

УДК 521.9-77

ВЛИЯНИЕ ГАЛАКТИЧЕСКОЙ АБЕРРАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ ПРЕЦЕССИИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ИЗ РСДБ-НАБЛЮДЕНИЙ

© 2011 г. З. М. Малкин*

Учреждение Российской академии наук Главная (Пулковская)
астрономическая обсерватория РАН, С.-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 25.12.2010 г.; принята в печать 11.04.2011 г.

Получена оценка влияния движений источников, вызываемых галактической абберацией, на результаты улучшения модели прецессии по РСДБ-данным. В результате сравнения величин линейных трендов в координатах небесного полюса, полученных с учетом и без учета галактической абберации, оказалось, что это влияние может составлять до 20 мксек. дуги в столетие, что существенно для современной модели прецессии. Также показано, что учет галактической абберации влияет на определяемые параметры низкочастотных членов нутации. Сделан вывод о необходимости учета галактической абберации при обработке современных астрометрических наблюдений.

1. ВВЕДЕНИЕ

С возрастанием точности позиционных астрономических наблюдений повышаются требования к моделям их астрометрической редукиции. Становится необходимым учитывать все более тонкие эффекты, влияющие на измеряемые положения и движения небесных объектов. Одним из них является вековая абберация, обусловленная движением наблюдателя вместе с движением барицентра Солнечной системы (БСС). Существование вековой абберации было понято уже давно. Еще 200 лет назад гринвичский астроном Дж. Понд указывал на существование смещения видимых положений небесных светил, вызванных движением Солнечной системы [1]. Вековая абберация является довольно сложным явлением. Полный эффект складывается из несколько составляющих, соответствующих различным компонентам скорости БСС: движение БСС относительно местного стандарта покоя (LSR — Local Standard of Rest), движение LSR относительно центра Галактики, движение самой Галактики относительно Местной группы галактик, движение Местной группы галактик относительно Местного сверхскопления галактик, движение Местного сверхскопления галактик и т.д. При этом движение галактик на масштабах больших десятков Мпк ($z \gtrsim 0.02$) является пока еще малоизученным. Кроме того, есть и принципиальные трудности таких вычислений, связанные с выбором подходящей системы координат [2].

К счастью, движение БСС в высокой степени линейно, что делает абберационное смещение по-

чти постоянным для данного объекта на протяжении сравнительно короткого исторического периода точных астрономических наблюдений. Поскольку это смещение не может быть определено из наблюдений или вычислено с достаточной точностью теоретически, исторически принято не учитывать вековую абберацию в астрометрических редукициях, хотя она и составляет величину до нескольких минут дуги. В то же время отклонение от линейности движения БСС вызывает появление видимых собственных движений величиной около 5 мксек. дуги/год. Как показано в [3, 4], основной вклад в кривизну движения БСС вносит круговое галактическое вращение, влияние остальных компонентов движения БСС, по крайней мере, на порядок меньше. Поэтому ввиду малости эффекта в дальнейшем будем рассматривать только круговое движение LSR, а соответствующую часть вековой абберации будем называть галактической абберацией (ГА).

Собственные (видимые) движения небесных тел, вызванные ГА, до последнего времени были несопоставимы с точностью наблюдений и поэтому игнорировались. Однако уже в 1980-х гг. стало ясно, что со временем их необходимо будет учитывать при обработке высокоточных наземных наблюдений методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) [5–7] и наблюдений космических астрометрических миссий [3, 4, 8, 9]. Это абберационное собственное движение, не будучи учтенным при обработке, может исказить результаты наблюдений микросекундной точности. В первую очередь это относится к определению вековых изменений астрономических параметров.

*E-mail:malkin@gao.spb.ru

Одними из наиболее важных таких величин, получаемых из длительных рядов РСДБ-наблюдений, являются параметры модели прецессии [10, 11]. При этом требования к точности этих параметров составляют 1 мксек.дуги в столетие [10]. В настоящее время для их уточнения используются ряды координат небесного полюса (НП), определяемые из РСДБ-наблюдений, которые доступны с 1979 г. (хотя нередко, в том числе и в настоящей работе, первые несколько лет наблюдений с относительно низкой точностью не используются). При этом неучтенные движения наблюдаемых радиоисточников из-за ГА напрямую влияют на результаты уточнения модели прецессии. Эффект зависит от нескольких факторов, таких как смена программ наблюдений, распределение наблюдаемых источников по небесной сфере и др., поэтому его величину трудно оценить теоретически. Настоящая работа посвящена исследованию вопроса, насколько велико влияние ГА на практике.

2. ВЛИЯНИЕ ГА НА СОБСТВЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ

Вектор собственного движения небесного объекта, обусловленного ГА, направлен по вектору галактоцентрического ускорения, т.е. к центру Галактики, и его величина (модуль) составляет [3]

$$A = \frac{V_0 \Omega_0}{c}, \quad (1)$$

где V_0 — линейная скорость движения LSR вследствие вращения Галактики, Ω_0 — угловая скорость движения LSR относительно центра Галактики, c — скорость света. Назовем эту величину постоянной галактической абберации.

Перепишем (1), выразив A через фундаментальные величины, определяемые методами галактической астрономии:

$$A = \frac{R_0 \Omega_0^2}{c}, \quad (2)$$

где R_0 — расстояние от БСС до центра Галактики. Для вычисления постоянной ГА примем среднее из последних определений [13–15] $R_0 = 8.2$ кпк и $\Omega_0 = 29.5$ км с⁻¹ кпк⁻¹ (6.22 мсек.дуги/год), что дает величину постоянной галактической абберации $A = 5.02$ мсек.дуги/год. При этом линейная скорость вращения LSR вокруг центра Галактики $V_0 = 242$ км с⁻¹, а период вращения составляет 208 млн. лет.

Влияние ГА на координаты небесных тел в галактической системе координат выражается следующим образом [3]:

$$\begin{aligned} \mu_l \cos b &= -A \sin l, \\ \mu_b &= -A \cos l \sin b, \end{aligned} \quad (3)$$

где l и b — галактическая долгота и широта объекта, соответственно.

Поскольку большинство астрометрических вычислений, включая обработку РСДБ-наблюдений, проводится в экваториальной системе координат, приведем соответствующие формулы по [12] с учетом переноса множителя $1/c$ в A :

$$\begin{aligned} \mu_\alpha \cos \delta &= -A_1 \sin \alpha + A_2 \cos \alpha, \\ \mu_\delta &= -A_1 \cos \alpha \sin \delta - \\ &- A_2 \sin \alpha \sin \delta + A_3 \cos \delta, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= A \cos \alpha_0 \cos \delta_0, \\ A_2 &= A \sin \alpha_0 \cos \delta_0, \\ A_3 &= A \sin \delta_0, \end{aligned} \quad (5)$$

α_0, δ_0 — экваториальные координаты центра Галактики. При $\alpha_0 = 266.405100^\circ$, $\delta_0 = -28.936175^\circ$ получим $A_1 = -0.28$ мксек.дуги/год, $A_2 = -4.39$ мксек.дуги/год, $A_3 = -2.43$ мксек.дуги/год. Собственные движения небесных объектов, обусловленные ГА, в обеих рассмотренных системах координат показаны на рис. 1.

Поскольку ГА до сих пор не учитывается при обработке наблюдений, она входит во все каталоги координат небесных объектов, которые таким образом являются видимыми. Для получения истинных (в смысле учета ГА) координат, поправки (4) следует вычесть из каталожных положений.

Точность вычисления поправок за ГА зависит от точности определения постоянной A , т.е. параметров R_0 и Ω_0 или им эквивалентных, например, постоянных Оорта. Как показывают данные обзора [13] и более поздних определений, например, [14, 15], эта точность составляет не лучше 5%. Также имеется неопределенность в преобразовании между галактической и экваториальной системами координат [16]. Совокупность этих обстоятельств приводит к заключению, что точность формул (3), (4) составляет 5%–10%.

Надо отметить, что непрерывное накопление и повышение точности РСДБ-наблюдений позволяет поставить вопрос об их использовании для уточнения параметров Галактического вращения по наблюдениям внегалактических радиоисточников [17, 18]. К сожалению, результаты, полученные разными авторами разными методами по разным данным, пока противоречивы и дают значения постоянной ГА, иногда отличающиеся в несколько раз [18–23]. Однако можно надеяться, что по мере добавления нового наблюдательного материала и развития технологии РСДБ, например в результате реализации РСДБ-сети нового поколения VLBI2010 [24], точность этих оценок будет расти,

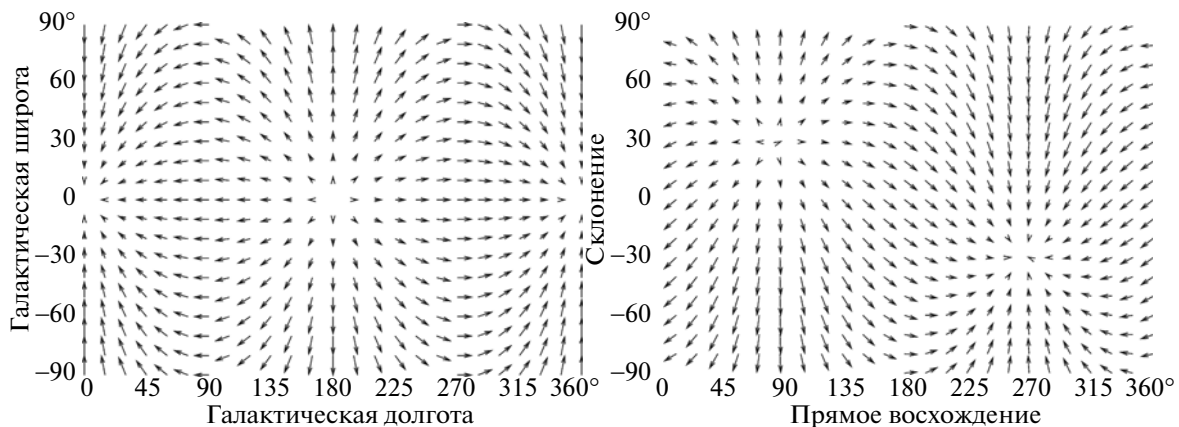


Рис. 1. Собственные движения источников из-за ГА в галактических (слева) и экваториальных (справа) координатах. Стрелки максимальной длины соответствуют собственному движению 5 мксек.дуги/год.

и новые РСДБ-данные, а также результаты космических астрометрических программ, в течение ближайших 10–15 лет позволят уточнить данные звездной астрономии. Но уже сейчас точность значения постоянной ГА достаточна для вычисления ГА с ошибкой меньше 1 мксек.дуги, что позволяет уверенно оценить возможные систематические эффекты в результатах РСДБ-наблюдений, обусловленные ГА. В данной работе будет рассмотрено влияние ГА на результаты определения параметров прецессии.

3. ВЛИЯНИЕ ГА НА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ПРЕЦЕССИИ

Поправки к параметрам прецессии по РСДБ-наблюдениям определяются из анализа рядов координат НП, состоящих из значений, полученных из обработки отдельных 24-ч сессий наблюдений на глобальных сетях станций. В среднем проводится около 3 таких сессий в неделю, преимущественно на сетях с хорошими геометрическими характеристиками, что позволяет получать высокоточные оценки параметров вращения Земли, в том числе координат НП [25]. Краткое описание основных наблюдательных программ и процесса получения результатов приведено, например в [26, 27].

На практике из РСДБ-наблюдений определяются смещения НП (CPO — Celestial Pole offset) dX и dY , представляющие собой разности полученных из обработки и теоретических значений координат НП. Эти величины после исправления за не входящий в теорию прецессии-нутаии и моделируемый эмпирически эффект свободной нутаии земного ядра (FCN) [28] интерпретируются как функции ошибок принятой модели прецессии-нутаии. При этом определенный из наблюдений

тренд в рядах dX и dY используется для уточнения параметров прецессии [10, 11]. Однако этот тренд может также вызываться ошибками в учете собственных движений наблюдаемых объектов, в том числе вызванных ГА. Последние зависят от положения объектов на небесной сфере. В идеальном случае при использовании одних и тех же источников на протяжении всего периода наблюдений и их равномерном распределении по небесной сфере ошибка определения параметров прецессии равна нулю. Однако оба эти условия на практике не выполняются. Распределение источников по прямому восхождению достаточно равномерно, за исключением небольших “провалов” в области галактического экватора, чего нельзя сказать о распределении источников по склонению. Из того, что большинство РСДБ-станций расположено в северном полушарии Земли, большинство наблюдаемых радиоисточников также находятся в северном полушарии небесной сферы (см., например, [29, 30]). Ниже будут приведены дополнительные данные о распределении радиоисточников по склонению.

В настоящей работе использованы РСДБ-наблюдения, полученные из базы данных международной службы IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) [26]. Были обработаны наблюдения 3136 сессий за период с 5 января 1984 г. по 12 марта 2010 г. — всего 5.6 млн. наблюдений (радиоинтерферометрических задержек). Обработка наблюдений проводилась в двух вариантах. В первом из них применен традиционный метод, при котором координаты радиоисточников принимались равными их значениям в каталоге ICRF2 [30] на все эпохи. Во втором варианте координаты радиоисточников на эпоху наблюдений вычислялись с учетом абберационного собственного движения с использованием формул (4). Соответственно было получено два ряда CPO, со-

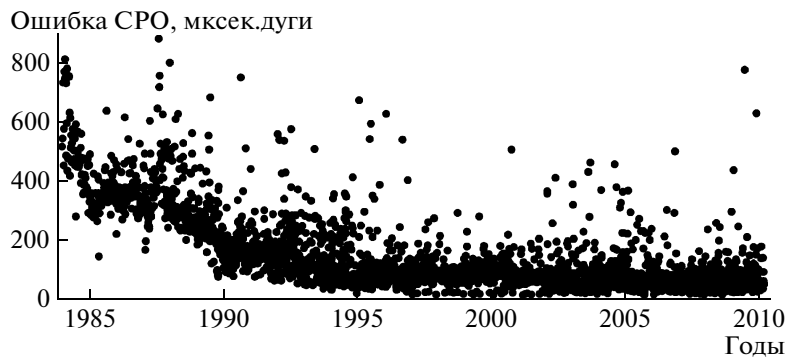


Рис. 2. Ошибка определения положения небесного полюса по одной суточной серии РСДБ-наблюдений.

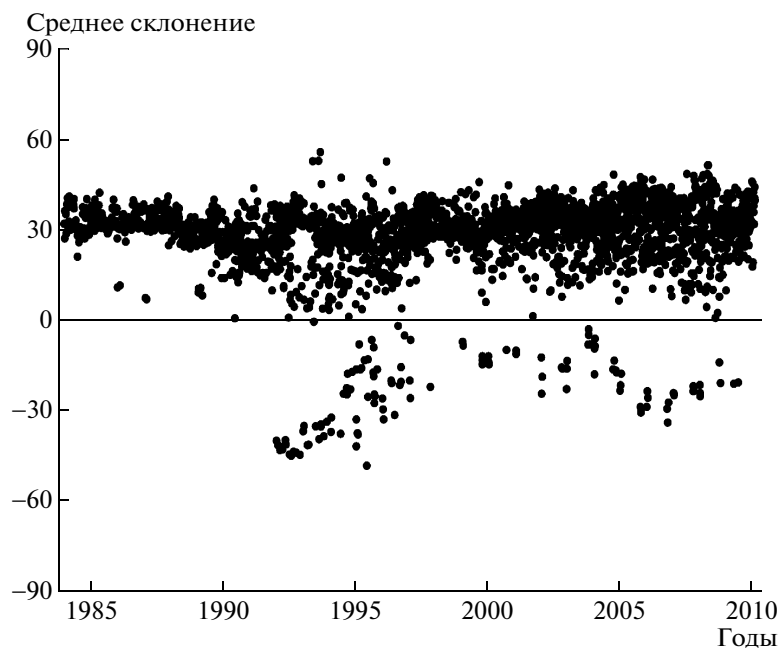


Рис. 3. Среднее склонение радиисточников по отдельным сессиям, обработанным в настоящей работе.

стоящих из 3136 оценок dX и dY с медианной ошибкой 66 мсек.дуги. Из обработки были исключены 19 оценок, имеющих либо anomalно большие значения СРО, либо anomalно большие их ошибки. Шумовая составляющая обоих рядов СРО была оценена путем применения модифицированной вариации Аллана $WMADEV$, позволяющей получить двумерную оценку шума временного ряда с учетом весов данных [32]. Она оказалась равной 159 мсек.дуги для обоих рядов. Разумеется, это значение является усредненной характеристикой точности определения СРО из РСДБ-наблюдений за 26 лет. Как показано в [33], точность наблюдений за эти годы значительно выросла. На рис. 2 приведены обновленные данные для двумерной ошибки определения координат небесного полюса, вычисленной как корень из суммы квадратов

ошибок dX и dY . Хорошо видно, что точность определения СРО улучшилась в несколько раз за первые примерно 10 лет рассматриваемого периода наблюдений, после чего практически стабилизировалась.

Дополнительно для каждой сессии были вычислены средние значения склонений наблюдавшихся радиисточников, которые приведены на рис. 3, который демонстрирует значительную асимметрию наблюдаемых радиисточников по склонению.

Из полученных таким образом 26-летних рядов dX и dY была удалена составляющая, соответствующая FCN, по модели ZM2 [28]. После этого методом наименьших квадратов были вычислены параметры линейного тренда. Вычисления производились с весам, вычисленными как обратные

Линейные тренды и 18.6-летние гармоники в рядах СРО

	Ряд	Без учета ГА	С учетом ГА
Вариант 1	Линейные тренды, мксек.дуги/год		
	dX	9.6 ± 0.5	9.7 ± 0.5
	dY	-18.8 ± 0.6	-18.6 ± 0.6
Вариант 2	Линейные тренды, мксек.дуги/год		
	dX	3.6 ± 0.8	3.6 ± 0.8
	dY	-14.0 ± 0.8	-14.0 ± 0.8
	Амплитуды 18.6-летних гармоник, мксек.дуги		
	dX	60.9 ± 5.7	62.6 ± 5.7
	dY	55.5 ± 5.5	54.7 ± 5.5

квадраты ошибок оценок dX и dY . Затем вычисленные параметры линейного тренда было повторено с одновременным определением параметров главного члена нутации с периодом 18.6 года. Результаты приведены в таблице.

Таким образом, проведенные вычисления показали, что влияние галактической aberrации на результаты определения параметров прецессии из РСДБ-наблюдений может составлять до 20 мксек.дуги в столетие в зависимости от методики обработки. Также выявлено влияние ГА на результаты определения параметров низкочастотных нутационных членов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведена оценка влияния ГА на результаты определения параметров модели прецессии из РСДБ-наблюдений — основного современного метода уточнения теории прецессии-нутации. Для этого был обработан ряд наблюдений длительностью 26 лет, состоящий из 3126 оценок СРО, полученных по 24 сессиям наблюдений на глобальных сетях станций. Было проведено сравнение величин линейных трендов в изменениях координат НП, полученных с учетом и без учета ГА. Это сравнение показало, что их разность может достигать до 0.2 мксек.дуги/год или 20 мксек.дуги в столетие. При этом учет ГА влияет также на величину поправок к амплитуде нутационных членов с большими периодами на уровне 1–2 мксек.дуги, что в свою очередь приводит к зависимости коэффициентов линейного тренда, а значит, и параметров прецессии, от состава улучшаемых параметров. Заметим, что современное требование к точности теории прецессии составляет 1 мксек.дуги в столетие [10].

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать вывод о малом, но не пренебрежимом влиянии ГА на определяемые из РСДБ-наблюдений оценки прецессионных параметров. Поэтому, несмотря на то, что найденный эффект пока находится в пределах случайной ошибки его определения, представляется необходимым включить учет галактической aberrации в стандартные алгоритмы обработки современных астрометрических наблюдений. Хотя в настоящее время точность предвычисления постоянной галактической aberrации составляет около 10%, этого достаточно для учета основной части влияния ГА. Разумеется, повышение этой точности до 1%–2% весьма желательно для полной компенсации этого эффекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. M. Clerke, *The system of the stars* (London: Longmans, Green & Co., 1890).
2. S. A. Klioner and M. Soffel, *Astron. and Astrophys.* **334**, 1123 (1998).
3. J. Kovalevsky, *Astron. and Astrophys.* **404**, 743 (2003).
4. S. Kopeikin and V. Makarov, *Astron. J.* **131**, 1471 (2006).
5. J. L. Fanelow, *Observation model and parameter partials for the JPL VLBI parameter estimation software "MASTERFIT-V1.0"*, JPL Publ. № 83-39 (Pasadena: JPL, 1983).
6. T. M. Eubanks, D. N. Matsakis, F. J. Josties, *et al.*, in: *Astronomical and Astrophysical Objectives of Sub-Milliarcsecond Optical Astrometry*, Proc. IAU Symp. № 166, Hague, The Netherlands, 15–19 August 1994, eds E. Høg, P. K. Seidelmann (Dordrecht: Kluwer, 1995), p. 283.
7. O. J. Sovers, J. L. Fanelow, and C. S. Jacobs. *Revs Mod. Phys.* **70**, 1393 (1998).
8. *Gaia: Composition, Formation and Evolution of the Galaxy. Concept and Technology Study Report*, ESA-SCI 4 (Noordwijk: European Space Agency, 2000).
9. V. E. Zharov, I. A. Gerasimov, and K. V. Kuimov, in: *Proceedings of IAU General Assembly XXV, Joint Discussion 16*, Sydney, Australia, 22 July 2003, eds. R. Gaume, D. McCarthy, J. Souchay (Washington: USNO, 2003), p. 141.
10. N. Capitaine, P. T. Wallace, and J. Chapront, *Astron. and Astrophys.* **412**, 567 (2003).
11. N. Capitaine, P. T. Wallace, and J. Chapront, *Astron. and Astrophys.* **432**, 355 (2005).
12. O. Titov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **407**, L46 (2010).
13. T. Foster and B. Cooper, e-Print arXiv:1009.3220 [astro-ph] (2010).
14. В. В. Бобылев, Письма в "Астрон. журн." **36**, 667, 2010.
15. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **408**, 1788 (2010).

16. J.-C. Liu, Z. Zhu, and H. Zhang, *Astron. and Astrophys.* **526**, A16 (2011).
17. В. Е. Жаров, *Сферическая астрономия* (Фрязино: Век-2, 2006).
18. О. Titov, in: *Journées 2007 Systèmes de Référence Spatio-temporels*, Conf. Proc., Meudon, France, 17–19 September 2007, ed. N. Capitaine (Paris: Paris Observatory, 2008), p. 16.
19. О. Titov, in: *Fifth IVS General Meeting Proceedings*, St.-Petersburg, Russia, 2–6 March 2008, eds. A. Finkelstein, D. Behrend (St. Petersburg: IAA RAS, 2008), p. 265.
20. Z. Malkin and E. Popova, in: *Journées 2008 Systèmes de Référence Spatio-temporels*, Conf. Proc., Dresden, Germany, 22–24 September 2008, eds. M. Soffel, N. Capitaine (Paris: Paris Observatory, 2009), p. 239.
21. Е. А. Попова, в сб.: *Труды Всероссийской астрометрической конференции “Пулково-2009”*, Изв. Гл. астрон. обсерв. в Пулкове **219**, вып. 4, 273 (2009).
22. О. Titov, in: *Proceedings of the 19th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting*, Bordeaux, France, 24–25 March 2009, eds. G. Bourda, P. Charlot, A. Collioud (Bordeaux: Université Bordeaux 1 - CNRS, 2009), p. 14.
23. О. Titov, S. B. Lambert, and A.-M. Gontier, *Astron. and Astrophys.* **529**, A91 (2011).
24. D. Behrend, J. Boehm, P. Charlot, *et al.*, in: *Observing our Changing Earth*, Proc. 2007 IAG General Assembly, Perugia, Italy, 2–13 July 2008, ed. M. G. Sideris, IAG Symp. **133** (Springer, 2008), p. 833.
25. Z. Malkin, *J. Geod.* **83**, 547 (2009).
26. W. Schlüter and D. Behrend, *J. Geod.* **81**, 379 (2007).
27. З. М. Малкин, *Астрон. журн.* **87**, 1141 (2010).
28. З. М. Малкин, *Астрон. вестн.* **41**, 531 (2007).
29. О. Titov and Z. Malkin, *Astron. and Astrophys.* **506**, 1477 (2009).
30. C. Ma, E. F. Arias, G. Bianco, *et al.*, *The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry*, IERS Techn. Note № 35, eds A. L. Fey, D. Gordon, C. S. Jacobs (Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts fuer Kartographie und Geodäsie, 2009).
31. Z. Malkin, *J. Geod.* **82**, 325 (2008).
32. З. М. Малкин, *Кинем. и физ. небесн. тел.* **27**, 59 (2011).
33. З. М. Малкин, *Изв. Гл. астрон. обсерв. в Пулкове* **218**, 397 (2006).