

Анализ состояния и перспектив по созданию электронного каталога объектов околоземного космического пространства

С.С. Груздев, И.Г. Журкин, П.Ю. Орлов, А.В. Панкин

*Московский государственный университет геодезии и картографии
Москва, 105064, Россия
E-mail: knightrider3e0@gmail.com*

Многие десятилетия человечество полагало, что освоение космоса не несёт в себе угрозы загрязнения околоземной среды. К настоящему моменту на орбите находится несколько сотен тысяч антропогенных объектов, менее полутора тысяч из которых – активные спутники, а оставшееся количество – космический мусор. При этом лишь 5–10% от общего числа космических объектов наблюдаемы с Земли. Специалистам, которые сталкиваются с необходимостью принимать решения, демонстрировать ситуацию на околоземных орбитах, работать с формой объекта, выполнять научные исследования, зачастую не хватает инструментов, с помощью которых можно было бы выполнить надлежащим образом данную работу. Кроме того, на сегодняшний день космический мусор и космические аппараты не рассматриваются как объекты геоинформационного моделирования. В работе представлены результаты научных исследований в области мониторинга околоземного пространства и выбраны пути их развития, в том числе с применением ГИС-технологий, что позволит повысить эффективность контроля состояния околоземного космического пространства и улучшить восприятие разнородной пространственной информации за счёт применения современной трёхмерной визуализации. Проведён краткий анализ баз данных космических объектов и web-сервисов, известных из открытой печати и опубликованных в сети Интернет. Даны рекомендации по облику перспективного отечественного программного комплекса для оказания услуг в области мониторинга околоземного космического пространства.

Ключевые слова: околоземное космическое пространство (ОКП), космический мусор (КМ), космический объект (КО), мониторинг ОКП, ГИС web-сервис, двухстрочный набор элементов (TLE), Google Earth API, CesiumJS

*Одобрена к печати: 05.10.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-51-59*

В настоящее время из-за неопределённости государственной политики космических держав, а в ряде случаев отсутствия требуемых международных правовых норм по исследованию и освоению космического пространства, происходит существенное техногенное загрязнение околоземного космического пространства (ОКП) (Агапов и др., 2014). Так, количество каталогизированных космических объектов (КО) уже превышает 17000, а количество ненаблюдаемых с Земли объектов (< 10 см), по некоторым оценкам, превышает 200000 (Коммерческий Центр Управления Полётами: <https://comsproc.com/>). На орбите все чаще происходят столкновения космических аппаратов с объектами космического мусора (КМ), т.е. с искусственными объектами, находящимися в ОКП и не функционирующими по прямому назначению. Первым подобным инцидентом стало столкновение отечественного спутника связи «Космос-2251» (на тот момент уже неактивного) и КА «Иридиум-33», использовавшегося для обеспечения спутниковой связи (Kelso, 2009).

Кроме того, космический мусор принципиально изменяет околоземную среду, приводит к нарушению её первозданной чистоты. Астрономы уже заметили, что при выполнении астрономических наблюдений, особенно с длительными экспозициями, мелкие фракции космического мусора снижают прозрачность космического пространства. Баланс свето- и теплообмена нашей планеты с внешней средой также меняется в силу неуклонного роста засорённости околоземного пространства (Вениаминов, Червонов, 2012).

Таким образом, возникает необходимость постоянного слежения за состоянием ОКП. Эта проблема, как и реализация любого мониторинга средствами дистанционного зондирования Земли, разбивается на три основные составляющие:

- Обеспечение техническими средствами наблюдения, в данном случае средствами наблюдения за ОКП.
- Наличие систем приёма и обработки результатов наблюдения, вплоть до получения подробных изображений околоземного космического пространства в видимом диапазоне спектра и в фиксированной системе координат.
- Интерпретация и распространение данных проведённого анализа состояния ОКП.

Так как наибольшие финансовые затраты, как правило, связаны с созданием и эксплуатированием технических средств наблюдения, то на данный момент в этом качестве для мониторинга околоземного космического пространства не используются специально разработанные для этой цели системы, но приспособляются системы, основное назначение которых связано с наземным слежением за запусками космических аппаратов. Поэтому особое место уделяется системам моделирования космических объектов и явлений в ОКП на основе существующих средств наблюдения, а также разработке приложений для оказания в дальнейшем соответствующих услуг, таких как планирование размещения новых станций слежения (оптических и радиолокационных), оценка риска столкновения с объектами околоземного космического пространства, оценка возможности развертывания группировки спутников на заданных орбитах, расчет времени проведения съёмки участка земной поверхности спутником ДЗЗ с заданными параметрами съёмочной аппаратуры и другими задачами космической навигации и дистанционного зондирования.

В МИИГАиК ведется цикл работ по созданию геопортала и каталогизации объектов ОКП. Так, были проработаны вопросы создания системы, синтезирующей трёхмерные модели космических объектов на основе двумерных изображений целевого объекта, входящей в состав комплекса программно-аппаратных средств для слежения за объектами космического пространства (Журкин, Груздев, 2012). С этой целью была развёрнута сеть распределённых вычислений на базе VOINC (Груздев, Панкин, 2013), которая предназначалась для геомоделирования, организации геопорталов, а также расчётов движения космических объектов в ОКП на основании данных двухстрочных наборов элементов (TLE) (Груздев, 2013). Кроме того, на основании проведённого анализа и сформированных требований был создан прототип программного продукта (*рис. 1*), позволяющий визуализировать данные, характеризующие положение космических объектов, взятых из открытых источников, а также выводить на экран трёхмерные изображения КО (Груздев, Орлов, 2015).

В связи с прекращением поддержки Google Earth API потребовалось переориентировать проект на новую программную платформу (Орлов, Панкин, 2015). За основу была взята библиотека CesiumJS, имеющая ряд следующих преимуществ по сравнению с интерфейсом программирования приложений (API) от компании Google: возможность рабо-

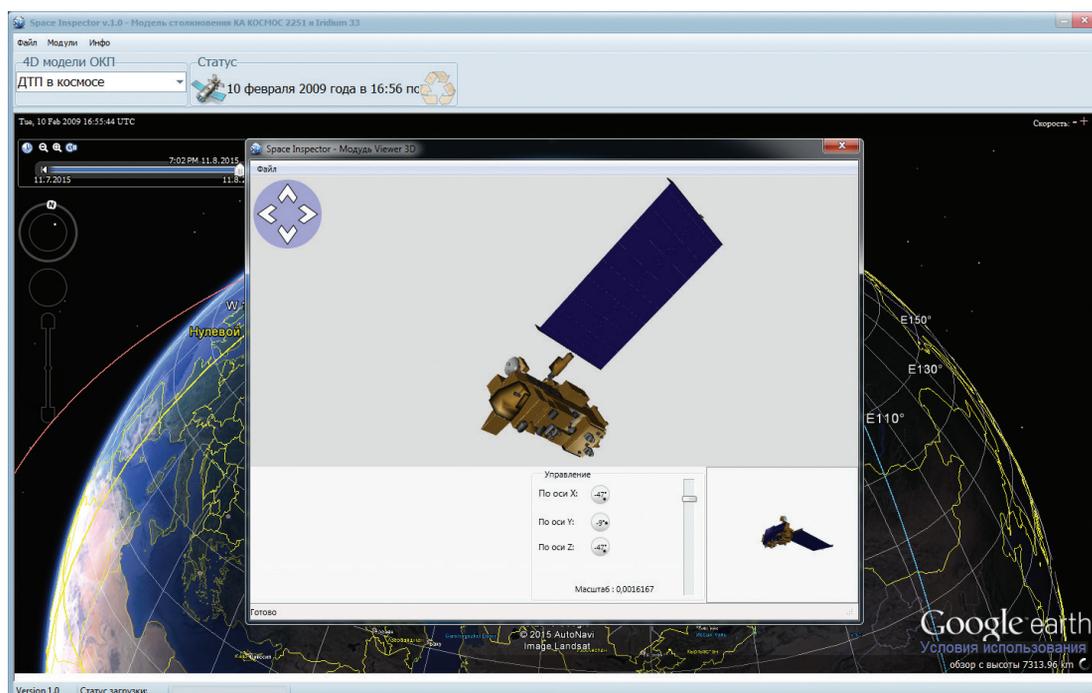


Рис. 1. Модуль Viewer3D, входящий в состав системы Space Inspector v.1.0. На заднем фоне представлен сценарий столкновения КА КОСМОС 2251 и Iridium 33. Изображение предоставлено Московским государственным университетом геодезии и картографии (МИИГАиК) (Груздев, Орлов, 2015)

ты на мобильных устройствах; отсутствие загружаемого плагина; технология WebGL, использующая аппаратные возможности графических процессоров, свободное коммерческое использование и др. При этом в качестве объекта сравнения был взят ГИС web-сервис SpaceBook (<http://apps.agi.com/SatelliteViewer/>). Данный сервис отображает положение более 9000 космических объектов, отслеживаемых с помощью оптических и радиолокационных станций слежения, и предвычисляет движение более 15000 объектов, занесённых в каталог NORAD, с помощью двухстрочных наборов элементов TLE (рис. 2). Таким образом, появляется возможность осуществлять выборку объектов на основании следующих критериев:

- Название объекта;
- Номер в каталоге NORAD;
- Статус активности;
- Тип орбиты;
- Функциональное назначение;
- Страна-владелец.

К преимуществам данной системы относятся:

- Максимально возможный охват КО;
- Использование проработанной и отлаженной графической оболочки;
- Удобный интерфейс;
- Развёртывание в виде сетевого ресурса на основе сервис-ориентированной архитектуры значительно уменьшает затраты на внедрение и поддержку. Однако важно отме-

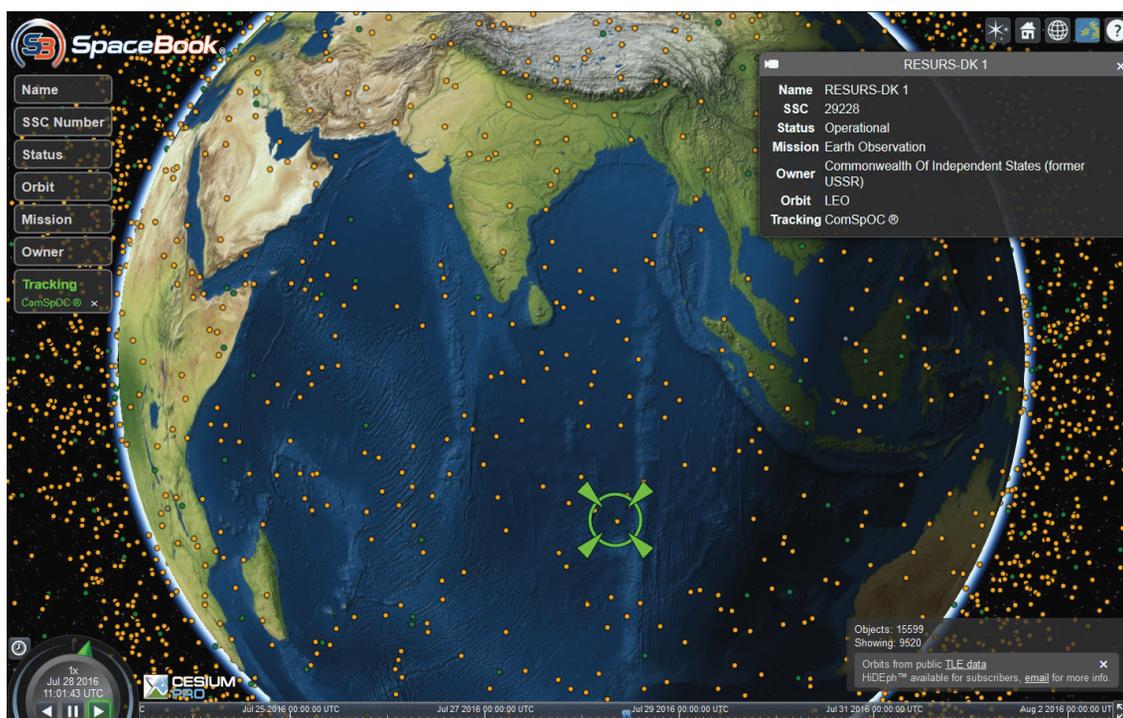


Рис. 2. Публичная демонстрационная версия ГИС web-сервиса SpaceBook. Изображение предоставлено компанией Analytical Graphics Inc. (URL: <http://apps.agi.com/SatelliteViewer/>)

тить, что в общедоступной версии системы не представлены данные (в том числе и текущие координаты) и подробное описание характеристик космических объектов, а также нет возможности выявлять пересечения орбит КО и оценивать риск их столкновения.

Рассмотрим базы данных (БД) космических объектов, известные из открытой печати и опубликованные в сети Интернет, и выполним их краткий анализ. Сравним их с сервисами, использующими для визуализации Google Earth API, Google Maps API и CesiumJS соответственно (табл. 1).

Представленные в таблице БД и сервисы получают исходную информацию, в том числе данные для расчета орбитальных параметров и предварительные вычисления положения КО для последующей обработки, из открытых источников, таких как:

- Сайт доктора Томаса Шона Келсо (<http://celestrak.com/>);
- Сайт Командования воздушно-космической обороны Северной Америки – NORAD (<https://www.space-track.org/>) – доступен только подписчикам;
- Сайт некоммерческого Союза Обеспокоенных Учёных (Union of Concerned Scientists, USA, <http://www.ucsusa.org/>);
- Сайт компании Analytical Graphics Inc. (<https://www.agi.com/>) – медиаданные доступны только подписчикам;
- На основе прочих несистемных источников.

Исходя из таблицы, можно сделать вывод, что ни один из объектов сравнения не имеет в своём составе наиболее полный перечень данных о космических объектах (в частности, изменяющиеся каждую секунду орбитальные параметры, принадлежность объекта и его

Таблица 1. Сравнительный анализ баз данных КО и сервисов мониторинга (по атрибутивным данным)

| Вид данных | Наименование базы данных или сервиса | | | | | | |
|---|---|---------------------|----------------|-------------|----------------------------|-----------------------|--|
| | База от компании <i>Analytical Graphics Inc. ***</i> | База "What's Up" | Сервис Solenix | Сервис N2YO | Сервис <i>SpaceBook</i> | Сервис <i>iSat</i> | |
| Имя КО | + | + | + | + | + | + | |
| Номер по каталогу | + | + | - | + | + | + | |
| Международный идентификатор | + | + | - | + | - | - | |
| Страна-владелец | + | + | - | + | + | - | |
| Компания-владелец | - | + | - | - | - | - | |
| Статус активности объекта | + | + | - | - | + | - | |
| Дата запуска | + | + | - | + | - | - | |
| Космодром * | + | + | - | - | - | - | |
| Период обращения КО | + | + | - | + | - | - | |
| Большая полуось | - | - | - | + | - | - | |
| Перигей | + | + | - | + | - | - | |
| Апогей | + | + | - | + | - | - | |
| Наклонение орбиты | + | + | - | + | - | - | |
| Предполагаемый срок службы * | - | + | - | - | - | - | |
| Эксплуатирующая организация * | - | + | - | - | - | - | |
| Функциональное назначение * | - | + | - | - | + | - | |
| Мощность силовой установки * | - | + | - | - | - | - | |
| Стартовая масса * | - | + | - | - | - | - | |
| Сухая масса * | - | + | - | - | - | - | |
| Размер объекта ** | - | + | - | - | - | - | |
| Эффективная площадь рассеяния | - | - | - | + | - | - | |
| Страны, заключившие договор по запуску КО * | - | + | - | - | - | - | |

| Таблица 1 (продолжение). Сравнительный анализ баз данных КО и сервисов мониторинга (по атрибутивным данным) | | | | | | |
|---|---|------------------|----------------|-------------|------------------|-------------|
| Вид данных | Наименование базы данных или сервиса | | | | | |
| | База от компании Analytical Graphics Inc. *** | База "What's Up" | Сервис Solenix | Сервис N2YO | Сервис SpaceBook | Сервис iSat |
| Организация-подрядчик, запускающая КО * | - | + | - | - | - | - |
| Ракета-носитель * | - | + | - | - | - | - |
| Комментарии | - | + | - | + | - | + |
| График изменения большой полуоси орбиты КО | - | + | - | - | - | - |
| Ширина | - | - | + | + | - | + |
| Долгота | - | - | + | + | - | + |
| Высота над уровнем моря | - | - | + | + | - | + |
| Орбитальная скорость | - | - | - | + | - | + |
| Угол курса | - | - | - | + | - | - |
| Угловая высота | - | - | - | + | - | - |
| Прямое восхождение | - | - | - | + | - | - |
| Тип орбиты | - | - | - | - | + | - |
| Частота обновления данных | 30 сек | Раз в сутки | 5 сек | 1 сек | 1 сек | 1 сек |
| Средство визуализации | GE API + | GE API + | GE API + | GM API + | CesiumJS | CesiumJS |
| Примечание: | | | | | | |
| + – GE API: интерфейс программирования приложений Google Earth API; GM API: интерфейс программирования приложений Google Maps API | | | | | | |
| * – только для действующих космических аппаратов | | | | | | |
| ** – только для КМ | | | | | | |
| *** – в настоящий момент компания Analytical Graphics Inc. прекратила поддержку своей базы данных в формате .kml из-за введения в эксплуатацию центра ComSpOС и сервиса SpaceBook | | | | | | |

эффективную площадь рассеяния), которые необходимы пользователю в режиме, близком к реальному времени.

Тем не менее на основании проведённого анализа можно дать следующие предложения по облику перспективного отечественного программного комплекса для оказания услуг в области мониторинга ОКП, в состав которого должен входить новый электронный каталог космических объектов:

- Комплекс следует реализовать на основе геоинформационного web-сервиса.
- В качестве основы комплекса следует выбирать открытую библиотеку для визуализации положения космических объектов, использующую графический процессор (оптимальный выбор на сегодняшний день – CesiumJS).
- В состав комплекса необходимо включать существующие каталоги КО естественного и искусственного происхождения.

В перечень функциональных возможностей комплекса должны входить:

- мониторинг в режиме, близком к реальному времени;
- прогнозирование положения объектов;
- выдача данных о положении объекта на заданном интервале времени;
- выдача атрибутивных данных объекта;
- перевод координат положения объекта в общепринятые в России и за рубежом общеземные системы координат и отсчёта;
- выявление пересечения орбит КО и оценка риска их столкновения.

Естественно, необходимым условием полноценного функционирования данного комплекса является развёртывание глобальной системы оптического, радиолокационного (РЛС) и радиочастотного слежения за КО в ОКП, включающей наземные станции, а также средства космического базирования.

В заключение отметим, что подобные исследования неизбежно сталкиваются с рядом проблем нетехнического характера. Во-первых, у организаций, выполняющих работы по данному направлению, зачастую нет возможности обмениваться имеющимися данными и полученными результатами. Во-вторых, большинство организаций, работающих по космической тематике, ограничены административными барьерами, что не позволяет им осуществлять публикацию результатов собственных исследований. А это неминуемо сказывается на скорости достижения конкретного научного результата.

Предполагаем, что основные технические трудности в реализации проекта могут быть следующими:

- Невозможность слежения традиционными оптическими и радиолокационными средствами за космическими объектами, имеющими в поперечнике менее 10 см.
- Невозможность развёртывания единой глобальной наземной системы слежения за КО.
- Невозможность развёртывания орбитальной системы слежения из-за высокой стоимости, а также загруженности ОКП.
- Невозможность увеличения рабочей частоты станций РЛС до 30 ГГц и выше

из-за колоссального энергопотребления, высокой стоимости эксплуатации и поглощения атмосферой радиоволн короче 1 см (хотя это и позволило бы обнаруживать частицы КМ до 1 мм на низких орбитах) (Вениаминов, Червонов, 2012).

– Неточность двухстрочных наборов элементов (TLE) для прогнозирования движения КО и закрытость более точных данных и результатов наблюдений.

Важным условием является развитие отечественных сервисов для мониторинга и контроля ОКП, реализующих широкий спектр возможностей геоинформационных технологий и функционирующих в режиме удалённого доступа к информационным ресурсам центров обработки данных наблюдений.

Литература

1. Агапов В.М., Головкин А.В., Емельянов В.А., Коношенко В.П., Курикса А.А., Логинов С.С., Макаров Ю.Н., Меркушев Ю.К., Михайлов М.А., Молотов И.Е., Назаренко А.И., Райкунов Г.Г., Соколов В.Г., Суханов С.А., Усовик И.В., Шилин В.Д., Хуторовский З.Н., Яковлев М.В. Космический мусор. В 2 кн. Кн. 1. Методы наблюдения и модели космического мусора. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 248 с.
2. Вениаминов С.С., Червонов А.М. Космический мусор – угроза человечеству. М.: Изд-во Инст. космич. исследований РАН, 2012, 192 с.
3. Журкин И.Г., Груздев С.С. Концепция программно-аппаратной платформы по трёхмерному моделированию космического пространства // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. № 4. С. 45–49.
4. Груздев С.С., Панкин А.В. О технологиях распределённых вычислений и возможности их применения в геоинформатике // В сборнике: Геоинформационные науки и экологическое развитие: новые подходы, методы, технологии. Геоинформационные технологии и космический мониторинг. VI международная конференция, материалы в 2 томах. 2013. С. 267–278.
5. Груздев С.С. Выбор эффективного алгоритма поиска особых точек на изображениях при решении задач автоматизации трёхмерного моделирования объектов для ГИС околоземного пространства // В сборнике: Геоинформационные науки и экологическое развитие: новые подходы, методы, технологии. Геоинформационные технологии и космический мониторинг VI международная конференция, материалы в 2 томах. 2013. С. 321–327.
6. Груздев С.С., Орлов П.Ю. Разработка программного средства с использованием графического процессора для обеспечения взаимодействия с четырёхмерной ГИС околоземного космического пространства // Экология, экономика, информатика. Сборник статей: в 3 т. Т. 3: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2015. С. 128–143.
7. Орлов П.Ю., Панкин А.В. ГИС околоземного космического пространства: дальнейшие исследования и смена парадигмы // Экология, экономика, информатика. Сборник статей: в 3 т. Т. 3: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2015. С. 180–189.
8. Kelso T.S. Analysis of the Iridium 33-Cosmos 2251 collision // Advances in the Astronautical Sciences. 2009. Vol. 135. Suppl. 2. AAS 09-368. P. 1099–1112.

Analysis of the current state and prospects for the development of a digital catalog of objects in near-Earth space

S.S. Gruzdev, I.G. Zhurkin, P.Yu. Orlov, A.V. Pankin

*Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow 105064, Russia
E-mail: knightrider3e0@gmail.com*

For decades mankind has believed that space exploration carry no threat of pollution for the near-Earth environment. There are several hundred thousand man-made features in orbit by now, less than fifteen hundred of them are active satellites and the remaining amount is space debris. However, only 5–10% of the total number of space objects can be tracked from the Earth. Experts, who face the need to make decisions, illustrate the situation in near-Earth orbits

work with an object's shape and perform scientific researches, often do not have tools that could fulfil the given work properly. Besides, at the moment space debris and spacecrafts are not considered as objects of geoinformation modeling. The results of near-Earth space monitoring-related research activities and ways of their development, including GIS-technologies application, which will increase the efficiency of near-Earth space status monitoring and improve the perception of the heterogeneous spatial information by means of modern three-dimensional visualization application, are shown in this paper. Moreover, the brief analysis of the space objects databases and web-services known from the public media and published on the Internet is represented. In addition, suggestions on the national software solution of the next-generation to provide services in the field of near-Earth space monitoring are made.

Keywords: near-Earth space, space debris, space object, space environmental monitoring, GIS web service, two-line element set (TLE), Google Earth API, CesiumJS

Accepted: 05.10.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-51-59

References

1. Agapov V.M., Golovko A.V., Emel'yanov V.A., Konoshenko V.P., Kuriksha A.A., Loginov S.S., Makarov Yu.H., Merkushev Yu.K., Mikhailov M.A., Molotov I.E., Nazarenko A.I., Raikunov G.G., Sokolov V.G., Sukhanov S.A., Usovik I.V., Shilin V.D., Khutorovskii Z.N., Yakovlev M.V., *Kosmicheskii musor. Kniga 1: Metody nablyudeniya i modeli kosmicheskogo musora* (Space debris. Book 1: Observational techniques and space debris models), Moscow: Fizmatlit, 2014, 248 p.
2. Veniaminov S.S., Chervonov A.M., *Kosmicheskii musor – ugroza chelovechestvu* (Space debris – a threat to mankind), Moscow: Izd-vo Inst. kosmich. issledovaniy RAN, 2012, 192 p.
3. Zhurkin I.G., Gruzdev S.S., Kontseptsiya programmno-apparatnoi platformy po trekhmernomu modelirovaniyu kosmicheskogo prostranstva (On creating a virtual laboratory and a concept of firmware platform for 3D-modelling of the cosmic space), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos»emka*, 2012, No. 4, pp. 45–49.
4. Gruzdev S.S., Pankin A.V., O tekhnologiyakh raspredelennykh vychislenii i vozmozhnosti ikh primeneniya v geoinformatike (On distributed computing technologies and their possible applications in Geoinformatics), In: *Geoinformatsionnye nauki i ekologicheskoe razvitie: novye podkhody, metody, tekhnologii. VI konf. "Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskii monitoring"* (Geoinformation sciences and environmental development: new approaches, methods, technologies. 6th Int. Conf. "Geoinformational Technologies and Satellite Monitoring"), Proc. Conf., 2013, pp. 267–278.
5. Gruzdev S.S., Vybór effektivnogo algoritma poiska osobykh tochek na izobrazheniyakh pri reshenii zadach avtomatizatsii trekhmernogo modelirovaniya ob'ektov dlya GIS okolozemnogo prostranstva (Selection of an effective algorithm to search specific points on the images for problem solving of three-dimensional modeling objects automation for GIS of Near-Earth space), In: *Geoinformatsionnye nauki i ekologicheskoe razvitie: novye podkhody, metody, tekhnologii. VI konf. "Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskii monitoring"* (Geoinformation sciences and environmental development: new approaches, methods, technologies. 6th Int. Conf. "Geoinformational Technologies and Satellite Monitoring"), Proc. Conf., 2013, pp. 321–327.
6. Gruzdev S.S., Orlov P.Yu., Razrabotka programmno sredstva s ispol'zovaniem graficheskogo protsessora dlya obespecheniya vzaimodeistviya s chetyrekhmernoí GIS okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva (The development of software tool using GPU and providing interaction with four-dimensional GIS of Near-Earth space environment), *Proc. Conf. "Ekologiya, ekonomika, informatika"* (Ecology, Economics, Informatics), 2015, Vol. 3, pp. 128–143.
7. Orlov P.Yu., Pankin A.V., GIS okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva: dal'neishie issledovaniya i smena paradigmy (GIS of Near-Earth space environment: further research and paradigm shift), *Proc. Conf. "Ekologiya, ekonomika, informatika"* (Ecology, Economics, Informatics), 2015, Vol. 3, 2015, pp. 180–189.
8. Kelso T.S., Analysis of the Iridium 33-Cosmos 2251 collision, *Advances in the Astronautical Sciences*, 2009, Vol. 135, Suppl. 2, AAS 09-368, pp. 1099–1112.