

УДК 523.61: 004.9

## К ИССЛЕДОВАНИЮ ВОЗМОЖНОСТИ СБЛИЖЕНИЯ С ЗЕМЛЕЙ КОРОТКОПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМЕТ

*Куликова Н. В.<sup>1</sup>, Чепурова В. М.<sup>2</sup>, Петровская Е. Н.<sup>3</sup>*

ON STUDYING THE POSSIBLE APPROACH OF SHORT-PERIOD COMETS TO THE EARTH

Kulikova N. V., Chepurova V. M., Petrovskaya E. N.

The paper analyzes simulation results of the evolution development of orbital motion of short-period comets with the revolution period of 6-7 years. The calculated period is estimated from the date of the first observation of an object up to 2100. In this specific simulation of variation changes in the orbital elements under the action of the Earth's gravity are of particular importance in case of object approach.

Keywords: computer technology, the Earth's gravitational potential, space system orientation.

Одним из факторов, оказывающих влияние на движение малых небесных объектов в космическом пространстве, является гравитационное возмущение. Этот фактор имеет три компоненты: гравитационное возмущение в задаче N-тел [1]; возмущение от гравитационного потенциала большой планеты при сближении с нею малых тел [2, 3]; возмущение от гравитационного потенциала Земли, когда малое тело приближается к ней [4–6].

Для исследования образования и дальнейшего эволюционного развития метеороидных комплексов, возникающих при дезинтеграционных процессах на малых телах (в частности, на кометах), была разработана компьютерная технология [7]. Технология модульная, в её составе значительное количество модулей, осуществляющих как различные алгоритмы моделирования процесса эжекции вещества и определение параметров первоначальных орбит движения фрагментов выброса, так и модули, определяющие дальнейшее изменение орбит под влия-

нием ряда факторов. Одним из таких модулей является модуль учёта гравитационных возмущений. До настоящего времени расчетные алгоритмы и графическое изображение получаемых результатов позволяли проводить исследования с учётом только первых двух компонентов возмущающего фактора. Для дальнейшего приближения модели к реальности явления был применён математический алгоритм учёта третьей гравитационной составляющей, т.е. возмущения от гравитационного потенциала Земли. Расчёт осуществляется по аналитическим формулам промежуточной гиперболической орбиты, основанной на несимметричном варианте обобщённой задачи двух неподвижных центров, включающей возмущения от второй и третьей гармоник в разложении гравитационного потенциала центрального тела [8].

Поскольку моделируемый метеороидный комплекс первоначально имеет границы, определяемые максимальными и минимальными значениями отклонений элементов орбит выбрасываемых фрагментов от орбиты

<sup>1</sup>Куликова Нэлли Васильевна, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры компьютерных систем, сетей и технологий Института атомной энергетики «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»»; e-mail: kulikova@iate.obninsk.ru.

<sup>2</sup>Чепурова Валентина Михайловна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга Московского государственного университета; e-mail: chep@msu.sai.ru .

<sup>3</sup>Петровская Елена Николаевна, старший преподаватель кафедры компьютерных систем, сетей и технологий Института атомной энергетики «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»»; e-mail: pen@iate.obninsk.ru.

Таблица 1

Элементы орбиты	21P/Джакобини–Циннера	7P/Понса–Виннеке	26P/Григга–Шьеллерупа
Большая полуось $a$ (а.е.)	3,47025	3,14049	2,91590
Эксцентриситет ( $e$ )	0,73157	0,75421	0,69514
Период обращения $P$ (г)	6,40846	5,56539	4,97919
Долгота восх. узла $\Omega$ ( $^\circ$ )	198,13602	114,80001	216,58700
Аргумент $\omega$ ( $^\circ$ )	171,04573	161,99986	354,99003
Наклон $i$ ( $^\circ$ )	29,82949	10,99998	17,50578
Периг. расст. $q$ (а.е.)	0,931516	0,77190	0,88894
Дата появления $T$ (г.)	13.07.1900	20.07.1819	27.05.1922

родительского тела, то в процессе движения сама комета всегда остаётся внутри границ метеороидного комплекса. Поэтому влияние данного компонента фактора гравитационного возмущения мы рассмотрим анализируя результаты модельных расчётов эволюционного развития орбитального движения трёх короткопериодических комет с периодом обращения до 7 лет. Расчётный интервал определяется промежутком времени от даты первого наблюдения конкретного объекта до 2100 г. В качестве исследуемых объектов выбраны кометы 21P/Джакобини–Циннера (Giacobini-Zinner), 7P/Понса–Виннеке (Pons-Vinneke), 26P/Григга–Шьеллерупа (Grigg-Skjellerup). Выбор этих объектов определялся, прежде всего, имеющимися у каждой из них довольно обширным рядом наблюдений, что позволяет проводить сравнение результатов моделирования с аналогичными параметрами, полученными из наблюдений. В табл. 1 приведены значения орбитальных элементов комет, взятых в качестве исходных данных для моделирования [9]. Данные табл. 2 представляют даты прохождения перигелия окружёнными своими метеороидными комплексами кометами, полученные при моделировании с учётом (столбцы 1, 3, 5) и без учёта (столбцы 2, 4, 6) возмущений от гравитационного потенциала Земли при сближении с нею комет. Определённая часть полученных результатов представлена в данной работе.

### 1. Комета Джакобини–Циннера

Комета открыта в 1900 г. и на расчётном интервале до 2100 г. имеет 31 оборот по орбите. Вариации элементов орбиты, полученные с учётом и без учёта возмущения от гравитационного потенциала Земли при приближе-

нии к ней малого тела представлена на рис. 1. Из рис. 1 видно, что значение большой полуоси орбиты в период 1900–2100 гг. меняется скачкообразно, образуя три чётко выраженных волнообразных структуры, состоящих из 2-х оборотов увеличения значения  $a$  (а.е.), 5-ти оборотов, составляющих вершину «волны» и два оборота резкого уменьшения значения. Временные границы: 1913–1919 гг. (подъём), 1926–1953 гг. (вершина), 1959–1966 гг. (спуск); 1972–1979 гг. (подъём), 1985–2012 гг. (вершина), 2019–2025 гг. (спуск); 2032–2038 гг. (подъём), 2045–2071 гг. (вершина), 2078–2084 гг. (спуск).

30 и 31 оборот (2091–2097 гг.), по-видимому, образуют начало следующего скачка. Эта структура сохраняется для обоих вариантов расчёта, меняются лишь числовые значения, при этом в первом и третьем всплеске значения большой полуоси, полученные с учётом ( $\diamond$ ) возмущения от гравитационного потенциала Земли, несколько больше таковых, полученных без его учёта ( $\blacksquare$ ). Для второго всплеска ситуация меняется на противоположную, вариации большой полуоси без учёта превалируют над таковыми, вычисленными с учётом исследуемого компонента. Полученные значения большой полуоси без учёта:  $a_{max} = 3,5571$  а.е. в 1992 г. (15 оборот),  $a_{min} = 3,4653$  а.е. в 2025 г. (20 оборот); с учётом  $a_{max} = 3,5441$  а.е. в 1992 г. (15 оборот),  $a_{min} = 3,4772$  а.е. в 2078 г. (28 оборот). При этом  $\Delta a$  а.е. — разность значений больших полуосей, вычисленных в двух вариантах, равна  $\Delta a_{max} = 0,013939$  а.е. (16 оборот),  $\Delta a_{min} = 0,000689$  а.е. (23 оборот) или от 2,07691 млн км до 0,1027 млн км.

Тенденция изменения эксцентриситета аналогична и находится соответственно в противофазе изменению большой полуоси.

Таблица 2. Даты прохождения перигелия кометами

№ п/п	Григга–Шьеллерупа		Понса–Виннеке		Джакобини–Циннера	
	1	2	3	4	4	6
1	27.05.1922	27.05.1922	20.07.1819	20.07.1819	13.07.1900	13.07.1900
2	22.05.1927	21.05.1927	01.02.1825	07.02.1825	30.12.1906	30.12.1906
3	30.05.1932	22.05.1932	14.08.1830	24.08.1830	27.05.1913	31.05.1913
4	18.06.1937	31.05.1937	25.02.1836	06.03.1836	17.12.1919	18.12.1919
5	26.06.1942	29.05.1942	08.09.1841	17.09.1841	20.07.1926	18.07.1926
6	28.05.1947	21.04.1947	25.03.1847	01.04.1847	08.03.1933	01.03.1933
7	28.04.1952	11.03.1952	10.10.1852	14.10.1852	25.10.1939	15.10.1939
8	01.04.1957	30.01.1957	02.05.1858	05.05.1858	20.06.1946	31.05.1946
9	04.03.1962	25.12.1961	28.11.1863	30.11.1863	12.02.1953	13.01.1953
10	22.03.1967	09.01.1967	03.07.1869	03.07.1869	22.09.1959	14.08.1959
11	27.04.1972	26.02.1972	17.03.1875	14.03.1875	25.03.1966	17.02.1966
12	17.06.1977	06.04.1977	13.12.1880	04.12.1880	04.09.1972	01.08.1972
13	01.08.1982	13.05.1982	13.09.1886	05.09.1886	13.04.1979	19.03.1979
14	14.09.1987	18.06.1987	10.07.1892	01.07.1892	30.11.1985	14.11.1985
15	27.10.1992	25.07.1992	03.04.1898	20.03.1898	03.08.1992	26.07.1992
16	13.12.1997	04.09.1997	10.02.1904	20.01.1904	07.04.1999	08.04.1999
17	09.03.2003	05.12.2002	05.11.1909	08.10.1909	09.12.2005	18.12.2005
18	16.06.2008	29.03.2008	01.10.1915	30.08.1915	10.08.2012	27.08.2012
19	13.09.2013	12.07.2013	12.07.1921	08.06.1921	23.03.2019	12.04.2019
20	14.11.2018	07.10.2018	21.07.1927	16.06.1927	19.09.2025	27.09.2025
21	12.01.2024	31.12.2023	29.06.1933	18.05.1933	26.02.2032	01.03.2032
22	11.03.2029	24.03.2029	22.08.1939	25.06.1939	21.09.2038	16.09.2038
23	10.05.2034	18.06.2034	05.10.1945	14.07.1945	16.04.2045	12.04.2045
24	24.07.2039	14.09.2039	22.12.1951	12.09.1951	24.11.2051	20.11.2051
25	12.10.2044	17.12.2044	04.04.1958	08.12.1957	04.07.2058	29.06.2058
26	30.06.2049	15.06.2050	03.08.1964	28.03.1964	11.02.2065	05.02.2065
27	23.11.2054	26.01.2056	07.12.1970	24.07.1970	22.09.2071	14.09.2071
28	12.04.2060	13.08.2061	23.04.1977	01.12.1976	07.04.2078	06.04.2078
29	26.08.2065	16.01.2067	05.09.1983	08.04.1983	02.10.2084	03.10.2084
30	07.01.2071	12.06.2072	20.01.1990	20.08.1989	12.02.2091	07.03.2091
31	21.05.2076	03.11.2077	08.06.1996	01.01.1996	06.10.2097	18.10.2097
32	08.10.2081	25.03.2083	14.10.2002	14.05.2002		
33	01.03.2087	13.08.2088	16.02.2009	24.09.2008		
34	25.07.2092	04.01.2094	10.06.2015	27.01.2015		
35	25.02.2098	29.05.2099	03.09.2021	23.05.2021		
36			24.10.2027	21.08.2027		
37			02.10.2033	19.09.2033		
38			10.08.2039	25.08.2039		
39			18.04.2045	06.07.2045		
40			14.12.2050	20.04.2051		
41			18.07.2056	26.11.2056		
42			19.02.2062	24.06.2062		
43			20.09.2067	06.01.2068		
44			17.04.2073	16.07.2073		
45			12.11.2078	21.01.2079		
46			08.06.2084	29.07.2084		
47			30.12.2089	03.02.2090		
48			30.07.2095	16.08.2095		

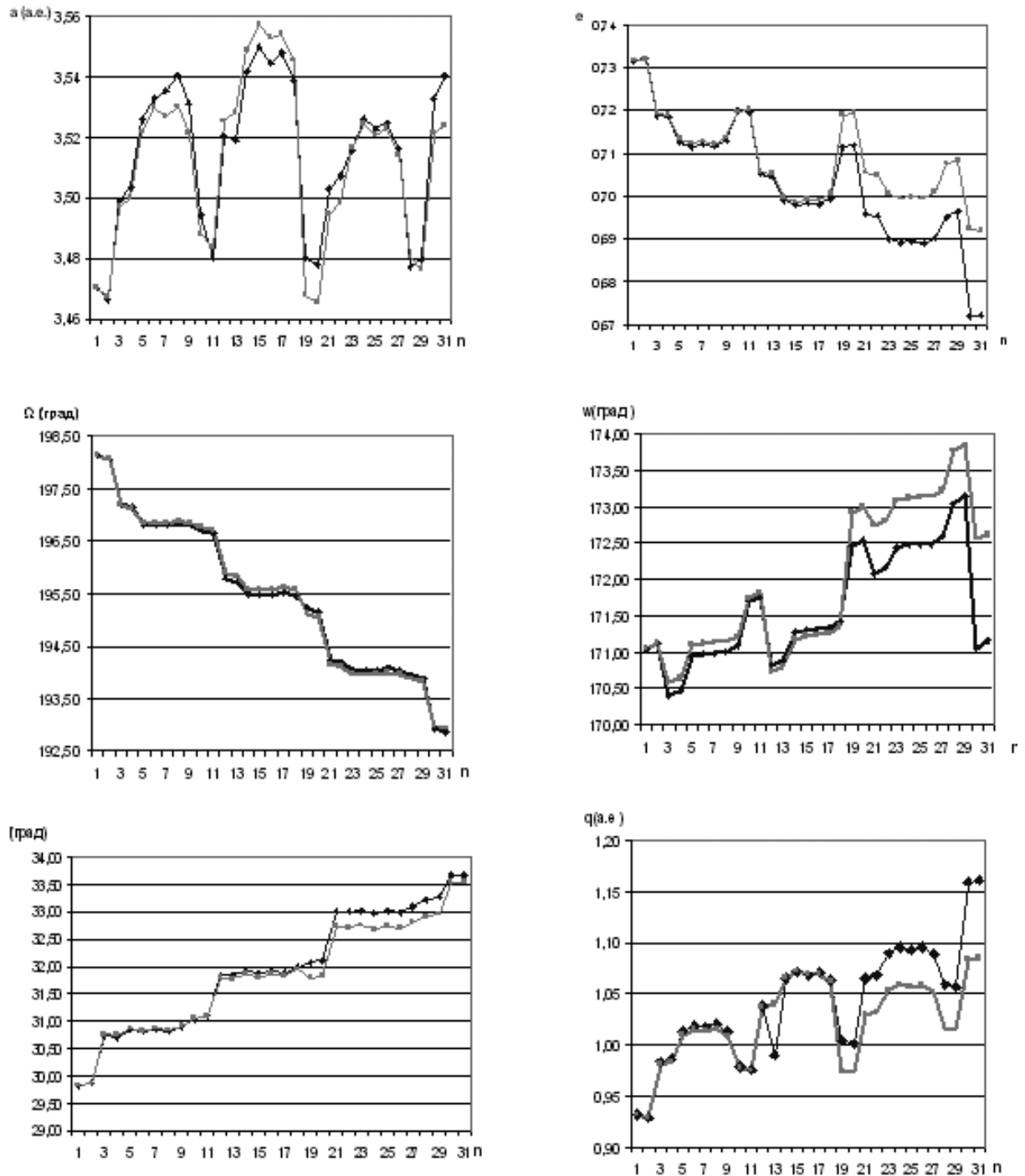


Рис. 1. Вариации элементов орбиты кометы Джакобини-Циннера с учётом ( $-\diamond-$ ) и без учёта ( $-\blacksquare-$ ) возмущения от гравитационного потенциала Земли при приближении к ней малого тела.  $n$  — номер оборота кометы: 1 — 13.07.1900 г., 31 — 06.10.2097 г.

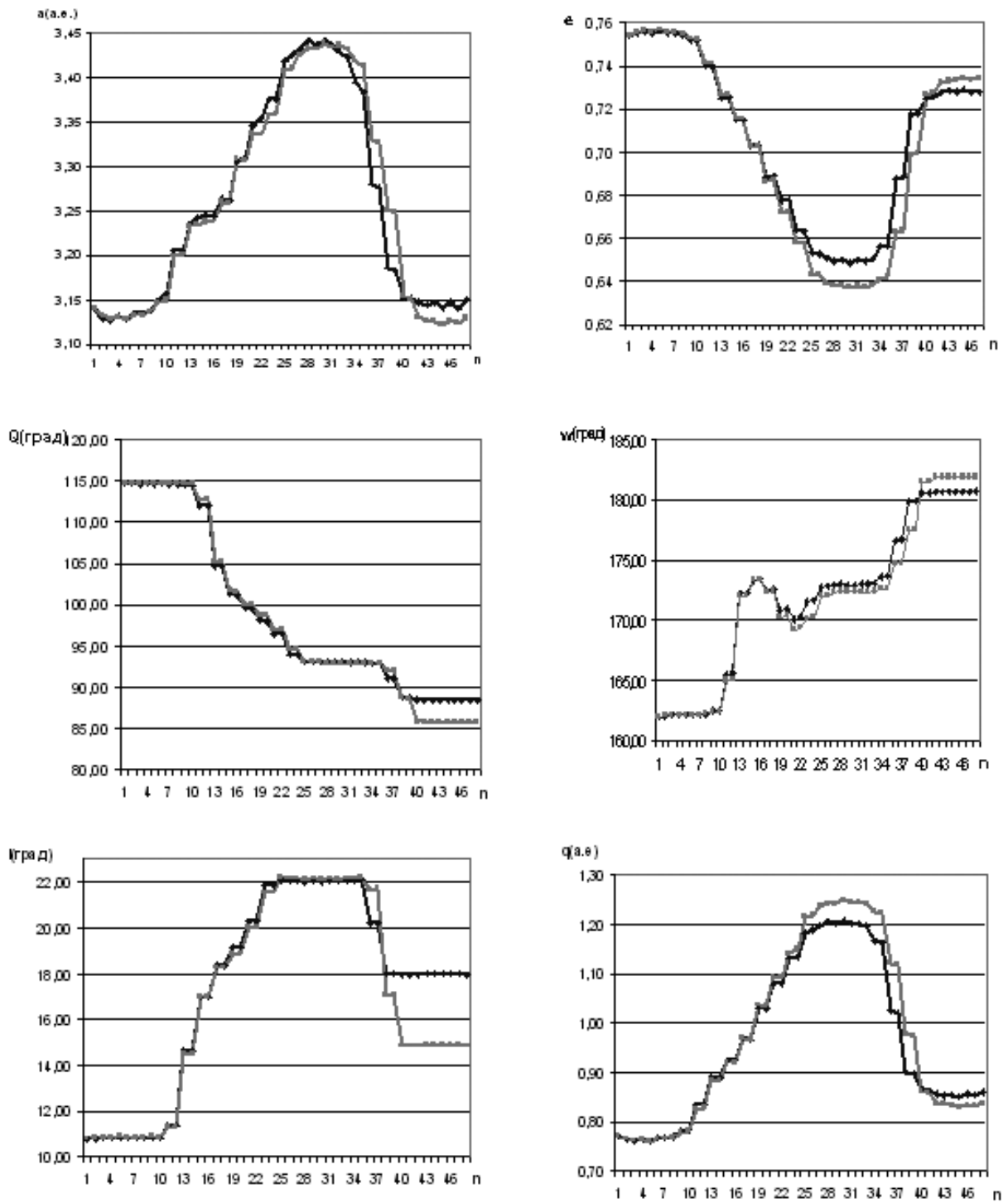


Рис. 2. Вариации элементов орбиты кометы Понса–Виннике с учётом ( $-\diamond-$ ) и без учёта ( $-\blacksquare-$ ) возмущения от гравитационного потенциала Земли при приближении к ней малого тела.  $n$  — номер оборота кометы: 1 — 20.07.1819 г., 48 — 30.07.2095 г.

На всём расчётном интервале учёт возмущения от гравитационного потенциала Земли влияет на уменьшение значения эксцентриситета орбиты кометы до 2019 г. незначительно, а далее до 2097 г. это влияние возрастает. Минимальное значение  $\Delta e$  получается в 1959 г. (10 оборот), а максимальное — в 2091 г. (30 оборот).  $\Delta e \in [0,000334, 0,020391]$ . Разница в датах прохождения кометой перигелия своей орбиты в различные годы от 1 дня (1919, 1999, 2078, 2084 гг.) до 38 дней (1959 г.). Относительно изменений угловых элементов  $\Omega$ ,  $\omega$ ,  $i$  из рис. 1 видно, что на всём интервале моделирования вариации значения долготы восходящего узла не превышают  $5^\circ$ , находясь в пределах  $193^\circ$ – $198^\circ$ , независимо от рассчитываемого варианта. Различия между значениями  $\Omega$ , рассчитанными по обоим вариантам, не превышают  $0,1^\circ$ , только с 2019 г. (19 оборот) меняется знак  $\Delta\Omega$ . До 2012 г. превалирует значение ( $-\blacksquare-$ ) над значениями ( $-\diamond-$ ), а с 2019 г. — наоборот. График, иллюстрирующий поведение наклона орбиты  $i$ , как бы зеркально отражает выше описанную ситуацию для  $\Omega$ , с той разницей, что кривые  $\Omega$  имеют тенденцию к уменьшению значений на интервале моделирования, а кривые наклона возрастают в пределах  $<4^\circ$ . До 2012 г. различия в значениях  $i$  с учётом возмущений от гравитационного потенциала Земли  $< 0,05^\circ$ , далее  $\Delta i$  скачком увеличивается до  $0,3^\circ$  (2025, 2032 гг.), сохраняя этот разрыв до 2084 г. (29 оборот). На графиках  $\Omega$  и  $i$  чётко проявляются участки довольно плавных умеренных изменений (7–9 оборот) и временные моменты значительных изменений.

На графиках  $\omega$ , как и на графиках  $\Omega$  и  $i$ , так же выделяются три периода изменений только более сложной конфигурации со всплесками в те же годы. Размах изменений значений аргумента перигелия ( $-\blacksquare-$ )  $\omega \in [170,8^\circ, 173,85^\circ]$  и  $\omega$  ( $-\diamond-$ )  $\in [170,40^\circ, 173,15^\circ]$ . При этом в 1900–1966 гг. (1–11 оборот) значения  $\omega$ , вычисленное без учёта возмущения от гравитационного потенциала Земли, больше, в период с 1972–2012 гг. (12–18 оборот) меньше, а в период 2019–2097 гг. вновь больше, чем значения, вычисленные с учётом этого фактора. До 2012 г. (18 оборот)  $\Delta\omega \in [0,03832^\circ, 0,17652^\circ]$ , далее до 2084 г.  $\Delta\omega \in [0,45077^\circ, 0,73359^\circ]$  и только в 2091 г.  $\Delta\omega$  резко возрастает почти до  $1,5^\circ$ .

## 2. Комета Понса–Виннеке

Поскольку эта комета была открыта в 1819 г., то временной промежуток её исследования оказался наибольшим из трёх вышеупомянутых объектов и составил 48 обращений по орбите. На рис. 2 приведены графики изменения элементов орбиты кометы с учётом и без учёта возмущения от гравитационного потенциала Земли, когда комета приближается к ней. Чётко выделяются временные интервалы, когда изменения значений исследуемых величин минимальные и настолько оказываются близкими, что на графиках фактически совпадают, необязательно в начальный период расчётов. Наибольшее расхождение в значениях величин получают на последнем этапе расчётного периода, начиная с 35-го обращения. Учёт гравитационного потенциала Земли привносит изменения для большой полуоси в интервале (0,004–0,027) а.е., для эксцентриситета — (0,0061–0,02042). Значения угловых элементов варьируются следующим образом: долгота восходящего узла  $\Omega$  испытывает незначительное влияние потенциала (не более  $0,5^\circ$ ), однако, начиная с 38-го оборота разрыв увеличивается, достигая  $2,6$  градуса. Для аргумента перигелия  $\omega$  аналогичная  $\omega$  аналогичная картина имеет место до 35-го оборота ( $\leq 0,5^\circ$ ), затем начинает увеличиваться и достигает значения  $0,877^\circ$  (35–40 оборот), увеличивая величину разрыва до  $1,2^\circ$  и сохраняя её до конца расчётного периода.

Значение величины наклона орбиты  $i$  изменяется минимально от  $0,0228^\circ$  до  $0,285^\circ$  (1–35 оборот), на 37-ом обороте увеличивается до  $1,464^\circ$  и далее до  $3,078^\circ$  на 40-м обороте, оставаясь в пределах последнего числа до конца расчётного периода.

На рис. 3 приведено расположение метеороидных комплексов кометы Понса–Виннеке по отношению к орбите Земли в проекции на плоскость эклиптики с момента открытия кометы в 1819 г. до 1983 г. В соответствии с данными табл. 2 удалённость комплекса достигает максимума на 30-м обороте (1989–1990 гг.), и затем комета начнёт снова приближаться к орбите Земли, в 2033 г. пересечёт её и вновь окажется внутри орбиты Земли. Если принять во внимание определённую активность вспышечной деятельности кометы, зафиксированную при прохождении в 2008 г., когда комета изменила яр-

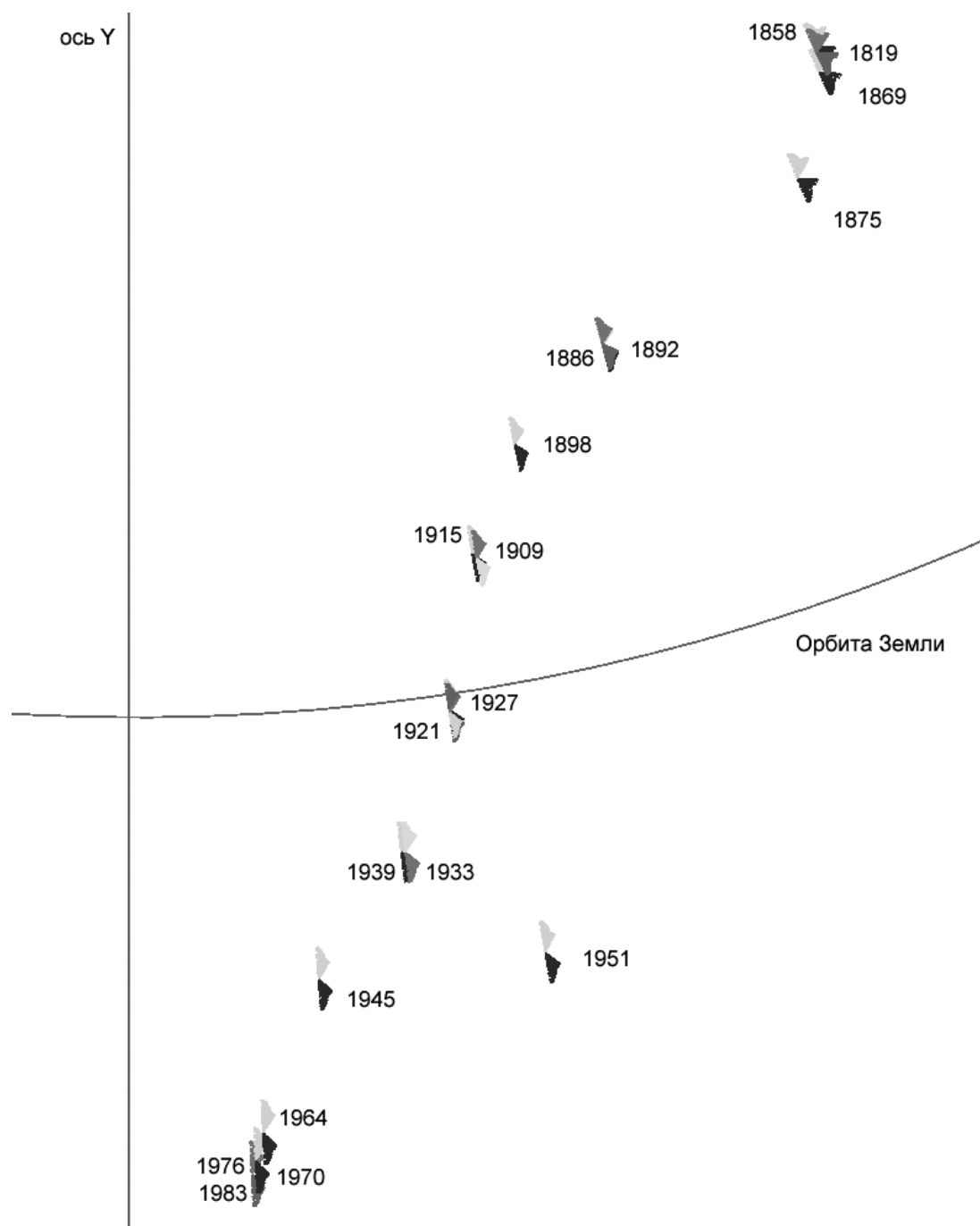


Рис. 3. Пространственное расположение метеороидного комплекса кометы Понса–Виннеке по отношению к орбите Земли в проекции на плоскость эклиптики в интервале 1819–1983 гг.

кость от 18,5 до 15,9 звёздной величины, то можно предположить, что в 2027 г. и 2033 г. метеороидная ситуация в окрестности орбиты Земли будет аналогичной 1921–1927 гг. и возможны метеорные дожди.

### 3. Комета Григга–Шьеллерупа

На расчётном интервале с момента появления кометы в 1922 г. до 2100 г. комета совершает 35 оборотов по эволюционно изменяющейся орбите. Вариации элементов орбиты, полученные в процессе исследования с учётом и без учёта возмущения от гравитационного потенциала Земли представлены на рис. 4. Изменение значения большой полуоси в пределах от минимального 2,8808 а.е. (1947 г., 6 оборот) до максимального 3,1578 а.е. (2050 г., 26 оборот) без учёта возмущения гравитационного потенциала Земли на протяжении всего расчётного периода имеет определённую структуру. В течение 5–8 оборотов происходит довольно плавное увеличение-уменьшение значения большой полуоси, затем скачкообразное увеличение, которое через 2 оборота сменяется таким же резким уменьшением. Учёт возмущения от гравитационного потенциала Земли не влияет на характер изменения этого параметра, но вносит свои коррективы в числовые значения. Так до 2002 г. (16 оборот)  $\Delta a$  (разность значения большой полуоси с учётом и без учёта возмущения от гравитационного потенциала Земли) находится в пределах от 0,00411 а.е. до 0,02021 а.е., что соответствует 0,6–3 млн км. Начиная с 2008 г. учёт гравитационного потенциала Земли уменьшает большую полуось и до конца расчётного периода (2100 г.) эта тенденция сохраняется. На этом временном интервале вариация большой полуоси находится в пределах  $\Delta a \in [0,02764, 0,00021]$  а.е. или  $0,4 \cdot 10^7 - 0,3 \cdot 10^5$  км. При этом максимального значения большая полуось достигает в 2061 г. (28 оборот) равное 3,0867 а.е., а минимального также в 1947 г. (6 оборот) — 2,8922 а.е. Изменение эксцентриситета  $\Delta e$  на первых 4-х оборотах сказывается в 4-м знаке после запятой, далее эта разность увеличивается. На следующих 4-х оборотах значения эксцентриситета, полученные с учётом возмущения от гравитационного потенциала Земли, превышают таковые, вычисленные без этого учёта. Начиная с 1961 г. (9 оборот) расхождение увеличи-

вается и последовательно нарастает к концу расчётного периода. Максимальное значение эксцентриситета (—■—) равно 0,704528, минимальное 0,577843, максимальное (—◇—) равно 0,706078, минимальное 0,660823.

Долгота восходящего узла  $\Omega$ , аргумент перигелия  $\omega$  и наклонение орбиты  $i$  имеют явный скачкообразный характер вариаций в обоих вариантах расчёта. Долгота восходящего угла на всём интервале исследования проявляет тенденцию к уменьшению своего значения, в то время как аргумент перигелия  $\omega$  и наклон  $i$  возрастают.

На рис. 4 видно, что после 1961 г. (9 оборот) возникает первое резкое изменение значений  $\Omega$ ,  $\omega$ ,  $i$  ( $\Omega$  — в сторону уменьшения,  $\omega$ ,  $i$  — в сторону увеличения). Для долготы восходящего угла первые заметные расхождения вследствие учёта возмущения от гравитационного потенциала Земли проявляются в 1997 г. (16 оборот)  $\Delta\Omega = 0,66981^\circ$  и плавно уменьшаются до  $0,44967^\circ$  (2044, 25 оборот). Изменение аргумента перигелия  $\omega$  в обоих вариантах расчёта незначительное  $\leq 0,145^\circ$  (9 оборот), в 2002 г. (17 оборот) происходит переход  $\omega$  из 4-й четверти в первую с разрывом от предыдущего значения на  $2,76^\circ$  (при учёте) и на  $2,75^\circ$  (без учёта) возмущения от гравитационного потенциала Земли. По временным интервалам изменения наклона орбиты кометы идентичны двум вышеописанным параметрам. Так же как для  $\Omega$  и  $\omega$  изменения в значениях  $i$  происходят в 1961 г. и 1997 г. (9 и 16 обороты). Значения  $i$  для обоих вариантов по 1961 г. находятся в пределах менее  $17,6^\circ$  далее увеличиваются и до 1997 г. (16 оборот) не превосходят  $21,55^\circ$ . С 2002 г. и по 2044 г. происходит новое увеличение значения, не превосходящее  $22,74^\circ$ . Результаты расчёта по второму варианту (с учётом) отмечают тождественность тенденции изменения  $i$ , уменьшая числовые значения этого параметра: до 1961 г.  $\Delta i^\circ \in [0,0036, 0,0257]$ , далее  $\Delta i^\circ \in [1,6466, 1,7001]$  до 1997 г., а с 2002 по 2044 гг.  $\Delta i^\circ \in [2,3951, 2,4615]$ .

Более детальный анализ и сравнение с аналогичными расчетами для комет с периодами обращений свыше 7-ми лет авторы предполагают осуществить при продолжении работы. Но хочется отметить, что основное изменение орбитальных элементов комет с ( $5 < P < 7$ ) проявляется в моменты резонанса планет Сатурна и Юпитера (2:5), т. е. временной интервал около 59 лет.



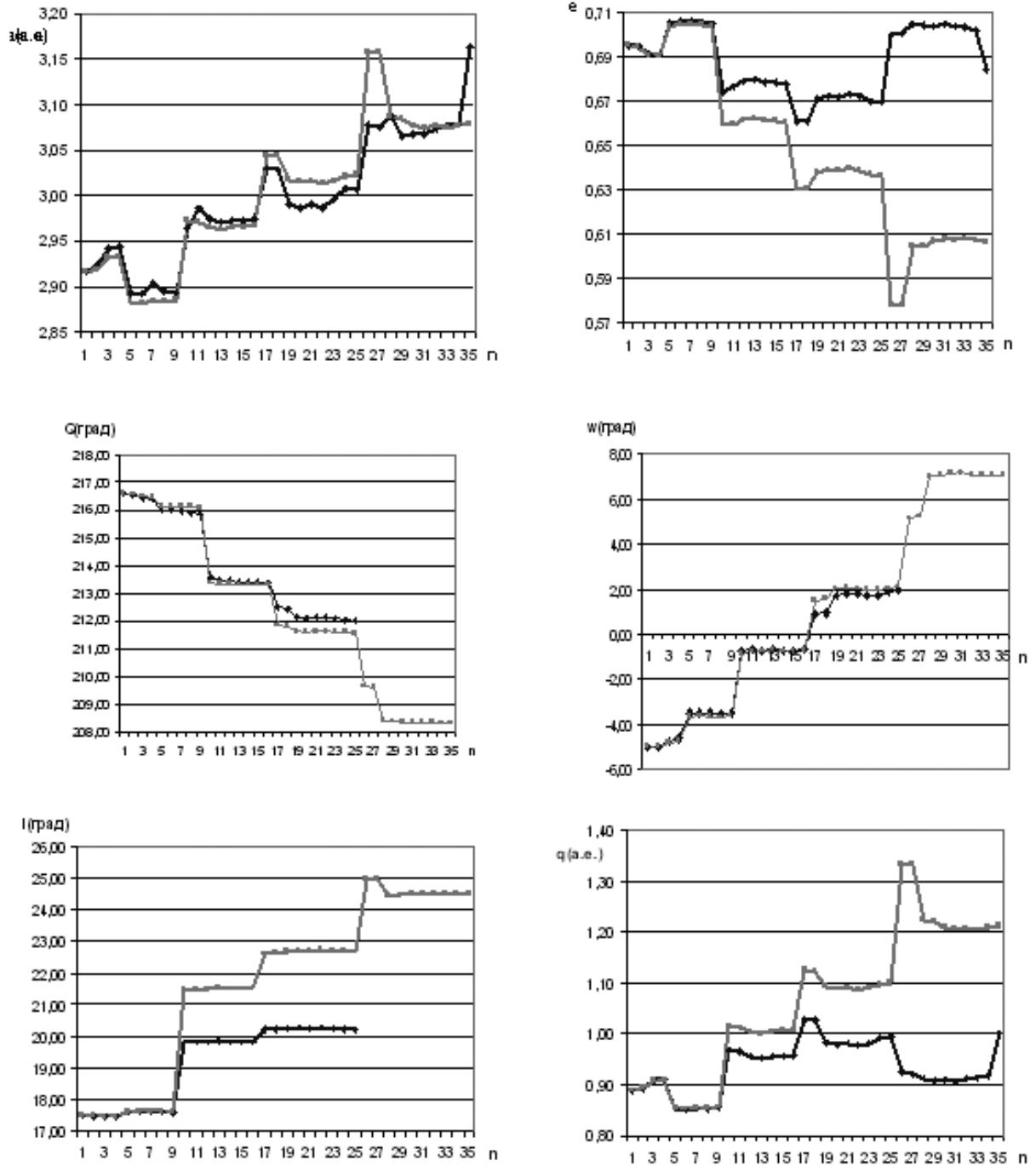


Рис. 4. Вариации элементов орбиты кометы Григга-Шьеллерупа с учётом ( $-\diamond-$ ) и без учёта ( $-\blacksquare-$ ) возмущения от гравитационного потенциала Земли при приближении к ней малого тела.  $n$  — номер оборота кометы: 1 — 27.05.1922 г., 35 — 25.02.2098 г.

Степень их сближения определяет числовые значения изменения элементов орбит. Это хорошо прослеживается для комет Джакобини–Циннера и Понса–Виннеке. Для кометы Григга–Шьеллерупа это менее очевидно, возможно из-за иной ориентации орбиты ( $\omega$ ). Даты тесных сближений для выбранных комет, полученные другими авторами [10], подтверждают наши результаты.

### Литература

1. *Everhart E.* Implicit single Methods for integrating Orbit // *Celest Mechanics and Dynamical Astronomy*. 1974. No. 10. P. 35.
2. *Аксенов Е. П.* Теория движения искусственных спутников Земли. М.: Наука, 1977. 364 с.
3. *Чепурова В. М.* О возмущенном гиперболическом движении комет в окрестности больших планет // *Бюллетень ИТА*. 1980. Т. 15. № 5. С. 288–293.
4. *Чепурова В. М.* Решение обобщенной задачи 2-х неподвижных центров в гиперболическом случае // *Бюллетень ИТА*. 1970. Т. 12. № 2. С. 216–233.
5. *Носков Б. Н.* Орбиты гиперболического типа в задаче 2-х неподвижных центров // *Сообщения ГАИШ МГУ*. 1970. № 159. С. 14–42.
6. *Kulikova N. V., Polyakov N. V., Chepurova V. M.* Gravitational perturbations in evolutionary development of comet Tempel–Tuttle meteoroid complex // *Радиотехника*. Харьков. 2010. Вып. 160. С. 82–90.
7. *Куликова Н. В., Тищенко В. И.* Возможности компьютерного моделирования орбитальной эволюции космических объектов малой массы // *Вестник РосНоу*. 2012. №4. С. 34–41.
8. *Чепурова В. М., Куликова Н. В.* Об учете гравитационных возмущений при компьютерном моделировании процесса образования метеороидных комплексов // *Вестник СибГАУ*. Красноярск. 2011. Вып. 6 (39). С. 83–86.
9. *Solar system dynamics*. California Institute of Technology. 21P/Джакобини–Циннера. <http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=Giacobini-Zinner;orb=0;cov=0;log=0;cad=0#elem>
10. *Заусаев А. Ф., Заусаев А. А.* Математическое моделирование орбитальной эволюции малых тел Солнечной системы // М.: Машиностроение, 2008. 250 с.

Ключевые слова: компьютерная технология, гравитационный потенциал Земли, пространственная ориентация системы.

Статья поступила 25 ноября 2013 г.

Институт атомной энергетики «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва  
Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета, г. Москва

© Куликова Н. В., Чепурова В. М., Петровская Е. Н., 2013