. с	r, угл. с	Δ, пс	Δ _p , пс
		ч мин с	град угл. мин угл. с				
2009 02 10.2	1125 + 062	11 27 37	+5 55 32	80	9	92	7.7
2009 06 26.0	1109 + 076	11 12 10	+ 7 24 49	146	8	44	2.0
2015 06 19.1	1548 – 177	15 51 15	–17 55 02	156	9	44	1.9
2015 11 19.1	1614 – 195	16 17 27	–19 41 32	64	7	88	9.1
2016 11 22.9	1658 – 217	17 02 10	–21 30 03	194	7	29	1.0
2017 12 13.3	1752 – 225	17 55 26	–22 32 11	73	7	78	7.1
2021 08 10.8	2044 – 188	20 47 38	–18 41 41	20	9	347	115
2021 12 08.1	2044 – 188	20 47 38	–18 41 41	114	8	52	3
2023 04 13.3	2221 – 116	22 24 08	–11 26 21	33	8	183	37
2023 04 18.2	2223 – 114	22 25 44	–11 13 41	276	8	22	0.5
2024 01 04.6	0220 – 119	2 13 05	+12 13 11	370	8	16	0.3
2024 03 18.5	2252 – 090	22 55 04	–08 44 04	158	8	37	1.5
2026 04 01.5	0019 – 001	0 22 25	+ 0 14 56	472	8	13	0.2
2026 10 19.0	0037 + 011	0 40 14	+ 1 25 46	145	9	51	2.3
2028 05 20.6	0208 + 106	2 11 13	+10 51 35	79	8	77	6.5
2030 11 31.0	0409 + 188	4 12 46	+18 56 37	306	10	25	0.5
2032 04 03.5	0503 + 216	5 06 34	+21 41 00	71	9	93	8.8
2033 05 24.2	0620 + 227	6 23 18	+22 41 36	206	8	31	1.0
2034 06 15.7	0725 + 219	7 28 21	+21 53 06	38	8	163	28
2034 07 16.2	0741 + 214	7 44 47	+21 20 00	157	8	39	1.7
2037 01 16.1	1013 + 127	10 15 44	+12 27 07	72	10	103	9.6
2037 07 24.1	1013 + 127	10 15 44	+12 27 07	233	8	26	0.8
2043 10 18.4	1459 – 149	15 02 25	–15 08 53	220	7	26	0.8
2044 02 27.6	1548 – 177	15 51 15	–17 55 02	33	8	193	39
2045 09 20.4	1614 – 195	16 17 27	–19 41 32	46	8	132	19
2046 09 17.5	1658 – 217	17 02 10	–21 30 03	51	8	120	16
2047 10 17.1	1752 – 225	17 55 26	–22 32 11	367	8	16	0.3
2048 11 28.4	1853 – 226	18 56 36	–22 36 17	321	7	18	0.4

полученного нами списка является наличие кратных сближений, возникающих из-за видимого петлеобразного движения планет. При этом планета приближается к радиоисточнику с разных сторон, что может вызвать дополнительный экспериментальный интерес для изучения влияния движущейся планеты на задержку сигнала (член Δ_r).

В табл. 4 и 5 видимый угловой диаметр планет вычислен по их среднему радиусу. Значения Δ и Δ_r вычислены для длины базы 8 тыс. км. При этом использовалась формула, с очевидностью следующая из (1) (для ОТО):

$$\Delta = \frac{4GMb}{c^3 Dd}, \quad (3)$$

где D – расстояние от Земли до планеты. Для других баз, в том числе космических, легко сделать пересчет путем пропорционального изменения приведенных значений. Как показали результаты эксперимента 2002 г. (Fomalont, Kopeikin, 2003), релятивистская задержка $\Delta_r \approx 6$ пс (точнее, эквивалентное ей отклонение луча в 51 мкс дуги) оказалась вполне измеримой на радиоинтерферометре VLBA (США), дополненном 100-м антенной в Эффельсберге (Германия), с ошибкой около 20%. Более далекие сближения, очевидно, имеет смысл наблюдать с космическим интерферометром, для которого наблюдаемый эффект будет больше во столько раз, во сколько база космического интерферометра больше базы наземного.

Необходимо отметить, что в настоящей работе обстоятельства сближений вычислены для геоцентра. Для реального наблюдателя угловые расстояния будут приближенно отличаться от значений, приведенных в табл. 4 и 5, на величину до R_0/D , где R_0 – расстояние от геоцентра до середины базы интерферометра, в зависимости от позиционного угла и ориентации базы. Понятно, что это отличие максимально в эпохи противостояний, и для наземного интерферометра может достигать до 3" для Юпитера и 1" для Сатурна. Что касается данных табл. 3, она рассчитана для наземных наблюдений, а для космического интерферометра расчет покрытий целесообразно проводить для его конкретной конфигурации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведено вычисление обстоятельств сближений планет Солнечной системы

с астрометрическими радиоисточниками на период 2008–2050 гг.

Особый интерес представляют собой покрытия радиоисточников планетами, в моменты которых релятивистские эффекты достигают своей максимальной величины. Такие явления позволяют измерять эти эффекты с минимальной относительной ошибкой, что имеет первостепенное значение для тестирования теорий гравитации. При этом могут эффективно использоваться все планеты от Венеры до Нептуна.

Данная работа показала, что видимые сближения планет с радиоисточниками и даже их покрытия планетами совсем не такие редкие события, как принято считать. При расширении списка радиоисточников в зоне эклиптики увеличится и число рассматриваемых здесь явлений, что еще больше расширит возможности проведения соответствующих экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Львов В.Н., Смехачева Р.И., Цекмейстер С.Д.* ЭПОС – программная система для поддержки исследований объектов Солнечной системы // Тр. конф. “Околоземная астрономия”, Звенигород, 21–25 мая 2001 г. С. 235–240.
- Behrend D., Boehm J., Charlot P., et al.* Recent progress in the VLBI2010 Development // Proc. 2007 IAG General Assembly. Observing our Changing Earth. Perugia, Italy, July 2–13 / Ed. Sideris M.G. IAG Symposia, 2008. V. 133. P. 833–840.
- Fey A.L., Ma C., Arias E.F., et al.* The second extension of the International Celestial Reference Frame: ICRF-Ext. 2. // Astron. J. 2004. V. 127. P. 3587–3608.
- Fomalont E.B., Kopeikin S.M.* The measurement of the light deflection from Jupiter: Experimental results // Astrophys. J. 2003. V. 598. P. 704–711.
- Fomalont E.B., Kopeikin S.M.* Radio interferometric tests of general relativity // Proc. IAU Symp. № 248A “Giant Step: from Milli- to Micro-arcsecond Astrometry” / Eds Jin W.-J., Platais I., Perryman M. 2008. P. 383–386.
- Kopeikin S.M.* Testing the relativistic effect of the propagation of gravity by Very Long Baseline Interferometry // Astrophys. J. 2001. V. 556. P. L1–L5.
- Petrov L.* Goddard VLBI astrometric catalogue 2008b. http://vlbi.gsfc.nasa.gov/solutions/2008b_astro.
- Schlüter W., Behrend D.* The International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS): Current capabilities and future prospects // J. Geodesy. 2007. V. 81. P. 379–387.
- Treuhaft R.N., Lowe S.T.* A measurement of planetary relativistic deflection // Astron. J. 1991. V. 102. P. 1879–1888.