

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ОЦЕНОК ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗА ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

© 2022 г. З. М. Малкин^{1, *}, В. М. Тиссен^{2, 3, **}

¹ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Западно-Сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ», Новосибирск, Россия

³ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

*E-mail: malkin@gaoran.ru

**E-mail: tissen.ksn@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.08.2021 г.

После доработки 02.10.2021 г.

Принята к публикации 01.11.2021 г.

Повышение точности прогнозирования параметров вращения Земли (ПВЗ) является одной из основных прикладных астрометрических задач. Для ее решения используются различные подходы, и для выбора наилучшего из них часто проводятся сравнения точности прогнозов ПВЗ, получаемых разными методами в разных центрах анализа. При таких сравнениях используются различные статистические оценки ошибок прогноза, основанные на анализе разностей прогнозных и окончательных значений ПВЗ. В статье проведено сравнение нескольких оценок, таких как среднеквадратическая ошибка, средняя ошибка, медианная ошибка и максимальная ошибка. Показано, что между оценками точности прогноза, получаемыми этими методами, не всегда есть прямая зависимость. Поэтому рекомендуется применять в работах по сравнению рядов прогнозов ПВЗ, особенно краткосрочных, совместно несколько оценок для получения наиболее информативных результатов сравнения точности разных методов прогноза.

Ключевые слова: вращение Земли, параметры вращения Земли (ПВЗ), прогноз ПВЗ

DOI: 10.31857/S0004629922020062

1. ВВЕДЕНИЕ

Параметры вращения Земли (ПВЗ) определяют связь между земной системой координат, в которой задаются положения и скорости объектов на и вблизи поверхности Земли, и небесной системой координат, в которой задаются положения и скорости астрономических объектов. Высокоточные значения ПВЗ необходимы при решении многих научных и практических задач в области астрономии, геодезии, наземной и космической навигации, телекоммуникаций, синхронизации удаленных шкал времени, спутникового зондирования поверхности и атмосферы Земли и других приложений, в частности, относящихся к кругу задач, решаемых системой фундаментального координатно-временного обеспечения (ФКВО) [1]. При этом для обеспечения операций в реальном времени необходим прогноз ПВЗ с наибольшей возможной точностью. Поэтому повышение точности определения и прогнозирования ПВЗ является одной из основных задач астрометрии. Для ее решения разными авторами развиваются различные методы прогноза. Сравнение точности прогнозов ПВЗ, получаемых

разными авторами и методами, является традиционной задачей. В частности, можно выделить специальные кампании, организованные Международной службой вращения Земли и опорных систем координат (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS) [2, 3].

В литературе описаны несколько различных статистических оценок точности прогноза ПВЗ, на основе которых сравниваются ряды прогнозов, полученные разными авторами и методами. Все они основаны на анализе разностей между прогнозными и окончательными значениями ПВЗ. Первоначально обычно использовались среднеквадратические значения этих разностей [4]. Эта оценка продолжает широко использоваться и сейчас. Позднее также стала часто применяться средняя ошибка прогноза [5]. В работе [6] было предложено дополнительно использовать максимальную ошибку прогноза, которую можно рассматривать как оценку гарантированной ошибки, важную для некоторых практических приложений. Кроме этих трех оценок мы также рассмотрели медианную ошибку прогноза, которая является одной из устойчивых оценок, не

подверженных влиянию случайных удачных или неудачных прогнозов, в отличие от остальных используемых оценок. Описание методики вычисления этих оценок и результатов их применения к реальным прогнозам ПВЗ приведено ниже.

2. СРАВНЕНИЕ ОЦЕНОК ОШИБОК ПРОГНОЗА ПВЗ

Мы провели сравнение четырех оценок точности прогноза ПВЗ на примере прогнозов координат полюса Земли X_p и Y_p и всемирного времени UT1, вычисленных в 2011–2020 гг. в трех центрах анализа ПВЗ. Первая серия прогнозов вычисляется в Бюро срочной службы и прогноза (Rapid Service/Prediction Center) Международной службы вращения Земли и опорных систем координат (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS), функционирующему в Морской обсерватории США (USNO) [7]. Эти прогнозы публикуются в ежедневных Бюллетенях А (IERS Bulletin A¹) и далее обозначены как ВА. Вторая серия прогнозов вычисляется Центром сводной обработки и определения ПВЗ Главного метеорологического центра Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГМЦ ГСВЧ) [8], являющимся подразделением Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ). Эти прогнозы публикуются в ежедневных бюллетенях Q² и далее обозначены как ВQ. Третья серия прогнозов вычислена В.М. Тиссенем, далее эти прогнозы обозначены как VT. Методика вычисления этих прогнозов приведена в [9, 10]. Четвертая серия прогнозов вычислена З.М. Малкиным, далее эти прогнозы обозначены как ZM. Для вычисления прогнозов ZM использовалась методика, описанная в [6], с небольшими вариациями параметров моделей.

Таким образом, мы обработали четыре серии прогнозов, которые вычислялись ежедневно в реальном времени за десятилетний период с 1 января 2011 г. по 31 декабря 2020 г. Всего за этот период можно было ожидать 3653 прогнозов для каждой серии, однако, по разным причинам не все прогнозы попали в нашу базу. Фактически было собрано 3626 прогнозов ВА, 3653 прогноза ВQ, 3258 прогнозов VT и 3626 прогнозов ZM. Все они без исключения были использованы в вычислениях, результаты которых представлены ниже.

В указанных выше центрах обработки ПВЗ вычисляются прогнозы разной длительности. В настоящей работе мы использовали прогнозы длительностью 30 сут., что соответствует длине про-

гноза ВQ, самому короткому из рассматриваемых.

При сравнении прогнозных значений ПВЗ окончательными для соблюдения строгости сравнения следует учесть, какие ряды ПВЗ прогнозировались (фактически экстраполировались), и окончательные значения именно этих рядов использовать для вычисления ошибок прогноза. Прогнозы ВА, VT и ZM экстраполируют ряд ПВЗ USNO finals.all³. Поэтому для этих серий прогнозов производилось сравнение именно с этим рядом. Прогнозы ВQ сравнивались с окончательным рядом ПВЗ ГСВЧ gs_pvz.dat⁴.

Ошибки прогнозов ПВЗ для каждого центра (серии прогноза) определялись следующим образом. Для каждого из них вычислялись разности прогнозных значений ПВЗ с окончательными значениями указанных выше рядов ПВЗ d_{ij} , где i – номер прогноза в наборе прогнозов данного центра, а j – число дней (длина) прогноза, $j = 1, \dots, 30$. Затем вычислялись различные статистики ошибок прогнозов данного центра в зависимости от длины прогноза j :

среднеквадратическая ошибка

$$RMS_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_{ij}^2}{n}}, \quad (1)$$

средняя абсолютная ошибка

$$MAE_j = \frac{\sum_{i=1}^n |d_{ij}|}{n}, \quad (2)$$

медианная абсолютная ошибка

$$MedAE_j = \text{median}_{i=1..n} |d_{ij}|, \quad (3)$$

максимальная абсолютная ошибка

$$MaxAE_j = \max_{i=1..n} |d_{ij}|. \quad (4)$$

Следует отметить, что, в отличие от других оценок, $MaxAE$ не отражает некоторую усредненную точность прогнозов, а определяется только самым неудачным из них.

Вычисленные таким образом средние за 10-летний период ошибки для четырех серий прогнозов координат полюса и всемирного времени представлены на рис. 1. Полученные результаты показывают, что точность прогнозов, получаемых разными методами в разных центрах анализа, во многих случаях существенно различна.

В целом можно выделить прогнозы ВА и VT, имеющие наилучшую и примерно одинаковую

¹ <https://datacenter.iers.org/availableVersions.php?id=6>

² ftp://ftp.vniiftri.ru/Out_data/Bul_rus_Q/

³ <https://datacenter.iers.org/eop.php>

⁴ ftp://ftp.vniiftri.ru/Out_data/EOP_series/g_s_pvz.dat

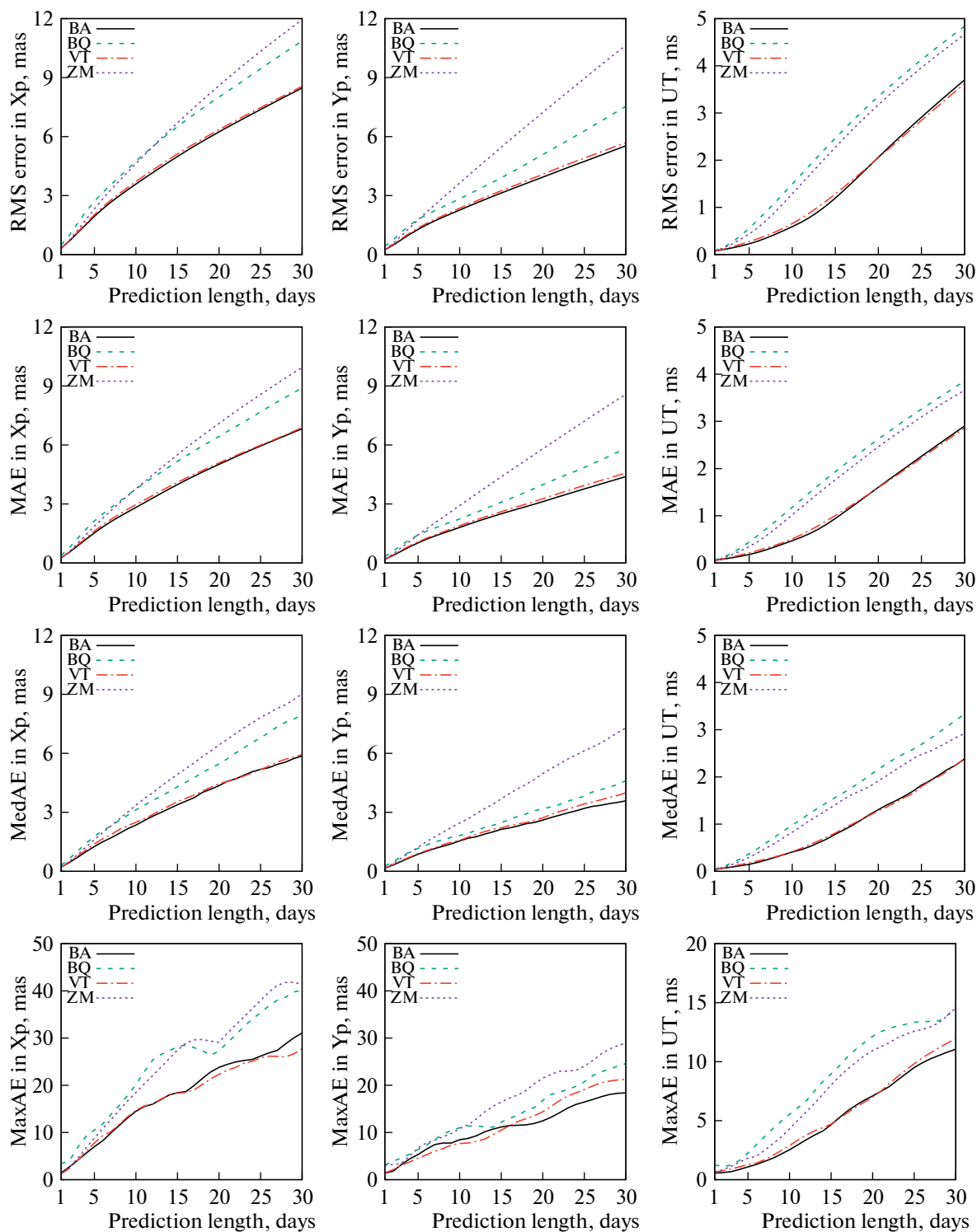


Рис. 1. Различные оценки ошибок прогнозов ПВЗ: по столбцам – X_p , Y_p , UT1, по строкам – RMS, MAE, MedAE, MaxAE.

точность во всех случаях. Более детальный анализ выявляет некоторое преимущество одного из этих методов для определенных типов ПВЗ и интервалов длин прогноза, но эти различия невели-

ки. Прогнозы BQ и ZM в целом заметно хуже. Для прогнозов X_p и UT1 эти две серии имеют близкую точность. При прогнозировании координат полюса результаты ZM показывают несколько луч-

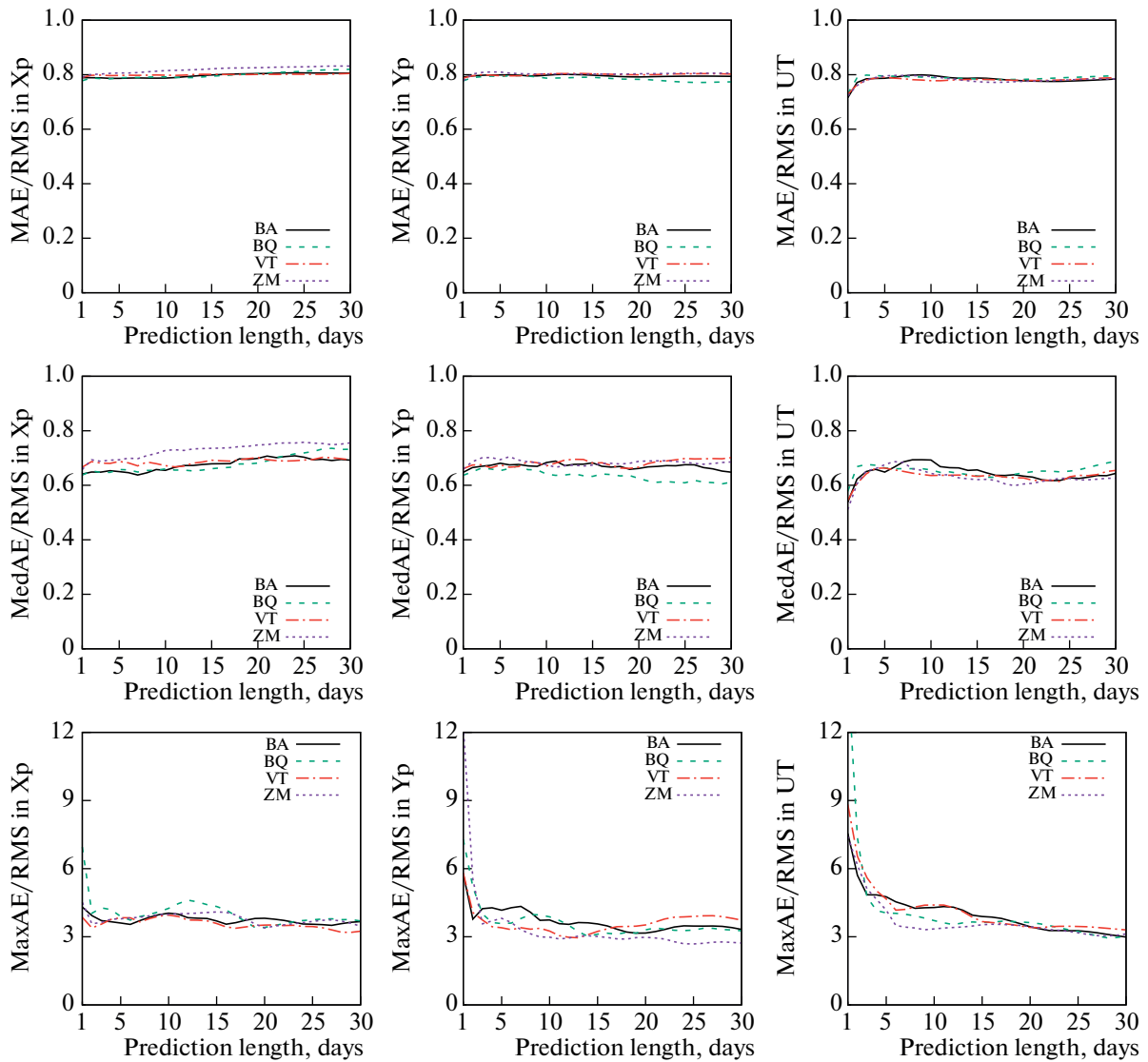


Рис. 2. Отношения различных оценок ошибок прогнозов ПВЗ: по столбцам – X_p , Y_p , UT1, по строкам – MAE/RMS , $MedAE/RMS$, $MaxAE/RMS$.

шую точность для небольшой длины прогноза, а прогнозы BQ существенно лучше для более долгосрочных прогнозов, особенно для Y_p . При прогнозировании UT1 прогнозы ZM немного точнее во всех случаях. Также интересно отметить, что точность прогнозов для X_p оказалась заметно хуже, чем для Y_p у всех центров.

В целом можно отметить, что сравнительная оценка точности прогнозов ПВЗ, которая может быть сделана на основе их сравнения разными методами, практически одна и та же за исключением, в ряде случаев, самых кратковременных прогнозов.

На рис. 2 представлены отношения различных оценок ошибок прогнозов ПВЗ. За исключением

самых краткосрочных прогнозов, получаемые разными методами оценки точности прогнозов различаются практически только постоянным множителем, одинаковым для разных серий прогнозов и для всех трех типов ПВЗ. Во всех случаях оценка MAE составляет около 0.8 от RMS . Этот результат подтверждает выводы работы [11], полученные для двухлетних серий прогнозов ПВЗ USNO и VT, вычисленных в 2009–2011 гг. Оценка $MedAE$ составляет около двух третей от RMS для прогнозов длиной больше трех-четырёх суток. При этом можно отметить, что оценка MAE значительно ближе к RMS (с учетом постоянного множителя), чем $MedAE$. Отклонение взаимного отношения этих трех оценок от постоянной вели-

чины особенно заметно для самых краткосрочных прогнозов всемирного времени.

Максимальная ошибка в три-четыре раза больше RMS для прогнозов длительностью больше нескольких дней для всех центров и типов ПВЗ. В то же время соотношение $MaxAE$ и RMS значительно выше для прогнозов длительностью один-два дня. Причина этого может быть в следующем. Как показано в [6], ошибки прогноза в значительной степени определяются ошибками ПВЗ для последних эпох прогнозируемого ряда, которые имеют пониженную точность по сравнению с окончательными значениями, вычисленными по прошествии некоторого времени. Разные методы прогноза могут быть по-разному чувствительны к этому фактору. Напомним, что $MaxAE$ определяется наиболее неудачным прогнозом и эта величина может в определенном смысле рассматриваться как оценка гарантированной точности прогноза ПВЗ в наиболее неблагоприятном случае.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе мы сравнили четыре различных метода оценки ошибок прогнозов ПВЗ, таких как RMS , MAE , $MedAE$ и $MaxAE$. Результаты вычислений, произведенных на материале четырех серий реальных прогнозов, вычисленных в четырех центрах анализа ПВЗ в течение 10-летнего периода с 1 января 2011 г. по 31 декабря 2020 г., позволяют сделать следующие выводы.

При сравнении прогнозов разных центров длительностью от нескольких суток до одного месяца оценки RMS , MAE и $MedAE$ оказались практически эквивалентны с точностью до постоянного множителя. Небольшие наблюдаемые отличия мало влияют на основные результаты сравнения разных серий прогнозов. Только для прогнозов очень близкой точности, таких как, например, ВА и VT, применение той или иной оценки может показать небольшое преимущество одной или другой серии, что интересно теоретически, но может быть мало значимо для практики.

Напротив, для коротких прогнозов различные оценки точности прогнозов могут давать существенно разные результаты. Разница в оценках особенно велика для прогнозов длительностью один-два дня, критически важных для многих практических приложений, например, связанных с эфемеридно-временным обеспечением глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

То же самое относится и к сравнительной оценке максимальной ошибки прогноза в разных центрах, которая практически отличается только постоянным множителем от других оценок, если среди прогнозов не встречается грубо ошибочных. Если же серия содержит грубо ошибочные прогнозы, применение $MedAE$ позволяет получить оценку точности прогнозов данной серии, не искаженную влиянием отдельных прогнозов с аномально большими ошибками.

В целом можно сказать, что различные критерии оценки точности прогнозов ПВЗ полезно дополняют друг друга и их совместное применение позволяет производить наиболее полную всестороннюю сравнительную оценку точности различных серий (методов) прогноза. Поэтому представляется полезным в работах, посвященных сравнениям прогнозов ПВЗ, приводить все рассмотренные выше (и, возможно, какие-то дополнительные) оценки ошибок прогноза, чтобы дать полную информацию разным потребителям с их специфическими требованиями. Особенно это важно для коротких прогнозов, когда различные оценки ошибок прогноза могут существенно различаться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. М. Финкельштейн, И. С. Гаязов, В. С. Губанов, Г. А. Красинский, и др., Труды ИПА **13**, 7 (2005).
2. M. Kalarus, H. Schuh, W. Kosek, O. Akyilmaz, et al., J. Geodesy **84**, 587 (2010).
3. W. Kosek, B. Luzum, M. Kalarus, A. Wnek, and M. Zbylut, Artificial Satellites **46**, 139 (2011).
4. D. D. McCarthy and B. J. Luzum, Bull. Geodesique **65**, 18 (1991).
5. W. Kosek, D. D. McCarthy, and B. J. Luzum, J. Geodesy **72**, 189 (1998).
6. Z. Malkin and E. Skurikhina, arXiv:0910.3336 [physics.geo-ph] (2009).
7. W. R. Dick and D. Thaller (Eds.), IERS Annual Report 2018 (Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2020).
8. M. Kaufman and S. Pasynok, Artificial Satellites **45**, 81 (2010).
9. V. M. Tissen, A. S. Tolstikov, A. Y. Balakhnenko, and Z. M. Malkin, Measurement Techniques **52**, 1249 (2009).
10. V. M. Tissen, Proc. of the Higher Educational Institutions. Izvestia Vuzov. Geodesy and aerophotosurveying, № 2, 44 (2014).
11. З. М. Малкин, В. М. Тиссен, Вестн. СПбГУ. Сер. 1: Математика. Механика. Астрономия № 3, 143 (2012).