

УДК 521.322

О возможности оперативного вычисления предварительной орбиты по короткой дуге с целью проведения повторных наблюдений в текущую ночь

*Т.Н. Санникова*ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым
tnsannikova@craocrimea.ru

Поступила в редакцию 21 сентября 2023 г.

Аннотация. Исследованы условия для успешного динамического планирования повторных наблюдений новых космических объектов при работе телескопа в автоматическом режиме. Рассмотрены 248 пар коротких серий наблюдений (сетов), полученных в течение одной ночи на телескопе АТ-64 Крымской астрофизической обсерватории в 2022 г. Для 234 пар по первому сету найдены предварительные орбиты методом Лапласа с последующим улучшением методом дифференциальной коррекции. Уточнение орбиты проведено сначала с использованием формул задачи двух тел, затем с помощью упрощенной модели возмущенного движения SGP4. Далее определены эфемериды на моменты времени второго сета и оценено их качество путем вычисления углового расстояния ($O - C$) между наблюдаемыми и вычисленными положениями объекта. Принято, что предварительная орбита имеет хорошее качество, если $(O - C) < 45'$, то есть объект попадает в поле зрения телескопа АТ-64. В результате получено, что для успешного определения предварительной орбиты и вычисления эфемериды хорошего качества желательно получить первую серию наблюдений с топоцентрической дугой более 1° и продолжительностью более 3 мин, а для объектов с большой полуосью менее 20000 км – с дугой более 5° . Повторное наблюдение необходимо провести в течение 60 мин от эпохи предварительных элементов, в случае объектов с большим отношением площади к массе – в течение 30–40 мин.

Ключевые слова: космический мусор, метод Лапласа, SGP4, большое отношение площади к массе

1 Введение

В настоящее время на околоземных орбитах наблюдается большое количество малоразмерных космических объектов искусственного происхождения. Дальнейшее освоение околоземного пространства невозможно без знания текущей обстановки, анализа источников и закономерностей эволюции космического мусора (КМ). Крымская астрофизическая обсерватория (КраО) занимает одну из ведущих позиций в этой области, принимая активное участие в программе исследований КМ с 2003 года. Первые результаты исследования фрагментов КМ в геостационарной области изложены в статье [Вольвач и др. \(2006\)](#).

Далеко не все наблюдаемые объекты КМ каталогизированы, многие из них новые или были потеряны. Чтобы при обнаружении нового объекта точнее определить его орбитальные параметры, желательно получить несколько серий наблюдений в течение одной ночи. Можно автоматизировать этот процесс, если по первой серии оперативно определить предварительную орбиту и рассчитать эфемериду на ближайшее время в формате планировщика работы телескопа. Такое динамическое планирование позволило бы провести повторные наблюдения объекта в текущую ночь.

На данный момент программа определения предварительной орбиты разработана и проходит лабораторные тестирования. В прошлом году было проведено сравнение методов Лапласа и параметров видимого движения (ПВД) путем определения предварительных орбит 2783 модельных объектов по коротким трекам продолжительностью 6 и 8 мин, содержащим соответственно 4 и 5 положений объ-

екта с 2-минутным интервалом. С результатами можно ознакомиться в Санникова (2022). В частности получено, что метод ПВД часто оказывается точнее метода Лапласа, но последний дает меньше отказов и более эффективен в экстремальных условиях, таких как короткая дуга наблюдений, высокоэллиптические и полярные орбиты. Поэтому в условиях автоматической работы метод Лапласа предпочтительней.

2 Методы и программная реализация

В настоящей работе рассмотрены 119 малоразмерных объектов с большой полуосью орбиты от 7254 до 44674 км, которые наблюдались в Крымской астрофизической обсерватории на телескопе АТ-64 в течение 2022 года. Для этих объектов отобраны 248 пар коротких серий наблюдений (сетов), полученных в одну ночь. Также использованы данные о параметрах орбиты и отношении площади к массе (ОПМ), полученные для этих объектов Институтом прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН (ИПМ) (рис. 1). Большинство из рассмотренных объектов находятся в области геостационарных орбит (почти круговые орбиты с большой полуосью более 40000 км и малым наклоном к плоскости экватора) и орбит типа “Молния” (высокоэксцентричные орбиты с большой полуосью ~ 25000 км и наклоном $\sim 65^\circ$).

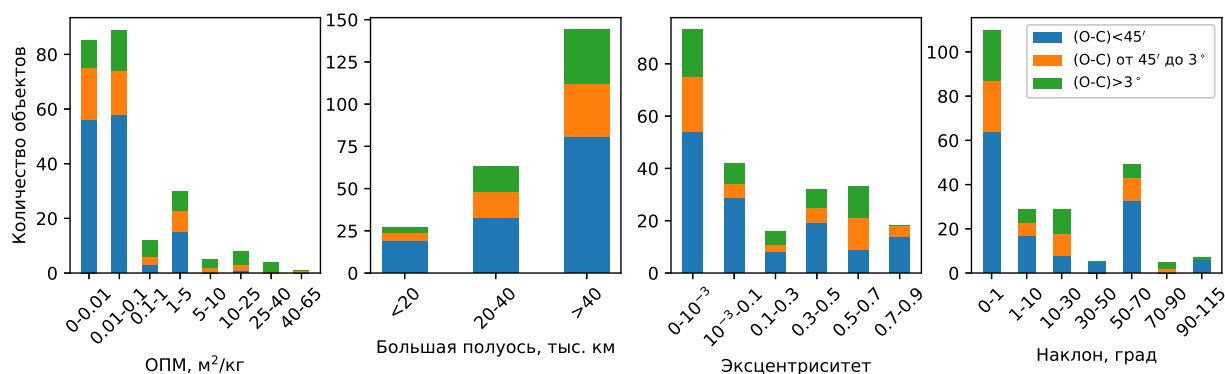


Рис. 1. Распределение по ОПМ и элементам орбиты 234 объектов с успешным вычислением эфемериды

На основе первой серии наблюдений методом Лапласа определены предварительные орбиты с последующим их улучшением методом дифференциальной коррекции.

Далее вычислены эфемериды на моменты времени второй серии и оценена их точность. Для этого определено угловое расстояние ($O - C$) между вычисленным и наблюдаемым положениями. Принято, что предварительная орбита имеет хорошее качество, если $(O - C) < 45'$, то есть объект попадает в поле зрения телескопа АТ-64, среднее качество при $45' \leq (O - C) \leq 3^\circ$ (объект попадает в поле зрения обзорного телескопа) и плохое качество при $(O - C) > 3^\circ$.

Улучшение орбиты проведено сначала в рамках модели невозмущенного движения по формулам задачи двух тел, а затем с использованием упрощенной модели возмущенного движения SGP4 (Vallado et al., 2006). В последнем случае, если удалось получить уточненные элементы орбиты, эфемерида также вычислена с помощью модели SGP4.

Программно методы Лапласа и дифференциальной коррекции реализованы на языке Python в соответствии с методиками, описанными в книгах Быкова, Холшевникова (2013) и Эскобала (1970). Определение вектора наблюдателя, а также преобразования координат и времени выполнены с помощью базового пакета для астрономии Astropy¹, разработанного сообществом Astropy Collaboration (2018). Координаты и скорости объектов в заданные моменты времени вычислены либо по формулам невозмущенного движения в рамках задачи двух тел, либо с помощью библиотеки sgp4², реализующей упрощенную модель возмущенного движения околоземных объектов. Все математические

¹ <http://www.astropy.org>

² Brandon Rhodes, <https://pypi.python.org/pypi/sgp4>

операции осуществлены с помощью пакета `numpy`³, который позволяет обрабатывать векторы и матрицы.

3 Результаты и обсуждение

Вычисления проведены для 248 пар сетов (далее – объектов). Из них в 6 случаях предварительная орбита определена как гиперболическая, и дальнейшая работа не проводилась. Еще 8 случаев дали такие элементы, что на моменты второй серии вычисленное положение объекта оказалось под поверхностью Земли, и, как следствие, эфемериду вычислить не удалось. В этих 8 случаях промежутков времени между сетами превысил 80 мин. Вероятной причиной 14 неудач является короткая топоцентрическая дуга первой серии наблюдений, которая в данных случаях составила менее 0.65° . Для остальных 234 объектов успешно определена предварительная орбита и вычислена эфемериды на моменты времени второго сета, при этом:

- не удалось выполнить улучшение орбиты для 44 объектов, из них для 16 – $(O - C) < 45'$, для 11 – $45' \leq (O - C) \leq 3^\circ$ и для 17 – $(O - C) > 3^\circ$;
- орбита улучшена только в рамках модели невозмущенного движения для 24 объектов, из них для 5 – $(O - C) < 45'$, для 10 – $45' \leq (O - C) \leq 3^\circ$ и для 9 – $(O - C) > 3^\circ$;
- эфемериды вычислены с помощью модели SGP4 для 166 объектов, из них для 112 – $(O - C) < 45'$, для 30 – $45' \leq (O - C) \leq 3^\circ$ и для 24 – $(O - C) > 3^\circ$.

На рис. 1 приведено распределение 234 объектов по ОПМ, большой полуоси, эксцентриситету и наклону, а также количественное соотношение случаев, в которых угловое расстояние $(O - C)$ между наблюдаемым и вычисленным положениями было менее $45'$, от $45'$ до 3° и более 3° .

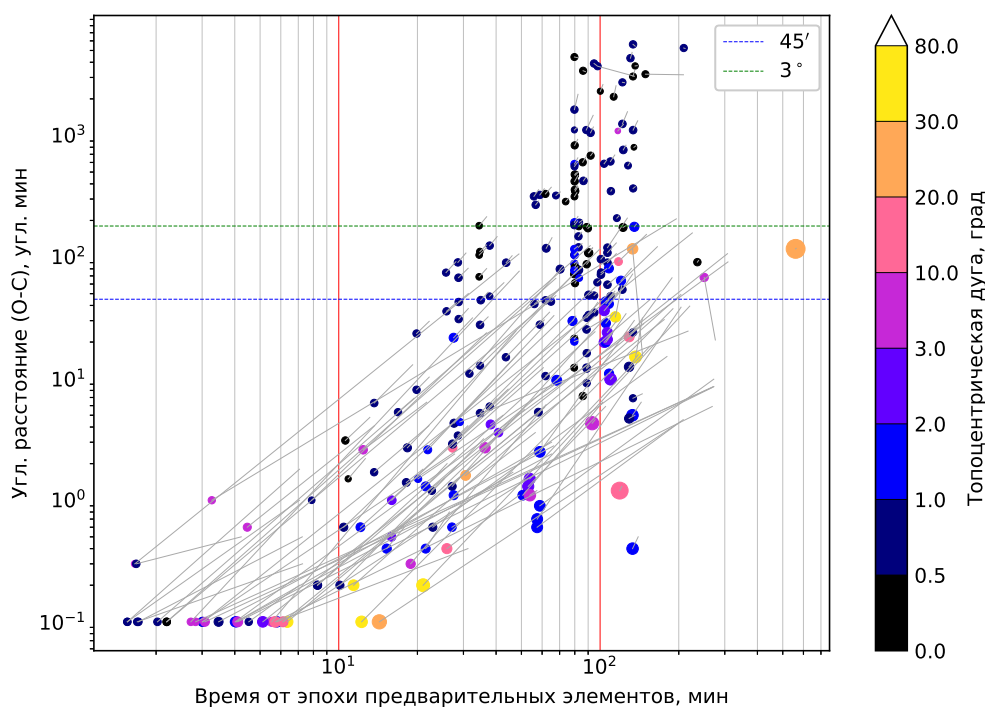


Рис. 2. Угловое расстояние $(O - C)$ между наблюдаемым и вычисленным положениями в зависимости от интервала времени между эпохой предварительных элементов и моментами времени второго сета. Цвет маркера указывает на длину топоцентрической дуги первой серии наблюдений, размер маркера пропорционален продолжительности первого сета

³ <https://numpy.org>

На рис. 2 показано угловое расстояние ($O - C$) в зависимости от времени между эпохой предварительных элементов и моментами времени второй серии наблюдений. Точками отмечено начало второй серии, серые линии соединяют начало второго сета с последним наблюдением в текущую ночь. Видим, что с увеличением времени до второго сета возрастает количество случаев с угловым расстоянием более 3° . Таким образом, чем раньше будет проведено повторное наблюдение, тем больше вероятность, что объект попадет в поле зрения телескопа. Кроме того, на рис. 2 видим, что плохое качество эфемериды чаще всего получено, если топоцентрическая дуга первой серии короче 1° .

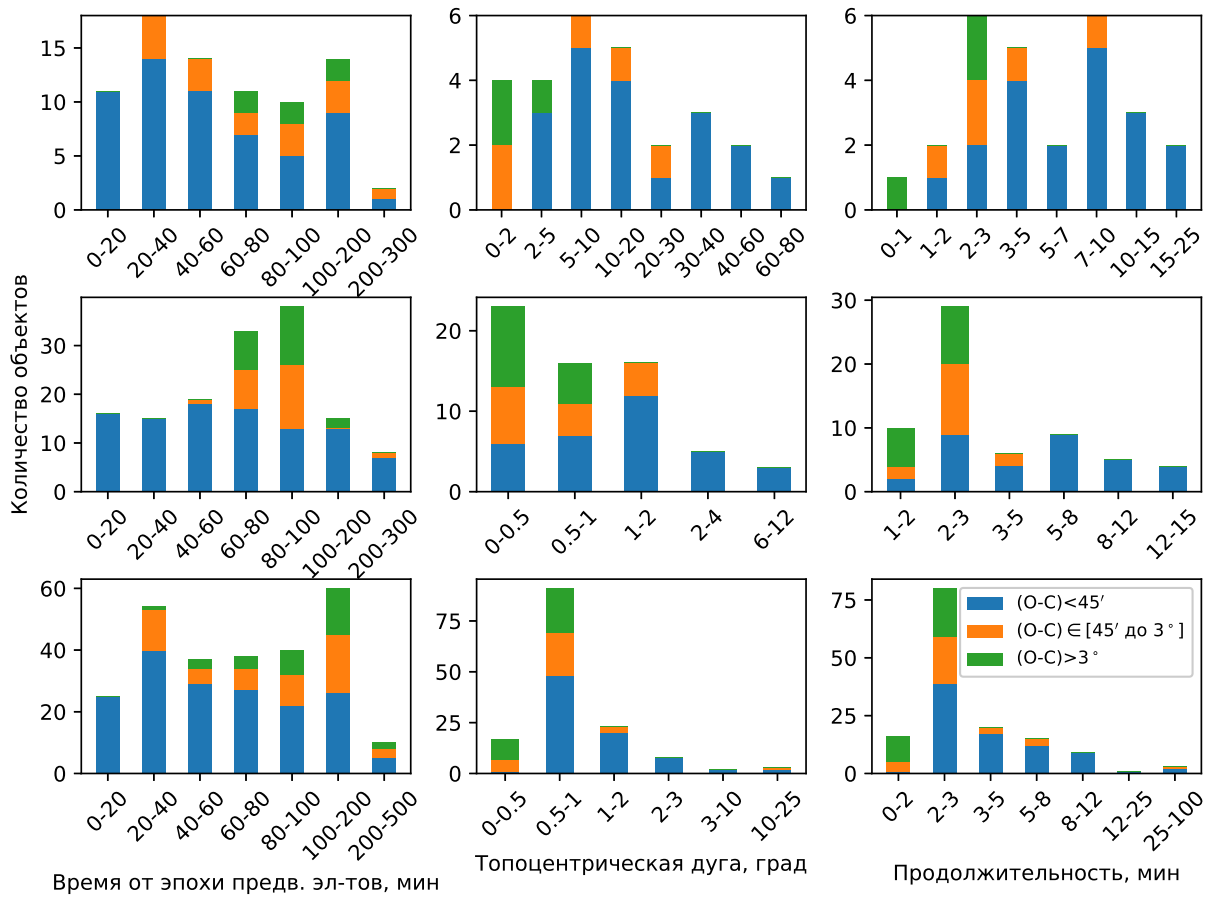


Рис. 3. Распределение объектов в зависимости от интервала времени между эпохой предварительных элементов и моментами времени второго сета, а также от характеристик первого сета: топоцентрической дуги и продолжительности. Верхняя панель относится к объектам с большой полуосью орбиты менее 20000 км, средняя – от 20000 до 40000 км, нижняя – более 40000 км

Рассмотрим подробнее объекты с различными большими полуосями. Для объектов с большой полуосью менее 20000 км (27 объектов) первый сет часто содержит большое количество точек и имеет длинную топоцентрическую дугу (рис. 3 и 4, верхняя панель). В некоторых случаях предварительная орбита определена настолько точно, что угловое расстояние между наблюдаемым и вычисленным положением менее $45'$ даже на следующем витке. Однако при продолжительности первой серии наблюдений менее 1 мин и дуге короче 2° предварительная орбита имеет плохое качество. Желательно получить дугу более 5° и продолжительность более 3 мин, чтобы обеспечить хорошее качество эфемериды.

Для объектов с большой полуосью от 20000 до 40000 км (63 объекта) нередко встречается первый сет с очень короткой топоцентрической дугой (менее 1°) и продолжительностью менее 3 мин. В этих случаях эфемерида часто имеет плохое качество (см. рис. 3, средняя панель). Но если повторные

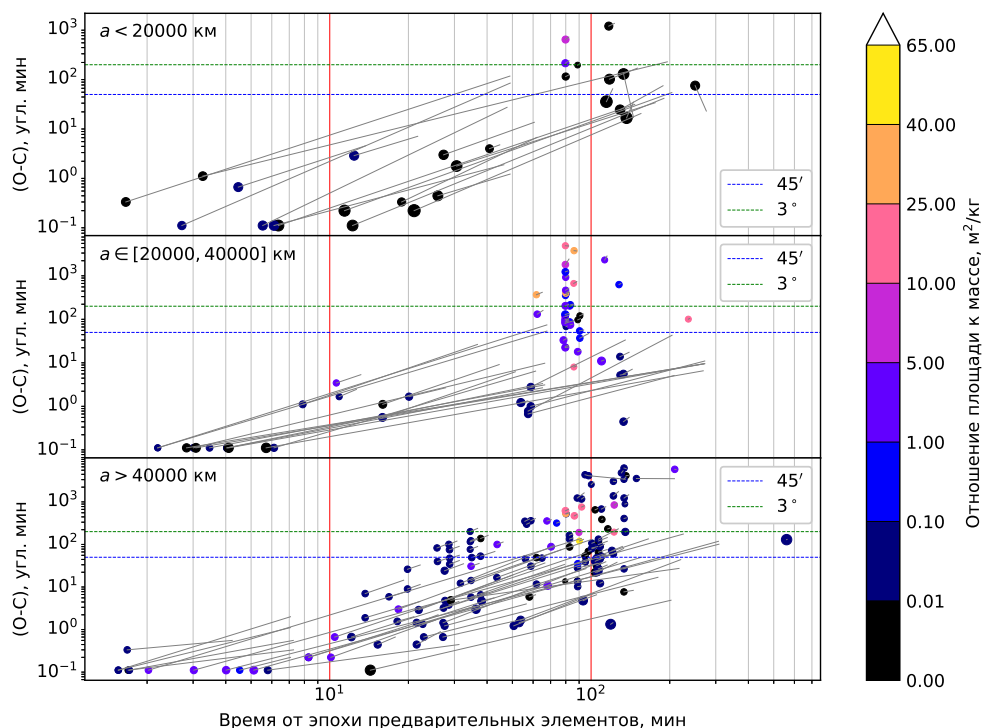


Рис. 4. Зависимость качества эфемериды от отношения площади к массе объекта. Цвет маркера указывает на величину ОПМ объекта, размер маркера пропорционален длине топоцентрической дуги первого сета

наблюдения провести в течение 1 ч после определения предварительных элементов, то объект, скорее всего, попадет в поле зрения телескопа.

В большинстве случаев первая серия наблюдений объектов с большой полуосью более 40000 км (всего 144 объекта) также имеет очень короткую топоцентрическую дугу (рис. 3 и 4, нижняя панель). На рис. 3 видим, что при дуге менее 0.5° и продолжительности сета менее 2 мин практически невозможно получить точную эфемериду на длительное время. При продолжительности серии 2–3 мин и дуге до 1° вероятность попадания в поле зрения телескопа $\sim 50\%$. С увеличением времени наблюдения и топоцентрической дуги качество эфемериды возрастает. В целом в большинстве случаев повторные наблюдения удастся провести в течение 60–80 мин после эпохи предварительных элементов, но желательно иметь дугу более 1° .

На рис. 4 показана зависимость качества эфемериды от ОПМ объекта. Большинство наблюдений относится к объектам с малыми ОПМ (рис. 1). Для них полученная эфемериды часто имеет хорошее качество на протяжении 1–2 ч. Имеется несколько объектов с ОПМ 1–25 $\text{м}^2/\text{кг}$, для которых эфемериды имеют хорошее качество в течение 60–90 мин. К сожалению, для всех объектов с ОПМ более 25 $\text{м}^2/\text{кг}$ интервал времени между сериями наблюдений составляет 60 и более минут, и вычисленная для них эфемериды имеет плохое качество. Поскольку чаще всего теряются объекты с большими ОПМ, для успешного повторного обнаружения таких объектов в автоматическом режиме работы необходимо успеть провести наблюдения в течение 30–40 мин после получения предварительных элементов.

4 Заключение

Для успешного определения предварительной орбиты и организации повторного наблюдения вновь обнаруженного объекта в текущую ночь в автоматическом режиме работы телескопа желательно получить первую серию наблюдений с топоцентрической дугой более 1° и продолжительностью более 3 мин, а для объектов с большой полуосью менее 20000 км – с дугой более 5° . Повторное наблюдение

необходимо провести в течение 60 мин от эпохи предварительных элементов, в случае объектов с большим отношением площади к массе – в течение 30–40 мин.

Благодарности. Автор благодарит Василия Владимировича Румянцева (КрАО) за предоставленные наблюдательные данные малоразмерных космических объектов и сведения ИПМ, а также анонимного рецензента за справедливые замечания.

Литература

- Быков О.П., Холшевников К.В., 2013. Прямые методы определения орбит небесных тел: учеб. пособие. Спб: Изд-во С.-Петерб. ун-та. [Bykov O.P., Kholshchevnikov K.V., 2013. Direct methods for determining the orbits of celestial bodies: a tutorial. Spb: Izd-vo S.-Peterb. un-ta. (In Russ.)]
- Вольвач А.Е., Румянцев В.В., Молотов И.Е. и др., 2006. Космическая наука и технология. Т. 12. № 5–6. С. 50. [Volvach A.E., Rumjantsev V.V., Molotov I.E., et al., 2006. Kosm. Nauka Tekhnol., vol. 12, no. 5–6, pp. 50–57. (In Russ.)]
- Санникова Т.Н., 2022. Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых “Астрономия и исследование космического пространства”. С. 159–162. <http://hdl.handle.net/10995/115982> [Sannikova T.N., 2022. All-Russian scientific conference of students and young scientists with international participation “Astronomy and space exploration”, pp. 159–162, <http://hdl.handle.net/10995/115982> (In Russ.)]
- Эскобал П., 1970. Методы определения орбит. М: Изд-во “Мир”. [Escobal P., 1965. Methods of orbit determination, New York: John Wiley and Sons, Inc.]
- Astropy Collaboration, Price-Whelan A.M., Sipőcz B.M. et al., 2018. Astron. J., vol. 156, no. 3, p. 123, [doi:10.3847/1538-3881/aabc4f](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aabc4f).
- Vallado D.A., Crawford P.S., Hujsak R. and Kelso T.S., 2006. AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit. Keystone, Colorado, [doi:10.2514/6.2006-6753](https://doi.org/10.2514/6.2006-6753).

On the possibility of prompt computing a preliminary orbit along a short arc for the purpose of conducting repeated observations on the current night

T.N. Sannikova

Laboratory of Small Solar System Bodies, Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409
tnsannikova@craocrimea.ru

Abstract. The paper explores the conditions for a successful dynamic planning of the repeated observations of new space objects when the telescope operates in automatic mode. To organize the dynamic planning, we wrote software for determining the preliminary orbits and calculating the ephemeris for the near future in the format of a telescope operation scheduler. The computer program finds a preliminary orbit using the Laplace method and then improves it using the differential correction method. The program first uses the two-body problem formulas and then the SGP4 model to improve the orbit and calculate the ephemeris. This study considers 248 pairs of observation sets for 119 small-sized objects with an orbital semi-major axis from 7254 to 44674 km, obtained during one night with the AT-64 telescope of the Crimean Astrophysical Observatory in 2022. Our software determined preliminary orbits by the first observation set and computed ephemeris for the time points of the second observation set for 234 pairs. Next, we estimated their quality by determining the angular distance ($O - C$) between the observed and calculated positions of the object. We accept that the preliminary orbit and ephemeris have a good quality if $(O - C) < 45'$, that is, the object falls within a field of view of the AT-64 telescope. As a result, we find that it is advisable to get the first observation set with a topocentric arc of more than 1° (and more than 5° in case of orbits with a semi-major axis of less than 20 000 km) and a duration of more than 3 minutes in order to successfully determine the preliminary orbit and compute a good-quality ephemeris during 60 minutes from the epoch of preliminary elements. But a repeated observation should be carried out within 30–40 minutes if objects have a high area-to-mass ratio.

Key words: space debris, Laplace method, SGP4, high area-to-mass ratio