

Разработка универсального алгоритма для определения пространственно-временного состояния техногенных систем по временным рядам геодезических данных

Е. Ф. Голуб¹, Т. Ю. Бугакова^{1}*

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: kaf.pi@ssga.ru

Аннотация. Сложность современных техногенных систем (инженерно-технических сооружений) сопряжена с вопросами безопасности их эксплуатации. Воздействие эндогенных и экзогенных факторов приводит к изменению состояния систем. В связи с этим возникает потребность в совершенствовании методов и средств определения состояний сооружений для обеспечения безопасности их эксплуатации. В статье рассмотрены методы геодезических измерений пространственно-временных состояний инженерно-технических сооружений, приведен анализ программного обеспечения обработки данных, сделаны выводы о достоинствах и недостатках современного программного обеспечения. На основании исследований, предложен комплексный алгоритм, позволяющий унифицировать процедуру определения пространственно-временного состояния инженерно-технических сооружений разных форм и конструкций с учетом индивидуального подбора математических алгоритмов для оценки и своевременного предупреждения аварийных ситуаций. Концептуальная схема комплексного алгоритма включает порядок действий и набор математических моделей, что позволяет определить пространственно-временное состояние инженерно-технических сооружений любой конструкции для широкого спектра целей.

Ключевые слова: пространственно-временное состояние, инженерно-технические сооружения, геодезические методы измерений, математические модели, универсальный алгоритм

Development of a Universal Algorithm for Determining the Spatio-Temporal State of Man-Made Systems Based on Time Series of Geodetic Measurements

E. F. Golub¹, T. Yu. Bugakova^{1}*

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: kaf.pi@ssga.ru

Abstract. The complexity of modern man-made systems (engineering structures) is associated with issues of safety of their operation. The effects of endogenous and exogenous factors lead to a change in the state of systems. In this regard, there is a need to improve methods and means of determining the condition of structures to ensure the safety of their operation. The article discusses the methods of geodetic measurements of the spatio-temporal states of engineering structures, provides an analysis of data processing software, and draws conclusions about the advantages and disadvantages of modern software. Based on the research, a complex algorithm that allows unifying the procedure for determining the spatial and temporal state of engineering structures of different shapes and designs, taking into account the individual selection of mathematical algorithms for assessing and timely warning of emergency situations is offered. The conceptual scheme of the complex algorithm includes the procedure of actions and a set of mathematical models, which makes it possible to determine the spatial and temporal state of engineering structures of any design for a wide range of purposes.

Keywords: spatial and temporal state, engineering structures, geodetic measurement methods, mathematical models, universal algorithm

Введение

Сложность современных техногенных систем (инженерно-технических сооружений) всегда сопряжена с вопросами безопасности их эксплуатации [13, 20]. Воздействие эндогенных и экзогенных факторов приводит к изменению состояния систем. В связи с этим возникает потребность в совершенствовании методов и средств определения их состояний. Для контроля состояний сооружений специалистами проводится периодический или постоянный мониторинг инженерно-технических сооружений (ИТС), включающий, в том числе, и геодезические методы измерений [16-18, 24].

Методы и материалы

Применение геодезических измерений с использованием современного геодезического оборудования, к которым относятся, например, методы геометрического, тригонометрического нивелирования, ГНСС, лазерного сканирования и т.д., позволяют определить и оценить пространственно-временное изменение состояния ИТС и их конструктивных элементов [1].

Геометрическое нивелирование – метод, который позволяет рассчитать превышение между точками на расстоянии от 5 – 10 м., при этом точность составляет от 0,05 до 0,1 мм, и расстоянием в 100 м., с точностью 0,5 мм.

Основными достоинствами геометрического нивелирования считаются: простота в эксплуатации, скорость и точность. Применение находит на открытых и легкодоступных месторасположениях объектов [11, 25].

Тригонометрическое нивелирование применяется при измерении вертикального перемещения фундамента конструкции при резких изменениях высоты, а также при наблюдении препятствий в труднодоступных местах [14, 19].

С помощью тахеометра измеряется превышение h между точками, угол наклона γ и горизонтальное расстояние s . Оптическими и электронными теодолитами измеряются вертикальные углы. Для точного измерения расстояния, чаще всего, используют электронные тахеометры. СКО вертикального угла должна составлять 1", 2" либо 5", в зависимости от вида тахеометра, а величина расстояния составляет $2 \text{ мм} + 2 \text{ мм} / \text{км}$. [12, 22].

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) предназначены для определения местоположения в любой точке земной поверхности с применением специальных навигационных или геодезических приемников [7].

Основные достоинства данного метода заключаются в простоте применения, непрерывности измерений.

Недостатки ГНСС:

- несоответствие точности измерений паспорту;
- плохая видимость при наличии препятствий.

СКО координат при одночастотных приемниках составляет 5 м, а при двухчастотных – 4м. Ошибка измерений длины составляет от $2 \text{ мм} + 1 \text{ мм/км}$ до $5 \text{ мм} + 2 \text{ мм/км}$, а превышений – в 2 раза грубее.

Период продолжительности измерения составляет от 25 до 60 мин.

Наземное лазерное сканирование (НЛС) предназначено для создания цифровых моделей объектов в виде облака точек с пространственными координатами. Метод НЛС является 3-мерным сканированием. Скорость измерений составляет – 5 тыс. измерений в сек., а плотность – 10 точек на 1 см². поверхности [8–10].

В результате применения НЛС получают цифровую модель объекта в виде облака точек с координатами X, Y, Z.

Основным недостатком ЛНС является дороговизна оборудования, и как следствие, съемки [15, 23].

Наземная лазерная система состоит из лазерного сканера (НЛС), полевого персонального компьютера и специального ПО, которое необходимо для управления работой НЛС, а также для сбора и обработки первичных результатов сканирования. Дальномер и блок развертки лазерного луча являются главными компонентами НЛС [21].

Для обработки геодезических измерений существует множество готовых программных продуктов. Большинство из них используется для решения инженерно-геодезических задач и осуществления геодезического контроля ИТС.

Trimble 4D Control используется для установки и использования в центрах управления системами мониторинга ИТС, а также для анализа и обработки данных, которые получены измерительными приборами.

Функциональные возможности данного ПО:

- сбор данных измерений;
- обработка результатов измерений, постобработка;
- анализ полученных данных;
- хранение данных;
- предоставление данных потребителям;
- контроль состояния объекта мониторинга;
- дистанционное управление системой мониторинга.

Leica GeoMoS – это многоцелевое ПО, которое предназначено реализовывать проекты автоматизированного деформационного мониторинга и анализировать состояние объекта.

В Leica GeoMoS входят 3 основных приложения:

– монитор (Monitor) – приложение, которое работает в режиме РВ, отвечает за получение информации с датчиков, обрабатывает и хранит данные вычислений и измерений, организывает передачу данных потребителю и оператору, планирует работу и управляет всей системой.

– анализатор (Analyzer) – приложение, которое предназначено анализировать, обрабатывать и визуализировать данные измерений;

– уравнивание (Adjustment) – отвечает за определение сетевых поправок, анализ деформации и сетевое моделирование.

На сегодняшний день разработаны три модуля Sentries:

– Sentries Viewer – отвечает за отображение данных мониторинга в графическом виде, и в таблицах. Имеет возможность удаленно подключаться в базам данных мониторинга;

– Sentries Web – выводит на веб-страницу данные измерений точек в числовом формате и в виде графиков, все это происходит в онлайн режиме;

– Sentries Report – автоматически выводит данные измерений в виде графиков, и таблиц формата EXCEL, автоматически составляет отчеты о выполненных измерениях и отправляет файлы на электронную почту.

Эти и многие другие программы позволяют выявить параметры вертикальных, горизонтальных смещений, деформаций и визуализировать изменения пространственно-временного состояния ИТС и их конструктивных элементов. Однако, несмотря на неоспоримые достоинства, эти программы имеют ряд недостатков:

1. Заложенные в них математические алгоритмы невозможно изменять пользователю, а во многих случаях при определении пространственно-временного состояния ИТС необходимо учитывать их индивидуальные конструктивные особенности и особенности влияния внешних факторов.

2. Большинство программ имеет модульную структуру, что значительно повышает затраты для исследования пространственно-временного состояния ИТС, т.к. для всесторонней оценки требуется подключение нескольких модулей.

3. Программные продукты имеют ограниченное количество математических алгоритмов, что затрудняет своевременно оказать необходимый комплекс мер для стабилизации пространственно-временного состояния ИТС.

Поэтому для определения и оценки ИТС необходим универсальный алгоритм, позволяющий комплексно выполнить определение пространственно-временного состояния ИТС для их безопасного функционирования (рисунок 1) [2, 3, 26-29].

На основании исследований, проведенных авторами, предложен комплексный алгоритм, который позволит унифицировать процедуру определения пространственно-временного состояния ИТС разных форм и конструкций с учетом индивидуального подбора математических алгоритмов для оценки своевременного предупреждения аварийных ситуаций.

Концептуальная схема комплексного алгоритма включает порядок действий и набор математических моделей, что позволяет определить пространственно-временное состояние конструкции ИТС любой сложности.

Геодезический мониторинг контрольных точек может производиться как автоматически (средствами автоматизированных систем мониторинга), так и в «ручном» режиме. Результатом геодезических измерений является множество временных рядов контрольных точек с координатами $X(t), Y(t), Z(t)$. В зависимости от формы, типа и задач определения изменения состояния ИТС из базы данных математических алгоритмов подбирается наиболее подходящая модель для дальнейшего анализа [4-6].

Например, для объектов с куполообразным верхом (оперный театр в г. Новосибирске, планетарий и т.п.) целесообразно аппроксимировать математической моделью сферы (рисунок 2а), для высотных объектов с основанием не большого размера (высотные здания «свечки», трубы ТЭЦ) – цилиндром (рисунок 2б), для объектов более сложной формы подойдет аппроксимация триангуляцией Делоне (рисунок 2в). Для ИТС, состоящих из множества конструктивных

элементов разной формы могут быть использованы несколько математических моделей совместно.

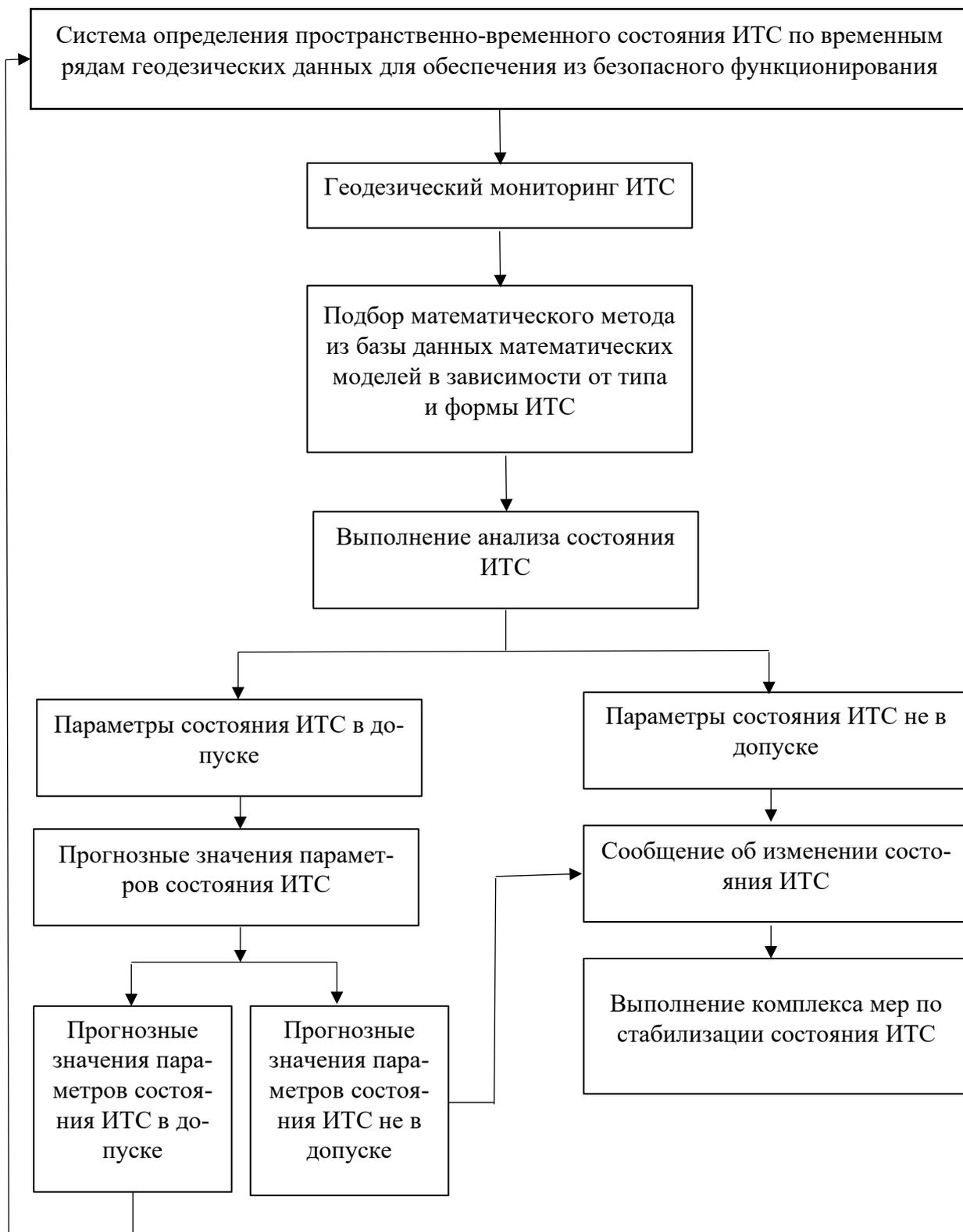


Рис. 1 Концептуальная модель универсального алгоритма определения пространственно-временного состояния ИТС

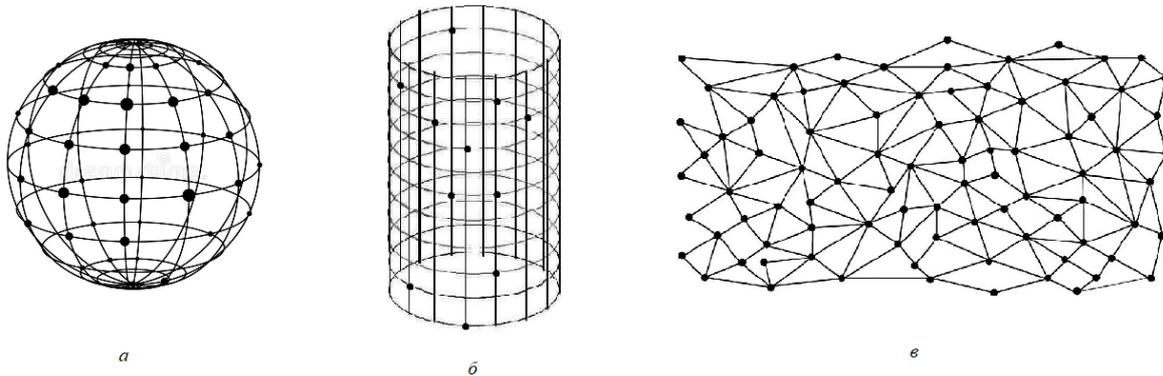


Рис. 2. Примеры геометрической интерпретации применения математических моделей

Заключение

Анализ математической модели дает возможность определить пространственное положение как всего ИТС в целом, так и его конструктивных элементов. Сравнивая параметры модели с проектными значениями и применяя прогнозные модели делается вывод о состоянии сооружения. Если прогнозируется изменение параметров состояния ИТС превышающие допустимые значения, то необходимы комплексные меры для своевременного предотвращения аварийного состояния.

Концептуальная модель алгоритма определения пространственно-временного состояния ИТС, приведенная на рисунке 1, применима для разного рода конструктивных особенностей инженерно-технических сооружений, а также для решения разных задач, связанных с определением изменения состояния ИТС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Национальный стандарт российской федерации ГОСТ Р 22.1.12-2005, Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования. Москва, ИПК, Издательство стандартов, 2005
2. Бугакова Т. Ю., Вовк И. Г. Определение вращательного движения объекта по результатам многократных геодезических измерений [Текст] // Интерэкспо Гео-Сибирь – 2013: IX Междунар. науч. конгр., 15-26 апр. 2013, – Новосибирск: СГГА, 2013. - С.88-92.
3. Бугакова Т.Ю., Кноль И.А., Интерактивный контроль пространственно-временного состояния техногенных объектов с применением технологии WEBGL// Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 4 (36). – С. 114–121.
4. Управление на базе мультиагентных систем: [Электронный ресурс] //Санкт-Петербургский государственный университет URL: <http://www.intuit.ru/studies/courses/4115/1230/lecture/24081>.
5. Бугакова Т. Ю., Шарапов А. А. Применение мультиагентного подхода для определения пространственно-временного состояния техногенных систем, XII Международный Форум «Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2016» 18 апреля 2016, Новосибирск: СГУГиТ, С. 189–194.
6. Интеллектуальные системы: от теории к технологии [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/41842/3/>- Загл. С экрана.

7. Использование GNSS оборудования [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.eft-gnss.ru/> – Загл. с экрана.
8. Карпик А. П. Проблемы геодезического обеспечения мониторинга территорий. Анализ и инновации в начале XXI столетия: сб. материалов межрегиональной междисциплинарной научной конференции . – Новосибирск: СГГА, 2012. – С. 13–20.
9. Карпик А.П. Анализ состояния и проблемы геоинформационного обеспечения территорий. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2014. № 4. С. 3-7.
10. Хиллер Б., Ямбаев Х.К. Разработка и натурные испытания автоматизированной системы деформационного мониторинга // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 48–61.
11. Мазуров Б.Т. Геодинамические системы (кинематические и деформационные модели блоковых движений) // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 3 (35). – С. 5–15.
12. Vorobev A.V., Shakirova G.R. Web-Based Geoinformation System for Exploring Geomagnetic Field, Its Variations and Anomalies. Geographical Information Systems Theory, Applications and Management. Volume 582 of the series Communications in Computer and Information Science, 2016, pp. 22-35.
13. Brian J. Coutts. Redefining the Profession of Land Surveying: A First Step. TS01E -Surveying Today and Tomorrow -6558. FIG Working Week 2013 Environment for Sustainability Abuja, Nigeria, 6-10 May 2013.
14. Коичи Мацуда, Роджер Ли, WebGL: программирование трехмерной графики / Пер. с англ. Киселев А. Н. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 494 с.: ил. С. 17.
15. Роберт Лафоре. Структуры данных и алгоритмы JAVA. Питер, 2013.
16. Neuner H., Schmitt C., Neumann I.: Modelling of terrestrial laser-scanning profile measurements with, Proceedings of the 2nd Joint international Symposium on Deformation Monitoring, Nottingham, England, 2013.
17. François Mazuyer and Marc Vanderschueren. TS01E -Surveying Practice across the world -6676. FIG Working Week 2013 Environment for Sustainability Abuja, Nigeria, 6-10 May 2013
18. Studies on the static and dynamic behavior of the Sayano-Shushenskaya arch gravity dam/A. I. Savich, V. I. Bronshtein, M. E. Groshev, E. G. Gaziev, M. M. Il'in, V. I. Rechitskii//International Journal on Hydropower and Dams. 2013. Vol. 20. № 6. Pp. 453-58.
19. Ghiasian M., Ahmadi M.T. Effective model for dynamic vertical joint opening of concrete arch dam//Proc. of the int. symp. on dams for a changing world-80th annual meet. and 24th cong. of ICOLD. Kyoto, Japan. 2012. Pp. (4) 41-46.
20. GPS for geodesy. Teunissen P.J.G., Kleusberg A. (Eds.). – Berlin: Springer, 1998 – 650 p. – Англ.
21. F. Zarzoura, R. Ehigiator -Irughe, B. Mazurov. Utilizing of Mathematical Frame Work in Bridge Deformation Monitoring Asian Journal of Engineering and Technology (ISSN: 2321 -2462) Volume 02 -Issue 04, August 2014. -Pp. 293-300.
22. Geologic-engineering and geomechanical models of the rock mass in the bed of the dam at the Sayano-Shushenskaya HPP/A. I. Savich, M. M. Il'in, V. P. Elkin, V. I. Rechitskii, A. B. Bасова//Power Technology and Engineering. 2013. Vol. 47. № 2. Pp. 89-101
23. Carcanague S., Julien O., Vigneau W., Macabiau C., Hein G. Finding the right algorithm - Low-Cost, Single-Frequency GPS/GLONASS RTK for Road Users//Inside GNSS. 2013. Vol. 8, No. 6. P. 7-80.
24. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS -Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo and more. -Wien, New-York: Springer. -2008. -516 p.
25. Mazuyer F., Vanderschueren M. TS01E -Surveying Practice across the world -6676 // FIG Working Week 2013 Environment for Sustainability (6–10 May). – Abuja, Nigeria, 2013.
26. Бугакова Т. Ю. Моделирование изменения пространственно-временного состояния инженерных сооружений и природных объектов по геодезическим данным // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 34–42.

27. Бугакова Т. Ю., Шляхова М. М., Кноль И. А. Структурная декомпозиция объекта методами математического моделирования с последующей визуализацией на основе WebGL. Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр., 18–22 апреля 2016 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск: СГУГиТ, 2016. – 244 с. – С. 142–147

28. Tatiana Bugakova, Artem Sharapov . Modeling of a prototype multi-agent system monitoring man-made objects// Engineering Studies, Issue 3 (2), Volume 8. “Taylor & Francis”, 2016. - Pages C.430–440.

29. Tatiana Bugakova, Ivan Knol. Interactive monitoring of space-time state man-made objects of technology WebGL// Engineering Studies, Issue 3 (2), Volume 8. “Taylor & Francis”, 2016. - Pages C.532–545.

© Е. Ф. Голубь, Т. Ю. Бугакова, 2022