

УДК 621.396

НАУЧНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ В ОКОЛОЗЕМНОЙ АСТРОНОМИИ**Алёшин В. П.**

SCIENTIFIC VISUALIZATION IN NEAR-EARTH ASTRONOMY

Aleshin V. P.

Research-and-Production Corporation “Precision System and Instruments” (PRC “PSI”)
e-mail: aleshin_vl@mail.ru

Abstract. Scientific visualization in near-Earth astronomy will solve the following problems: visual presentation of research results; visualization and analysis of large volumes of measurements; interpretation of optical images and photometric signals using the induced virtual environment method; visualization of situations with space debris; visual analysis of the asteroid hazard; visualization of astrophysical problems in near-Earth astronomy; visual education for near-Earth astronomy.

As follows from Gödel’s incompleteness theorem, the non-computable Turing functions, the R. Penrose theorem No-go, the finite automaton (computer) cannot replace the human cognitive abilities in the analysis of non formal information. The most effective way to analyze data is through interactive visualization using 3D tools. The paper on examples of real astronomical measurements and catalogs shows the possibilities of scientific visualization in near-Earth astronomy. The following program systems of visualization are considered: system of induced virtual environment; program for 3D visualization of satellites on the background of cartographic projections of the Earth; analysis program of large data using visualization; system for estimation of the orientation of emergency satellites using the virtual environment method; virtual planetarium program; interactive virtual education system for near-Earth astronomy.

Keywords: scientific visualization, induced virtual environment, space debris, asteroid danger.

Введение

Общее определение научной визуализации — графическое представление результатов научных экспериментов и вычислений.

Как следует из теоремы Геделя о неполноте и теоремы Тьюринга о невычислимых функциях, конечный автомат (компьютер) не может заменить когнитивные способности человека в анализе плохо формализуемой информации [1]. Наиболее эффективный путь к анализу данных в данном случае дает интерактивная визуализация с использованием 3D инструментов. Еще А. Эйнштейн писал: «Если я не могу это изобразить, я не могу это понять» (“If I can’t picture it I can’t understand it”). Р. Пенроуз трактует визуализацию следующим образом [2] (раздел 1.20 «Мысленная визуализация и виртуальная реальность»): «Однако, как показывает практика, геометрические интуитивные представления чаще всего дают более глубокое математическое по-

нимание . . . Иными словами, под “визуализацией” мы будем в дальнейшем подразумевать скорее процессы, связанные с “осознанием” вообще, нежели те, что имеют непосредственное отношение к системе органов зрения. Я же полагаю, что всякий раз, когда мы сознательно воспринимаем ту или иную визуальную сцену, сопровождающее этот процесс понимание представляет собой нечто, существенно отличное от моделирования мира методами вычислительного характера».

1. Индуцированная виртуальная среда

Эффективным способом сделать «невидимое видимым» является метод индуцированной виртуальной среды (ИВС) [3, 4], блок-схема которого изображена на рис. 1. Индуцированная виртуальная среда формирует недостающие параметры 3D-сцены с помощью внешних измерений или математического моделирования.

Алёшин Владимир Петрович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела разработки крупногабаритных телескопных комплексов АО «Научно-производственная корпорация “Системы прецизионного приборостроения”» (АО «НПК “СПП”»); e-mail: aleshin_vl@mail.ru.

Работа частично поддержана РФФИ (проект 16-07-00637).

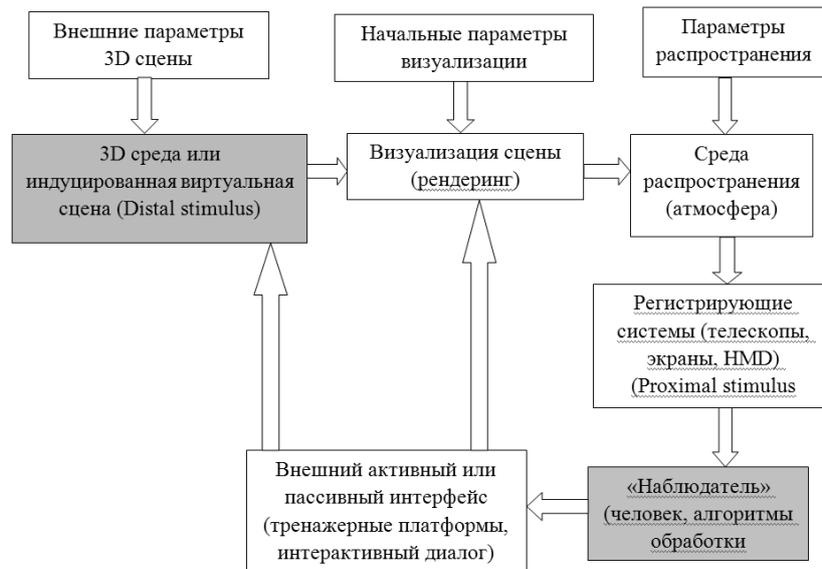


Рис. 1. Индуцированная виртуальная среда

Визуальное восприятие человека можно трактовать как решение обратной задачи и байесовский вывод [4], что соответствует психофизическому конструктивизму Гельмгольца. Рассмотрим задачу с позиций статистических решающих функций [5]. Пусть $C(o, \delta)$ — функция потерь, где o — структурный параметр (параметр «восприятия», объект, 3D сцена), δ — решающая функция $\delta = \delta(i)$, i — наблюдения;

$$R(o, \delta(i)) = \int C(o, \delta) P(o; i) di$$

— средний риск, где $P(o; i)$ — вероятностная плотность распределения (предполагается выполнение условий Радона–Никодима). Минимаксный критерий определяется выражением:

$$R(\delta^*(i)) = \min_{\delta(i)} \max_o R(o, \delta(i)).$$

При выполнении условий теоремы А. Вальда [5], минимаксное решение находится в классе байесовских. Для «простой» функции потерь байесовское решение соответствует максимуму апостериорной вероятности (нормировка опущена)

$$\hat{o}_{ap} = \max_o P(o; i)_{ap} = \max_o P(o; i) * P(o).$$

С позиций визуального восприятия априорная плотность $P(o)$ определяет регуляризирующий 3D образ [6, 7]. С помощью ИВС

можно проводить рендеринг виртуальных сцен и соответствующих изображения i_{3D} . Если эту информацию отображать в режиме человеко-машинного интерфейса, то мозг будет одновременно с визуальным восприятием сцен формировать априорные 3D-образы $P(o)$. Считается, что трехмерные образы хранятся в гиппокампе мозга.

Одним из примеров применения 3D графики в околоземной астрономии является визуализация космического «мусора». Индуцированная 3D сцена формируется по каталогу космических объектов. Иллюстрация распределения объектов в околоземном космическом пространстве приведена на рис. 2. Публикация соответствующих 3D сцен имела заметный резонанс с точки зрения привлечения общественного внимания к экологической проблеме космического «мусора».

2. Анализ космических событий с помощью ИВС

Особую сложность в околоземной астрономии представляет анализ аварий некооперируемых искусственных объектов (ИСЗ), прекративших передачу телеметрии. В данном случае единственными возможными источниками информации являются наземные средства наблюдения [6]. Напомним случай аварии с орбитальной станцией Салют-7. Проведенный анализ движения станции относительно центра масс (ЦМ) позволил провести опера-

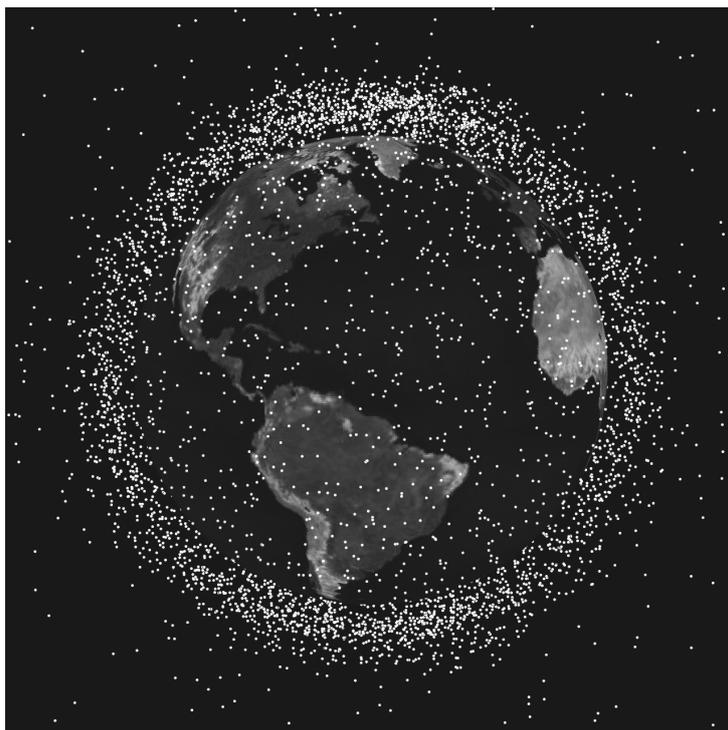


Рис. 2. Космический «мусор»

цию по восстановлению работоспособности станции и продлить жизнедеятельность станции на год. Наиболее важным и сложным является случай медленного движения космического аппарата относительно ЦМ и соответствующая оценка текущей ориентации космических аппаратов (КА) в пространстве. Эффективную информацию в данном случае дают оптические изображения, получаемые с помощью адаптивной оптики и спеклинтерферометров.

На основе технологии индуцированной виртуальной среды создан комплекс интерактивных программ, позволяющий проводить поиск ориентации КА и интерпретацию последовательности изображений в диалоговом режиме [7, 8]. В отличие от традиционных систем технического зрения, применяемых в мобильных устройствах, здесь на первое место выходит не оперативность и автономность, а надежность получаемых решений и наглядность процесса интерпретации получаемой информации. Это особенно важно в условиях высокой ответственности решений и при необходимости демонстрации получаемых результатов оппонизирующей стороне. Процесс поиска ориентации вкратце сводится к следующему. После загрузки входной информации

осуществляется выбор системы стабилизации, в которой производится поиск ориентации (распространенная система — орбитальная). Далее выбирается один из наиболее информативных кадров видеопоследовательности, для которого путем вращения 3D модели КА подбирается ориентация КА. Для данной ориентации моделируется вся последовательность кадров, соответствующая реальной орбите КА (в течение проводки система стабилизации вращается относительно телескопа). Оценивается степень совпадения прогнозируемой видеопоследовательности (смоделированной) и реальной видеопоследовательности. Если соответствие не найдено, то выбирается кадр с наибольшей невязкой и производится подбор ориентации. Структурная схема алгоритма изображена на рис. 3.

На рис. 4 иллюстрируются отдельные изображения индуцированной 3D сцены, синхронизированные с кадрами изображений, полученных с помощью адаптивной оптики. При анализе использовался описанный выше алгоритм.

Отдельный интерес представляет использование ИВС при анализе стыковок в космическом пространстве. На рис. 5 изображен один из кадров виртуальной стыковки МКС с

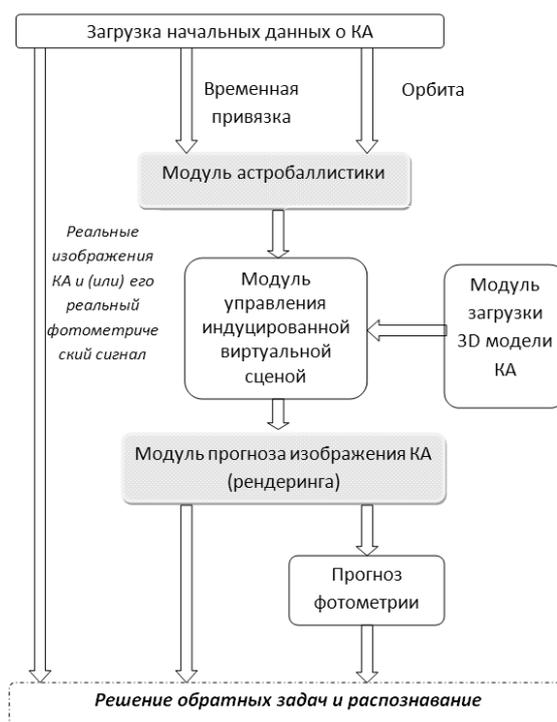


Рис. 3. Структурная схема ИВС для ситуационной оценки в околоземной астрономии

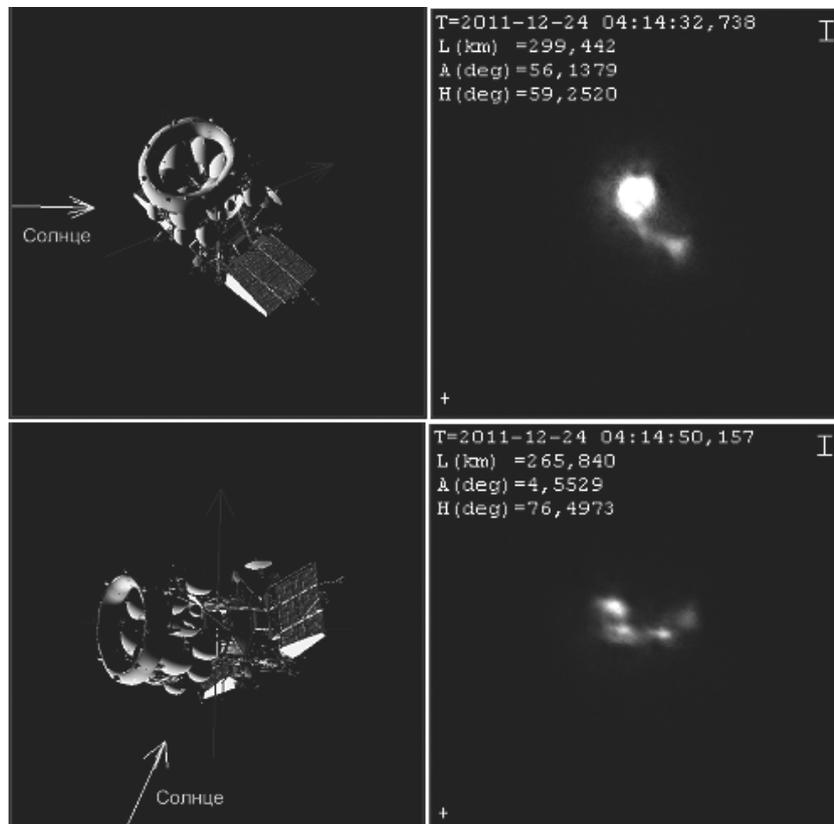


Рис. 4. Анализ аварийной ситуации с межпланетной станцией Фобос-Грунт

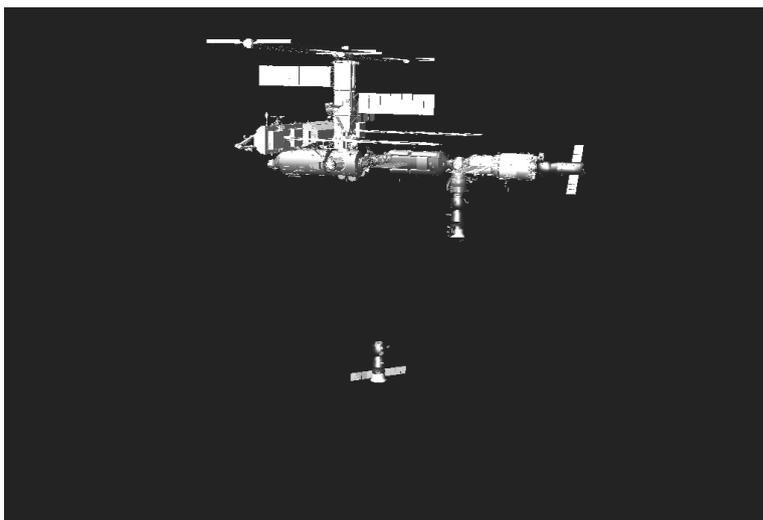


Рис. 5. Индуцированная сцена виртуальной стыковки

кораблем «Союз». Положение в пространстве моделируется с помощью реальных внешних измерений. Астробаллистические прогнозы соответствуют реальным орбитам КА. Подобный анализ позволил произвести стыковку при нештатном положении стыковочного узла (не закрыт один из конструктивных элементов). После визуального анализа была устранена нештатная конфигурация и осуществлена стыковка.

3. Система индуцированной виртуальной среды интегрированная с геоинформационной системой

Как показали эксперименты [9], визуальное восприятие является важным элементом человеко-машинного интерфейса и принятия решений. Весьма интересен вариант интегрированной системы, совмещающей возможности 3D графики и геоинформационных систем (ГИС) В целях дальнейшего развития визуальной системы анализа околоземного космоса была разработан комплекс программ (Satellites 1.0), позволяющий осуществлять следующие функции:

1) отображение произвольного движения космических аппаратов как на географической карте, так и в пространстве виртуальной трехмерной среды;

2) интерактивное взаимодействие пользователя с географической картой: изменение проекций, послойное отображение информации, с возможностью включения/вы-

ключения слоев, изменение масштаба карты и т.д.;

3) интерактивное взаимодействие пользователя с виртуальной трехмерной средой: возможность изменять положения наблюдателя между космическими аппаратами, а также возможность свободного обзора, управляемого пользователем;

4) поддержку векторных форматов хранения географической информации, в частности, MID/MIF, используемого в продуктах MapInfo™, и отображение векторных данных, хранимых в таких форматах на географической карте и в пространстве виртуальной трехмерной среды (в проекции на поверхность Земли);

5) поддержку традиционных форматов хранения информации о трехмерных объектах, например, моделях космических аппаратов;

6) возможность интеграции в другие разрабатываемые на базе платформы Java продукты без потери функциональности в качестве структурной компоненты.

При создании комплекса Satellites 1.0 реализованы новые системы и технологии:

– разработана платформенно-независимая интерактивная система визуализации движения космических аппаратов, встраиваемая в качестве компонента в произвольное Java-приложение;

– разработана технология, позволяющая поддерживать визуализацию космических аппаратов, независимо от способа задания их траекторий;

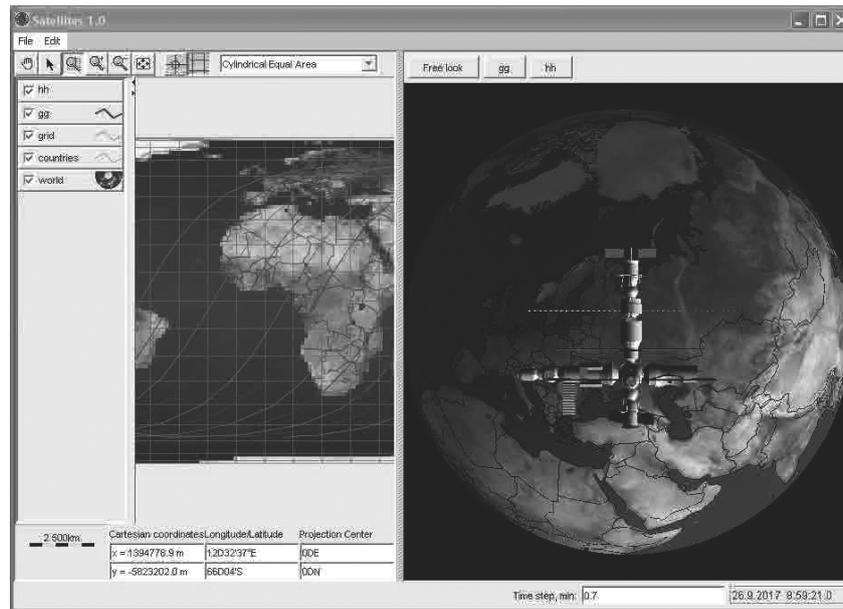


Рис. 6. Пакет 3D графики (ИВС), синхронизированный с геоинформационной системой

– разработана технология перенесения произвольных полигональных векторных данных, описанных в любом из форматов, поддерживаемых в технологии JViews, на поверхность трехмерной сферы

Вариант работы комплекса программ Satellites 1.0 приведен на рис. 6.

Разработанные технологии и программные комплексы находят применение в широком спектре задач, связанных с исследованием околоземного космического пространства [10]. Весьма интересно применение научной визуализации при обучении и популяризации космических исследований. Нашим легендарным космонавтом А. Серебровым были предложены и проведены уроки из космоса в реальном времени (во время полета на корабле «Мир»). Уроки транслировались в on-line режиме на Японию и получили огромную популярность. Эти же уроки в дальнейшем были реализованы в виртуальном режиме с использованием разработанных программных комплексов. Весьма интересна программа стереоскопического виртуального планетария (3 200 звезд и 10 планет), используемая при обучении. На рис. 7 иллюстрируется работа виртуального планетария и виртуальных космических уроков.

Заключение

Научная визуализация для решения задач космических исследований активно развива-

ется во всем мире. В США одним из лидеров данного направления является фирма «Аналитическая графика» (Analytical Graphics, Inc. (AGI)). Санкции и необходимость импортозамещения требуют развития собственных инструментов визуализации. Среди отечественных программных пакетов, кроме представленных, отметим пакет SolarSuit (разработчик Галушина Т.Ю.).

Научная визуализация в околоземной астрономии позволит решить следующие задачи:

- визуальное представление результатов исследований;
- визуализация и анализ больших объемов измерений;
- интерпретация оптических изображений и фотометрических сигналов с использованием метода индуцированной виртуальной среды;
- визуализация ситуаций с космическим мусором;
- визуальный анализ астероидной опасности;
- визуализация астрофизических задач в околоземной астрономии;
- визуальное образование для околоземной астрономии.

В статье на примерах реальных астрономических измерений и каталогов показаны возможности научной визуализации в околоземной астрономии. Рассматриваются следующие программные системы визуализации:



Рис. 7. Виртуальный планетарий и виртуальные уроки из космоса

- система индуцированной виртуальной среды;
- программа для 3D-визуализации спутников на фоне картографических проекций Земли;
- программа анализа больших данных с использованием визуализации;
- система оценки ориентации аварийных спутников с использованием метода виртуальной среды;
- программа виртуального планетария;
- интерактивная система виртуального образования для околоземной астрономии.

Автор выражает признательность проф. Клименко С.В. за постановку задачи и поддержку.

Литература

1. Penrose R. The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics. Oxford University Press, Oxford, 1989. 386 pp. (Имеется русский перевод: Пенроуз Р. Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики. М.: Эдиториал УРСС, 2003. 384 с.)
2. Penrose R. Shadows of the Mind: An Approach to the Missing Science of Consciousness. Oxford University Press, Oxford, 1994. 690 pp. (Имеется русский перевод: Пенроуз Р. Тени разума: в поисках науки о сознании. Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. 688 с.)
3. Алешин В.П., Афанасьев В.О., Байгозин Д.А., Батурич Ю.М., Клименко С.В. Система визуализации индуцированного виртуального окружения: состояние проекта // В сб. тр. 14-й Межд. Конф. «Графикон-2004», М.: Изд-во МГУ. 2004, С. 12–15.
4. Алешин В.П. Технология виртуальной 3D среды в обратных задачах анализа визуального восприятия и интерпретации изображений // Труды 26-й Междунар. научной конф. «Графикон 2016». Институт Физико-технической информатики, Москва, Протвино. С. 9–13.
5. Wald A. Statistical Decision Functions, Wiley, 1950. 192 p. (Имеется русский перевод: Вальд А. Статистические решающие функции // В сб.: Позиционные игры, М.: Наука, 1967, С. 300–522).
6. Алешин В.П. Наземные системы получения оптических изображений космических аппаратов и обратные задачи // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. № 8. С. 60–67.
7. Алешин В.П., Моделирование и восстановление оптических изображений в околоземной астрономии // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2013. № 4. Т. 3. С. 7–12.
8. Алешин В.П., Новгородцев Д.Д., Выгон В.Г., Гришин Е.А., Дорноступ С.А., Симонов Г.В., Шаргородский В.Д., Юрасов В.С. Оценка движения аварийных космических аппаратов относительно центра масс по реальным оптическим наблюдениям // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2013. № 4. Т. 2. С. 7–14.
9. Aleshin V., Afanasiev V., Bobkov A., Klimenko S., Kuliev V., Novgorodtsev D. Visual 3D Perception of motion environment and visibility factors in virtual space. In: Transaction on Computer Science, XVI, Lecture Notes on Computer Science 7380. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2012. pp. 17–33.
10. Афанасьев В.О., Байгозин Д.А., Батурич Ю.М., Даниличева П.П., Долговесов Б.С., Ерёмченко Е.Н., Казанский И.П., Клименко А.С., Клименко С.В., Никитин И.Н., Никитина Л.Д., Петрухин В.А., Серебров А.А., Уразметов В.Ф., Фролов П.В. Системы визуализации и виртуального окружения в задачах исследования космоса: настоящее и будущее // В сб.: Космонавтика XXI века. М.: РТСофт, 2010. С. 185–249.

References

1. Penrose R. *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics*. Oxford University Press, Oxford, 1989, 386 p.
2. Penrose R. *Shadows of the Mind: An Approach to the Missing Science of Consciousness*. Oxford University Press, Oxford, 1994, 690 p.
3. Aleshin V.P., Afanas'ev V.O., Bajgozin D.A., Baturin YU.M., Klimenko S.V. Sistema vizualizacii inducirovannogo virtual'nogo okruzheniya: sostoyanie proekta [Virtual environment visualization system for the tasks of space exploration: Current status]. In: *Sbornik trudov 14-j Mezhd. Konf. "Grafikon-2004"* [Proc. of 14th conference 'Graphicon-2004']. Moscow, MGU Publ., 2004, pp. 12–15. (In Russian)
4. Aleshin V.P. Tekhnologiya virtual'noj 3D sredy v obratnyh zadachah analiza vizual'nogo vospriyatiya i interpretacii izobrazhenij [Technology of 3D virtual environment in inverse problems of visual perception analysis and image interpretation]. *Trudy 26-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Grafikon 2016"* [Proc. of 26th conference 'Graphicon-2016']. Moscow, Protvino, ICPT Publ., 2016, pp. 9–13. (In Russian)
5. Wald A. *Statistical Decision Functions*. Wiley, 1950. 192 p.
6. Aleshin V.P. Nazemnye sistemy polucheniya opticheskikh izobrazhenij kosmicheskikh apparatov i obratnye zadachi [Ground systems of satellite imaging and inverse problems]. *Elektromagnitnye volny i ehlektronnye sistemy* [Electromagnetic waves and electronic systems], 2014, no. 8, pp. 60–67. (In Russian)
7. Aleshin V. Modelirovanie i vosstanovlenie opticheskikh izobrazheniy v okolozemnoy astronomii [Modeling and restoration of optical images in near-Earth astronomy]. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological bulletin of scientific centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2014, no. 4, iss. 3, pp. 7–12. (In Russian)
8. Aleshin V.P., Novgorodtsev D.D., Vigon V.G., Grishin E.A., Dornostup S.A., Simonov G.V., Shargorodsky V.D., Yurasov V.S. Ocenka dvizheniya avarijnykh kosmicheskikh apparatov ot nositel'no centra mass po real'nym opticheskim nablyudeniyam [Estimation of nonoperating spacecrafts motion near center of mass using the real optical observations]. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological bulletin of scientific centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2013, no. 4, iss. 2, pp. 7–14. (In Russian)
9. Aleshin V., Afanasiev V., Bobkov A., Klimenko S., Kuliev V., Novgorodtsev D. Visual 3D Perception of motion environment and visibility factors in virtual space. In: *Transaction on Computer Science, XVI, Lecture Notes on Computer Science 7380*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. pp. 17–33.
10. Afanas'ev V. O., Bajgozin D.A., Baturin Y.M., Danilicheva P.P., Dolgovesov B.S., Eryomchenko E.N., Kazanskij I.P., Klimenko A.S., Klimenko S.V., Nikitin I.N., Nikitina L.D., Petruhin V.A., A Serebrov A.A., Urazmetov V.F., Frolov P.V. Sistemy vizualizacii i virtual'nogo okruzheniya v zadachah issledovaniya kosmosa: nastoyashchee i budushchee [Systems of visualization and virtual environment in space investigation problems: present and future]. In: *Kosmonavtika XXI veka* [Cosmonautics of the XXI century]. Moscow, RTSOft Publ., 2010, pp. 185–249. (In Russian)