

Возможности зондирования вариаций плотности верхней атмосферы и сейсмоорбитальных эффектов с помощью малоразмерных космических аппаратов

А.В. Тертышников

*Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова,
ул. Ростокинская, д. 9, Москва 129128, Россия*

Поступила 08.04.2020

Принята к печати 18.09.2020

Миниатюрные космические аппараты обладают высоким баллистическим коэффициентом, что выгодно для разрешающей способности зондирования плотности верхней атмосферы. Цель данной работы – показать новые возможности «метода падающих сфер» на основе миниатюризации космических аппаратов. «Метод падающих сфер» используется для зондирования вариаций плотности верхней атмосферы.

Рассмотрено техническое решение для диагностики участков орбиты с аномальными изменениями скорости и ускорения движения космических аппаратов, оснащённых бортовыми навигационными приёмниками и микроакселерометрами.

Технический результат предложенной разработки – оперативность и рентабельность зондирования вариаций плотности верхней атмосферы, сейсмоорбитальных эффектов – вариаций плотности атмосферы над сейсмоопасными регионами и региональной сейсмической опасности.

Ключевые слова: космический аппарат, плотность, верхняя атмосфера, землетрясения, орбита.

DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-305-312

Адрес для переписки:

*А.В. Тертышников
Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова,
ул. Ростокинская, д. 9, Москва 129128, Россия
e-mail: atert@mail.ru*

Address for correspondence:

*A.V. Tertyshnikov
Institute of Applied Geophysics,
Rostokinskaya str., 9, Moscow 129128, Russia
e-mail: atert@mail.ru*

Для цитирования:

*А.В. Тертышников.
Возможности зондирования вариаций плотности верхней атмосферы
и сейсмоорбитальных эффектов с помощью малоразмерных
космических аппаратов.
Приборы и методы измерений.
2020. – Т. 11, № 4. – С. 305–312.
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-305-312*

For citation:

*A.V. Tertyshnikov.
[Capabilities for Probing of Upper Atmosphere Density Variations
and Seismic-Orbital Effects Using Small-Size Spacecraft].
Devices and Methods of Measurements.
2020, vol. 11, no. 4, pp. 305–312 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-305-312*

Capabilities for Probing of Upper Atmosphere Density Variations and Seismic-Orbital Effects Using Small-Size Spacecraft

A.V. Tertyshnikov

*Institute of Applied Geophysics,
Rostokinskaya str., 9, Moscow 129128, Russia*

Received 08.04.2020

Accepted for publication 18.09.2020

Abstract

The miniature spacecraft have a high ballistic coefficient, which is advantageous for the resolution of sensing the density of the upper atmosphere. The purpose of this work is to show new features of the "falling spheres method" based on the miniaturization of the Spacecraft. The "falling spheres method" is used to probe variations in the density of the upper atmosphere.

A technical solution for diagnostics of orbital sections with abnormal changes in the speed and acceleration of spacecraft equipped with onboard navigation receivers and micro-accelerometers is considered.

The technical result of the proposed development is the efficiency and cost – effectiveness of sounding variations in the density of the upper atmosphere, seismic-orbital effects-variations in the density of the atmosphere over earthquake-regions and the seismic hazard.

Keywords: the spacecraft, the density of the upper atmosphere, earthquakes, orbit.

DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-305-312

Адрес для переписки:

А.В. Тертышников
Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова,
ул. Ростокинская, д. 9, Москва 129128, Россия
e-mail: atert@mail.ru

Address for correspondence:

A.V. Tertyshnikov
Institute of Applied Geophysics,
Rostokinskaya str., 9, Moscow 129128, Russia
e-mail: atert@mail.ru

Для цитирования:

А.В. Тертышников.
Возможности зондирования вариаций плотности верхней атмосферы
и сейсмоорбитальных эффектов с помощью малоразмерных
космических аппаратов.
Приборы и методы измерений.
2020. – Т. 11, № 4. – С. 305–312.
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-305-312

For citation:

A.V. Tertyshnikov.
[Capabilities for Probing of Upper Atmosphere Density Variations
and Seismic-Orbital Effects Using Small-Size Spacecraft].
Devices and Methods of Measurements.
2020, vol. 11, no. 4, pp. 305–312 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-4-305-312

Введение

Оценки плотности верхней атмосферы используются при баллистическом обеспечении полёта космических аппаратов (КА) с учётом координат местоположения и на основе ГОСТ 25645.166-2004 «Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полётов искусственных спутников Земли». В нём определены соотношения для расчёта значений параметров плотности атмосферы Земли в диапазоне высот 120–1500 км для различных уровней солнечной активности при известных дате, времени и координатах точки пространства.

Эффекты повышенного торможения низкоорбитальных КА перед сильными землетрясениями были отмечены ещё в прошлом веке специалистами системы контроля космического пространства (СККП). Реальные оценки вариаций торможения и орбитального движения малых КА в ионосфере перед сильными землетрясениями (сейсмоорбитальные эффекты) были получены по результатам ретроспективных исследований в [1]. По данным с бортовых микроакселерометров на КА было выявлено ухудшение координатной привязки КА на границах сейсмоопасных районов с созревшими сильными землетрясениями¹. Появилась необходимость детализации данных орбитального торможения КА.

В [2] использованы результаты [1], где по данным регулярных наблюдений за характеристиками движения космических объектов наземными радиотехническими комплексами системы воздушно-космической обороны Северной Америки (NORAD) были выявлены особенности в торможении малого КА "Монитор-Э" перед сильными землетрясениями. Через 2–5 суток после аномально высоких оценок среднесуточного баллистического коэффициента k_b часто происходили сильные землетрясения суши с магнитудой $M > 6,5$. Для подводных землетрясений выявить статистически значимые эффекты на фоне естественных вариаций торможения не удалось.

¹ Тертышников А.В., Липеровская Е.В., Скрипачев В.О. Первые оценки возмущений плотности верхней атмосферы над сейсмоопасными регионами по данным бортового акселерометра на космическом аппарате. Материалы V международной конференции "Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений" 2–7 августа 2010 г. – Паратунка, 2010. – С. 394–397).

Использование спектрального анализа позволило выявить тонкие эффекты внутри естественных вариаций КА на орбите. В периодограммах среднесуточных данных об относительных вариациях баллистического коэффициента КА «Монитор-Э» выявлено проявление периода «сейсмического затишья».

Оценки по аномальным микроускорениям на орбите были получены с помощью микроакселерометра «Кактус» на французском КА «Кастор» (D-5A, выведен на орбиту 17.05.1975 г. с космодрома Куру для определения аэродинамического торможения, давления солнечных лучей, аномалий гравитационного поля Земли и столкновений с метеорными частицами). Запланированная высота орбиты в апогее 1268 км и перигее 272 км, масса – 76 кг, высота корпуса, имеющего 26 граней и максимальный поперечный размер – 0,8 м. Эксперименты с бортовым акселерометром были рассчитаны на шесть месяцев. Диапазон измерений ускорений 10^{-5} – 10^{-9} g, с точностью $5 \cdot 10^{-10}$ g. Тогда это был самый низкий порог измерений по сравнению с возможностями других трёхосных акселерометров. По архивным орбитальным бортовым измерениям на высоте перигея была установлена повышенная плотность верхней атмосферы над сейсмоопасным регионом за 4 суток до обобщённого по 20 случаям сильного тектонического землетрясения.

Физическое обоснование причин микроускорений КА на границах сейсмоопасных районов более соответствует представлениям о вариациях плотности верхней атмосферы, нежели вариациям гравитационного потенциала. В качестве потенциального аналога рассматривались даже вариации плотности ионосферной плазмы с достаточно резкими границами трубки нагрева, обнаруженные в экспериментах над нагревным стендом Сура по сигналам Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в [3].

Слежение за торможением КА проводится с помощью российских наземных средств СККП и их зарубежных аналогов. Измерения орбит космических объектов проводятся наземными радиотехническими и оптическими станциями слежения, расположенными по всему миру. Данные о наблюдаемых в околоземном космическом пространстве (ОКП) объектах объединяются в каталоги.

Ограничения на наблюдаемость объектов в ОКП, в том числе в «методе падающих сфер»,

используемом для исследования плотности верхней атмосферы, связаны с критическим размером космических объектов. Со второй половины прошлого века точность определения объектов в ОКП каждые десять лет улучшалась почти на порядок [4, 5]. Для радиолокационных станций (РЛС) метрового диапазона критический размер фиксируемых объектов оценивается в не менее 0,3–0,5 м. В дециметровом диапазоне вероятность обнаружения объекта размером в 0,1 м (типа наноКА) увеличивается в 2–3 раза [6]. При этом появились новые возможности для использования «метода падающих сфер» на основе миниатюризации КА. Показать некоторые из них – цель представленной статьи.

Технология расчёта вариаций плотности атмосферы по торможению низкоорбитальных космических аппаратов

Низкоорбитальные КА движутся по орбите в поле тяготения Земли. Основным фактором, определяющим эволюцию их орбиты и периода обращения, является атмосферное торможение и функционирование двигательной установки. Сила лунно-солнечных возмущений орбиты для КА дистанционного зондирования Земли пренебрежимо мала.

Выражение для расчёта силы аэродинамического сопротивления КА можно представить в виде [2]:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} = k_b \rho \mathbf{V}_{om}^2 ; \quad (1)$$

$$k_b = C_x S / 2m , \quad (2)$$

где m – масса КА; \mathbf{a} – вектор ускорения; k_b – баллистический коэффициент; C_x – безразмерный коэффициент аэродинамического сопротивления; S – характерная площадь КА; ρ – плотность атмосферы на высоте КА, вектор скорости которого относительно воздуха $\mathbf{V}_{om} = \mathbf{V} - \mathbf{W}$, где \mathbf{V} – вектор скорости КА в геоцентрической инерционной системе координат, \mathbf{W} – вектор скорости движения атмосферы (ветра).

В (1) не рассматривается центростремительная сила в поле тяжести Земли. Основные изменения скорости происходят вдоль основного направления движения КА.

Для пассивного участка полёта КА на основе разности расстояний (ΔL), пройденных КА между

измерениями i и $i+1$, учитывая время суток и параметры орбиты, рассчитываются отклонения плотности от модели ГОСТ 25645.166-2004:

$$\Delta \rho_i \approx 2(\Delta L_{Standard} - \Delta L_{real}) m / (\mathbf{V}_i 2k_b (t_{i+1}^2 - t_i^2)). \quad (3)$$

С помощью итерационных приближений и метода наименьших квадратов, достаточно подробно представленных в [7], полученные с помощью (3) оценки, позволяют рассчитать осреднённую оценку плотности на отдельных участках орбиты. Простейший вариант в данном случае – круговая орбита с нулевым эксцентриситетом.

С использованием модели плотности верхней атмосферы возможен расчёт реального баллистического коэффициента и его вариаций, что и производится в системах контроля ОКП. При этом значительные трудности возникают из-за изменения баллистического коэффициента за счёт нестабилизированного положения КА и вариаций площади поперечного сечения КА. Поэтому в традиционных расчётах торможения КА часто используются оценки высоты орбиты на значительных временных отрезках, продолжительностью не менее периода вращения КА на орбите [8–10].

Технические решения для диагностики сейсмоорбитальных эффектов

В [2] для обнаружения сейсмоорбитальных эффектов предложено зондирование движения низкоорбитальных КА в ОКП наземными радиотехническими и лазерными средствами. Это основа для расчёта коэффициента баллистического торможения k_b КА и определения моментов аномального торможения КА. Так как сейсмогенные эффекты малы и теряются на фоне естественных вариаций, то далее используется спектральный анализ вариаций торможения типизированных оценок k_b . По мощности «сигнальных» периодов уточняются временные отрезки с повышенной опасностью сильных коровых землетрясений суши. Это решение ориентировано на доступные ресурсы СККП и наблюдения за КА.

Проектный k_b рассчитывается на основе конструктивных характеристик КА. После вывода КА на орбиту баллистический коэффициент рассчитывается по данным реальных наблюдений за движением КА [1, 2, 11] и предоставляется вместе с характеристиками движения и

торможения КА в универсальном формате *TLE* («Two Line Elements» – двухрядных американских *TLE*-элементов). Эти данные используются при информационно-баллистическом обеспечении процесса функционирования российских КА, международном сотрудничестве при освоении космического пространства и контроле космических объектов. Однако данные расчётов *TLE* доступны со значительной временной задержкой не менее суток, что снижает оперативность и заблаговременность диагностики сейсмоорбитальных эффектов. К тому же, наблюдения КА средствами СККП оказываются нерегулярными (от пропуска до нескольких раз в сутки) из-за редкой сети наземных радиотехнических комплексов.

Кроме того, возможности технических средств СККП по разрешающей способности объектов в ОКП ограничивают наблюдаемые размеры космических объектов, используемых при зондировании плотности верхней атмосферы по радиотехническим наблюдениям за их торможением. НаноКА или КА меньшего размера (далее миниатюрные КА) оказываются на грани обнаружения для СККП. Соответственно, для миниатюрных КА требуются решения для диагностики сейсмоорбитальных эффектов, которые могут быть применимы и для более крупных КА.

В качестве одного из очевидных решений может быть использование бортовой навигационной аппаратуры миниатюрных КА, что не предусмотрено в известных способах зондирования плотности верхней атмосферы [2, 7–10], где основные ограничения обусловлены точностью методов зондирования объектов в ОКП по минимальным размерам космических объектов и оперативностью получения результатов зондирования.

Использование навигационного оборудования на миниатюрных КА соответствует общей тенденции в развитии современной микроэлектроники. При этом, уменьшение массы современных миниатюрных КА, несмотря на уменьшение размеров КА, приводит к росту баллистического коэффициента, который характеризует торможение КА. С ростом массы КА уменьшается чувствительность торможения к вариациям плотности атмосферы. Для лёгкого кубика или сферы, типа наноКА и менее, аэродинамические ускорения оказываются на два порядка больше, по сравнению с аналогичной формой, размер которой

на порядок больше, при одинаковой величине запаса статической устойчивости. При уменьшении размеров КА и одинаковой плотности космических объектов их k_b будет обратно пропорционален кубу грани или радиуса, а площадь модуля пропорциональна квадрату этих размеров. Подтверждением этого являются оценки в [12] потерь высоты для трёх КА, запущенных практически одновременно 28.04.2016 г. с космодрома Восточный на околоземную орбиту (рисунок 1).

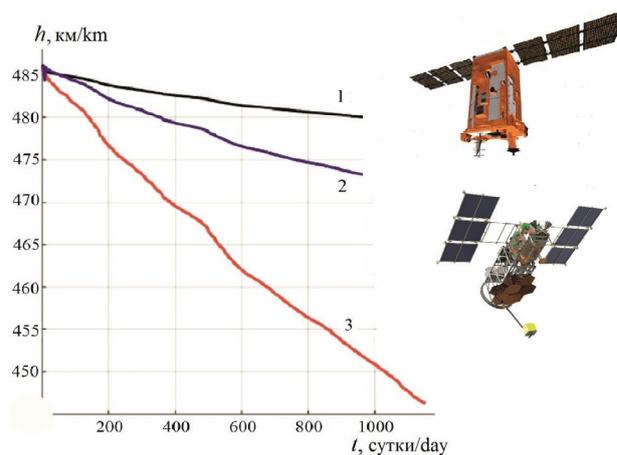


Рисунок 1 – Изменение высоты орбиты космических аппаратов: 1 – «Ломоносов»; 2 – «Аист-2Д»; 3 – лёгкий наноспутник [12]

Figure 1 – The height of the spacecraft orbit: 1 – "Lomonosov"; 2 – "AIST-2D"; 3 – light nanosatellite [12]

Быстрее всего высоту терял лёгкий наноКА *SamSat-218D* с массой менее 9 кг. Он имел форму параллелепипеда. Масса КА «Ломоносов» (*MVL-300*) превышала его массу более чем в 70 раз (примерно 645 кг, в том числе научной аппаратуры 160–170 кг). Малый спутник дистанционного зондирования Земли «Аист-2Д» имел массу около 531 кг, в том числе научной аппаратуры около 250 кг.

Запуск указанных КА был произведён на спадающей ветви солнечной активности с низкими уровнями солнечного радиоизлучения.

Миниатюрные многочастотные бортовые навигационные приёмники позволяют повысить оперативность определения характеристик орбиты на основе прямых измерений высоты и скорости КА. Приёмовычислители современных бортовых навигационных приёмников КА достигли точности оперативного определения характеристик орбиты КА, превосходящей возможности бортовых звёздных датчиков, наземных радиотехнических и оптических средств, используемых

в наблюдениях за орбитальными характеристиками движения космических аппаратов. Это обусловлено реализацией функции многочастотных измерений, функционированием системы дифференциальной коррекции и мониторинга целостности группировки навигационных КА ГНСС. Точность мгновенного определения координат для спутникового навигационного приёмника наноКА *SamSat* (Самара), предназначенного для отработки алгоритмов управления ориентацией наноспутников, заявлена не хуже 10 м и 2–5 м/с по скорости [12], что соответствует возможностям наземных РЛС СККП и минимуму суточных потерь высоты орбиты малых низкоорбитальных КА, использованных в расчётах [1, 2]. Но изготовление бортового навигационного приёмника КА с указанными возможностями всё ещё остаётся проблемой. Использование бортового радиомаркера для вычисления орбиты миниатюрного КА не может быть альтернативой бортовому навигационному приёмнику, который может решать и задачу выдачи меток времени.

Ещё одна возможность технических решений для диагностики торможения КА связана с микроакселерометрами, которые разработаны и для миниатюрных КА. Их разрешающая способность существенно выше, чем для ускорений, рассчитанных на основе бортовых навигационных приёмников сигналов ГНСС (*GPS/ГЛОНАСС/Beidou* и др.).

Способ зондирования сейсмоорбитальных эффектов

Возможная схема зондирования вариаций орбиты КА с использованием бортового навигационного оборудования представлена на рисунке 2.

Возмущения в атмосфере, возникающие при эволюции сейсмотектонической аномалии, за счёт акустико-гравитационных волн и сейсмоэлектромагнитных эффектов проявляются в виде сейсмоорбитальных эффектов КА. При этом для оперативной диагностики сейсмоорбитальных эффектов предлагается использовать приёмовычислитель бортового (на КА) навигационного приёмника сигналов ГНСС, позволяющего с высокой точностью получать координаты, скорость движения и ускорения КА на орбите. Выявление аномальных зон в оценках торможения КА используется для диагностики сейсмоорбитальных эффектов, используемых при прогнозировании потенциальных сильных землетрясений

суши. Результаты измерений микроускорений КА бортовыми микроакселерометрами может повысить качество диагностики сейсмоорбитальных эффектов и плотности верхней атмосферы.

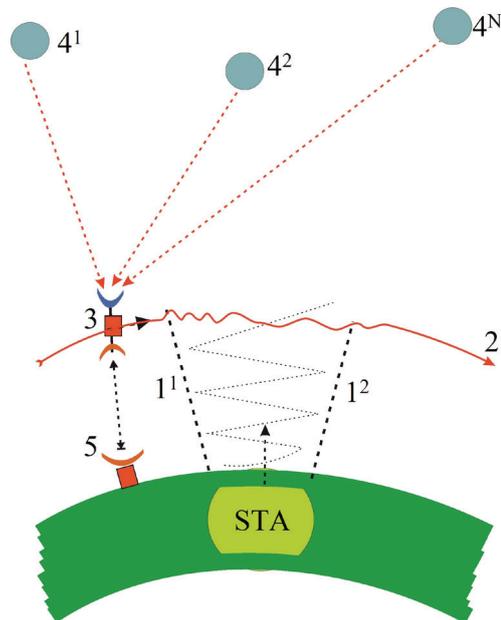


Рисунок 2 – Схематическое представление вариаций орбиты космического аппарата над сейсмотектонической аномалией в земной коре: 1^1 и 1^2 – границы проявления в атмосфере сейсмотектонической аномалии; 2 – орбита; 3 – космический аппарат с бортовой навигационной аппаратурой; 4 – космический аппарат Глобальной навигационной спутниковой системы; 5 – наземный пункт приема, обработки и хранения информации

Figure 2 – Scheme of variations in the orbit of a spacecraft over a seismotectonic anomaly in the earth's crust: 1^1 and 1^2 – boundaries of manifestation in the atmosphere of a seismotectonic anomaly; 2 – orbit; 3 – spacecraft with onboard navigation equipment; 4 – spacecraft of the Global navigation satellite system; 5 – ground point for receiving, processing and storing information

С помощью бортового навигационного приёмника определяются текущее псевдопозиционирование и вектор псевдоскорости движения КА. Эти характеристики используются для диагностики аномальных ускорений КА на орбите, причём для кубической или сферической формы миниатюрных КА без расчётов баллистического коэффициента, в отличие от схемы [2]. В случае сложной формы миниатюрных КА и при использовании их двигательной установки расчёты аномальных ускорений должны проводиться на продолжительных временных интервалах.

Для траекторных измерений движения не менее одного низкоорбитального КА (3 на рисунке 2) на атмосферном участке пассивного полёта (линия 2 на рисунке 2) по сигналам КА ГНСС (4 на рисунке 2) предлагается рассчитывать с помощью бортовых приёмовычислителей в каждом такте измерений псевдокоординаты КА над земным эллипсоидом, вектор относительной псевдоскорости движения, в том числе в сравнении с предыдущими тактами измерений, вектор псевдоускорения КА.

При обработке полученных результатов измерений:

- диагностируются аномалии полученных рядов измерений с помощью метода контрольных карт и спектрального анализа;

- анализируется эволюция выявленных морфологических аномалий анализируемых характеристик на соответствие установленным закономерностям проявления сейсмоорбитальных эффектов и их климатическим особенностям;

- уточняется положение сейсмоопасных регионов;

- уточняются климатические карты анализируемых характеристик;

- рассчитываются вариации плотности между тактами измерений или на участках орбиты КА;

- рассчитывается оценка плотности атмосферы на отдельных участках орбиты КА;

- полученные результаты передаются в центр приёма, обработки и хранения информации (5 на рисунке 2).

Для валидации и верификации в 5 на рисунке 2 может использоваться сравнение с данными моделирования орбит и данными, полученными с КА, которые могут контролироваться средствами СККП на основе РЛС контроля космического пространства, станций лазерной дальнометрии и др., для которых по среднесуточным данным о вариациях орбиты КА [3] можно заблаговременно оценить уровень опасности сильных коровых землетрясений в течение последующих нескольких (обычно 2–3) суток. По внутрисуточным вариациям уточняется эволюция сейсмоорбитальных эффектов. При достаточно высокой частоте зондирования можно диагностировать границы сейсмоопасных районов, определять их геометрические центры.

Рентабельность зондирования сейсмоорбитальных эффектов и плотности верхней атмосферы с помощью миниатюрных КА обеспечивается их дешевизной (<http://spaceresearch.ssau.ru/ru/subsystems>, <https://db.satnogs.org/>), оперативно-

стью получения данных о вариациях торможения на орбите.

Заключение

Миниатюризация космических аппаратов и современная микроэлектроника позволяют повысить рентабельность использования «метода падающих сфер» для зондирования вариаций плотности верхней атмосферы. За счёт уменьшения массы современных миниатюрных космических аппаратов увеличивается рассчитываемый баллистический коэффициент, используемый при оценивании торможения космического аппарата, что повышает возможность детализации морфологии плотности атмосферы. Тяжёлые аппараты слабо реагируют на возмущения плотности верхней атмосферы.

Использование навигационного оборудования на миниатюрных космических аппаратах и микроакселерометров позволит повысить оперативность расчётов плотности верхней атмосферы и сейсмоорбитальных эффектов.

Благодарности

Автор благодарит профессора И.В. Белоконова за полезные дискуссии.

Список использованных источников

1. Тертышников А.В. Вариации торможения космического аппарата «Монитор-Э» перед сильными землетрясениями 2005–2006 гг. / А.В. Тертышников // Исследование Земли из космоса. – 2007. – № 4. – С. 88–91.

2. Тертышников А.В. Способ зондирования сейсмоорбитальных эффектов и вариаций плотности верхней атмосферы. Патент на изобретение. Заявка: 2019112175 от 22.04.2019. Опубликовано: 05.11.2019. Бюл. № 31.

3. Скрипачев В.О. Эксперименты по диагностике плазменных возмущений в трубке магнитного силового поля Земли по сигналам навигационных космических аппаратов / В.О. Скрипачев, В.О. Большаков, А.В. Тертышников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7. – № 3. – С. 110–114.

4. Иванов Н.М. Баллистика и навигация космических аппаратов / Н.М. Иванов, Л.Н. Лысенко. – М.: Дрофа, 2004. – 544 с.

5. Кузьмин А.А. Информационные возможности отечественной службы контроля космического пространства по наблюдению космического

мусора. / Проблемы загрязнения космоса (космический мусор). Сборник научных трудов. – М.: Космоинформ, 1993.

6. Курикша А.А. Наблюдения сверхмалых КА и фрагментов космического мусора – новая задача контроля космоса / А.А. Курикша, В.Ф. Фатеев // Воздушно-космическая оборона. – 2006. – № 6.

7. Назаренко А.И., Клименко А.Г. Способ определения и прогнозирования движения космического аппарата на низких орбитах, подверженного влиянию торможения в атмосфере / Заявка: 2011112179/11 от 30.03.2011. Опубликовано: 10.10.2012. Бюл. № 28.

8. Беляев М.Ю., Рулев Д.Н., Алямовский С.Н. Способ определения плотности атмосферы на высоте полёта космического аппарата / Заявка: 2016150068 от 19.12.2016. Дата публикации заявки: 20.06.2018. Бюл. № 17. Опубликовано: 25.07.2018. Бюл. № 21.

9. Беляев М.Ю. Способ зондирования верхней атмосферы / Заявка: 2016148759 от 12.12.2016. Опубликовано: 29.05.2018. Бюл. № 16.

10. Пономарев В.А., Воропаев А.П., Подрезов В.А. Способ определения изменения давления атмосферы с изменением высоты / Заявка: 2016122197 от 06.06.2016. Дата публикации заявки: 11.12.2017. Бюл. № 35. Опубликовано: 05.02.2018. Бюл. № 4.

11. Vallado D.A. Fundamentals of Astrodynamics and Applications. Published jointly by Microcosm Press and Kluwer Academic Publishers. – 2004.

12. Белоконов И.В., Тимбай И.А., Николаев П.Н. Методика восстановления неконтролируемого углового движения наноспутников по торможению в атмосфере / Третий Российский симпозиум по наноспутникам с международным участием. 26–28 июня 2019 года. – Самара, Россия. <http://volgaspace.ru/RusNanoSat-2019/> Самара, RusNanoSat-2019.

Acknowledgments

The author thanks Professor I. V. Belokonov for useful discussions.

References

1. Tertyshnikov A.V. [Variations in the deceleration of the Monitor-E spacecraft before strong earthquakes in 2005–2006]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Research of the Earth from space], 2007, no. 4, pp. 88–91 (in Russian).
2. Tertyshnikov A.V. *Sposob zondirovaniya seismoorbitalnykh effektov i variatsiy plotnosti verkhney atmosfery* [Method for sounding seismoorbital effects and

variations in the density of the upper atmosphere]. Patent RF, no. 2019112175, 2019.

3. Skripachev V.O., Bolshakov V.O., Tertyshnikov A.V. [Experiments on diagnostics of plasma perturbations in the earth's magnetic force field tube based on navigation spacecraft signals]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2010, vol. 7, no. 3, pp. 110–114 (in Russian).

4. Ivanov N.M., Lysenko L.N. *Ballistika i navigatsiya kosmicheskikh apparatov* [Ballistics and navigation of space vehicles]. Moscow, Drofa Publ., 2004, 544 p.

5. Kuzmin A.A. [Information capabilities of the national space control service for the observation of space debris]. *Problemy kosmicheskogo musura* [Problems of space pollution (space debris)]. Moscow, Cosmoinform Publ., 1993.

6. Kuriksha A.A., Fateev V.F. [Observations of ultra-small SPACECRAFT and fragments of space debris – a new task of space monitoring]. *Vozdushno-kosmicheskaya oborona* [Aerospace and defense], 2006, no. 6 (in Russian).

7. Nazarenko A.I., Klimenko A.G. *Sposob opredeleniya i prognozirovaniya dvizheniya kosmicheskogo apparata na nizkikh orbitach, podverzennogo vliyaniyu tormozheniya v atmosfere* [Method for determining and predicting the movement of a spacecraft in low orbits that is affected by atmospheric deceleration]. Patent RF, no. 2011112179/11, 2011.

8. Belyaev M.Yu., Rulev D.N., Alyamovsky S.N. *Sposob opredeleniya plotnosti atmosfery na vysote poleta kosmicheskogo apparata* [Method for determining the density of the atmosphere at the altitude of the flight of a spacecraft]. Patent RF, no. 2016150068, 2016.

9. Belyaev M.Yu. *Sposob zondirovaniya verkhny atmosfery* [Method of sounding the upper atmosphere]. Patent RF, no. 2016148759, 2016.

10. Ponomarev V.A., Voropaev A.P., Podrezov V.A. *Sposob opredeleniya izmeneniya davleniya atmosfery s izmeneniem vysoty* [Method for determining changes in atmospheric pressure with changes in altitude]. Patent RF, no. 2016122197, 2016.

11. Vallado D.A. Fundamentals of Astrodynamics and Applications. Published jointly by Microcosm Press and Kluwer Academic Publishers, 2004.

12. Belokonov I.V., Timbay I.A., Nikolaev P.N. [Methods for restoring uncontrolled angular motion of nanosatellites by deceleration in the atmosphere]. *3 Rossiyskiy simpozium po nanosputnikam* [Third Russian Symposium on nanosatellites with international participation], 2019, Samara, Russia (in Russian).