

Н. К. КАПУСТЯН, д-р физ.-матем. наук, проф., гл. специалист,  
Е. А. РОГОЖИН, д-р геол.-минерал. наук, проф., зам. директора по науке  
(ФГБУН Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва),  
Р. Т. АКБИЕВ, канд. техн. наук, руководитель научно-методического центра  
(ФГБУ ЦНИИП градостроительства РААСН, Москва)

## ЭКСПЕРТНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА И МОНИТОРИНГ ТЕХНОГЕННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В МЕСТАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ МОЩНЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ (НА ПРИМЕРЕ ЧИРКЕЙСКОЙ ГЭС)

В работе приведены результаты наблюдений при опытной эксплуатации системы мониторинга Чиркейской ГЭС (Россия, Республика Дагестан). Рассмотрен набор записей «аномальных» пусков агрегатов гидроэлектростанции, параметры колебаний которых сопоставимы с сильными землетрясениями. Приведена некоторая статистика техногенных динамических воздействий на плотине в течение 1 года. Зафиксированы 5 событий, соответствующих по интенсивности землетрясениям до 5 баллов по шкале MSK-64. Характерно, что ни одно из указанных воздействий не проявилось в виде проявлений соответствующих последствий (разрушений, повреждений и пр.).

Ключевые слова: аномальный пуск, вибрация, воздействие, гидрогеологическая безопасность, градостроительная безопасность, землетрясения, интенсивность, мониторинг, сейсмичность, сейсmobезопасность, техногенный, экспертно-аналитическая оценка.

### Введение

Известно, что градостроительная безопасность в районах с расположением гидроэлектростанций неразрывно связана с проблемами обеспечения гидрологической и сейсмической безопасности.

Экспертно-аналитические исследования данного направления незначительны.

Результаты исследований по тематике «Возможность виброконтроля агрегатов ГЭС сейсмическими методами», приведенные в настоящей статье, призваны исправить сложившуюся ситуацию.

Представленные в статье данные получены в результате экспертно-аналитической оценки материалов отчета, который направлен в ОАО «РусГидро» с сопроводительным письмом Федерального бюджетного учреждения науки Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН от 09.10.2013 г. № 13106-10-1253.2/236.

Отчет выполнен по материалам научно-технического сопровождения аппаратурно-методической разработки ИФЗ РАН «Система сейсмологического контроля Чиркейской ГЭС», использованной при создании «Системы сейсмологического мониторинга Чиркейской ГЭС» на основании договора, заключенного

с ООО «НТЦ Спецпроект» № 21-ТПиР-2011-ДФ «Создание системы сейсмологического мониторинга на Чиркейской ГЭС для нужд филиала ОАО «РусГидро» — «Дагестанский филиал».

На момент публикации система сейсмологического мониторинга Чиркейской ГЭС находится в опытной эксплуатации более 1 года, в связи с чем, получены обширные материалы по непрерывной регистрации колебаний системой мониторинга, имеющие научную ценность.

Результаты настоящей публикации предлагается рассматривать как аналитическую справку, в которой представлены материалы дополнительной обработки и систематизации данных по проблеме, связанной с анализом отклонений

от штатной работы агрегатов с использованием сейсмометрических датчиков на плотине Чиркейской ГЭС.

### Результаты экспертно-аналитических исследований

Отклонения от штатной работы агрегатов Чиркейской ГЭС выявляются в режиме реального времени на записях как датчиков на плотине, так и в машинных залах.

В отчете, направленном в ОАО «РусГидро» по результатам мониторинга плотины Чиркейской ГЭС показаны составленные соответствующим образом датчики на плотине, которые позволяют изучать совместную работу системы «агрегат-водовод», где проявляются низкочастотные колебания (НК), уверенно регистрируемые датчиками на плотине, в том числе на отметке 315 м (рис.2).

В процессе экспертно-аналитической оценки, результаты которых представлены ниже, был рассмотрен набор записей пусков агрегатов, среди которых отмечены «аномальные» пуски, представленные как бы несколькими повторными пусками, следующими друг за другом (рис.2). Такие явления кратковременны, их длительность,



Рис.1. Внешний вид высотной плотины Чиркейской ГЭС с размещением основных пунктов регистрации (треугольники)

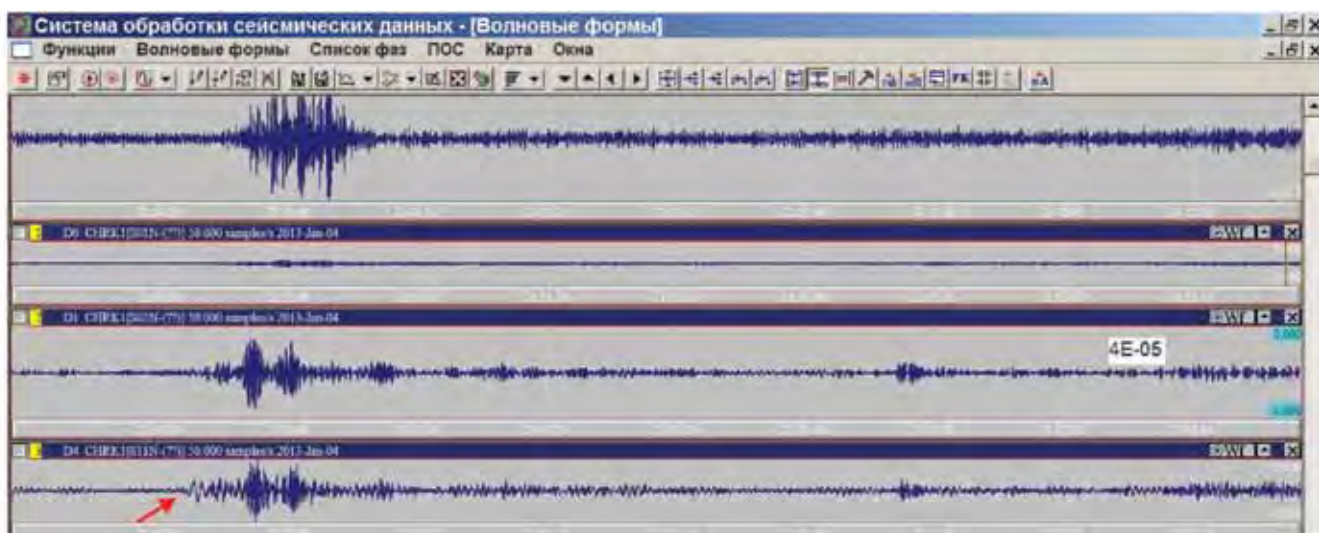


Рис.2. Пример «аномального» пуска агрегата (запись в машинном зале и на отметке 315, стрелка — НК)

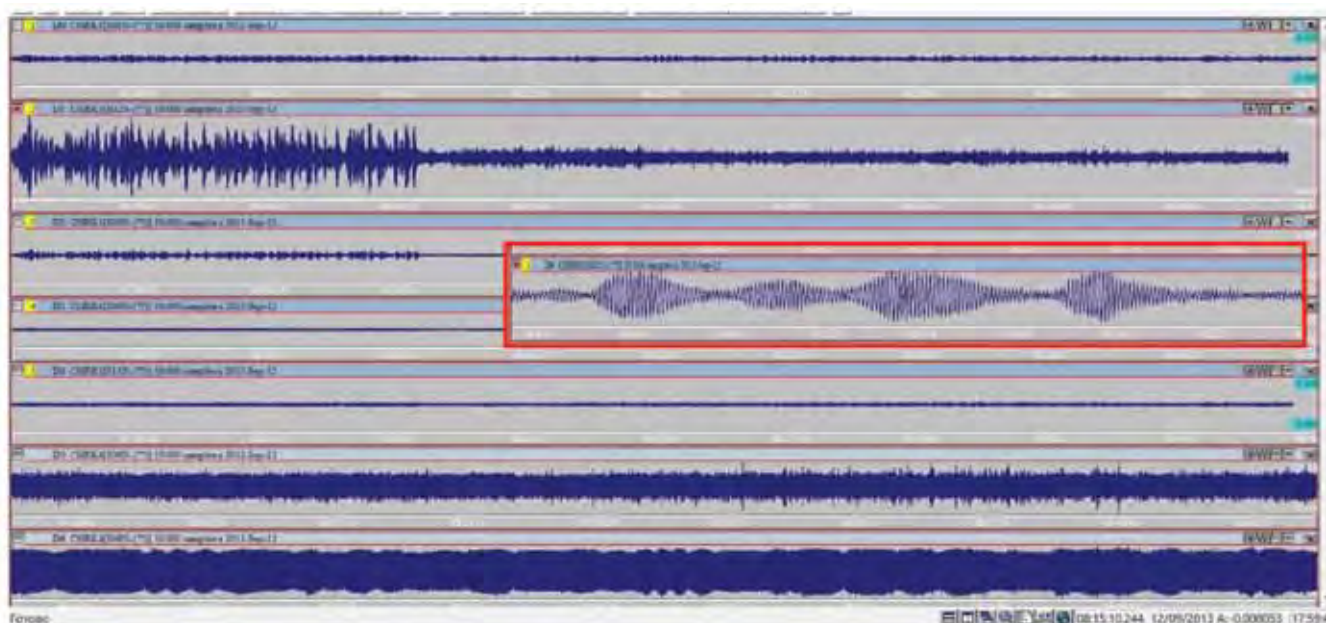


Рис.3. Пример записи нештатной работы агрегата: амплитуды в машинном зале уменьшены; наиболее сильная вибрация отмечается на ст.2, отметка 315 м. На врезке приведена развертка записи на ст.2, радиальная компонента колебаний.

как правило, составляет несколько минут и менее 1 часа.

Другой пример (рис.3) относится к нештатной работе агрегата, вызывающей цуги колебаний на частотах 2 и 4 Гц, т.е. в режимах колебаний, близких к собственным частотам плотины.

В связи с тем, что подобные колебания вызывают резонансное возбуждение плотины, причем могут длиться до нескольких часов, была поставлена задача изучения этого явления и оценка сейсмических воздействий на плотину, вызываемых такими техногенными динамическими колебаниями в системе агрегат-водовод.

Для решения этой задачи был рассчитан с интервалом в 1 час временной ход амплитуд колебаний на частотах 2 и 4 Гц для точек на отметке 315,0 м, в береговых примыканиях и в машинных залах.

На рис.4 приведен участок такого временного хода для ст.3 (у водовода №4) на частоте 2 Гц — в этой точке колебания, как правило, наибольшие на отметке 315.

Из рис.4 видно, что на исходной кривой (синей) отмечаются быстрые временные вариации (типа выбросов) и тренды — среднemasштабный — суточный ход (красная линия, сглаживание исходной кривой по 24 часам) и медленный тренд (черная кривая, сглаживание по 10 суткам

для исключения недельного хода). Путем вычитания медленного тренда получен ход быстрых и среднemasштабных по времени вариаций (серая кривая).

Было получено более 8000 значений, которые позволяют оценить статистические характеристики процесса появления техногенного динамического возбуждения колебаний (вибраций) на плотине.

Распределение значений амплитуд показано на рис.5, которое демонстрирует наложение двух процессов — нормально-го распределения (серая кривая, вибрации естественного происхождения) и распределения Пуассона, типичного для техногенных выбросов. Таким образом, становится

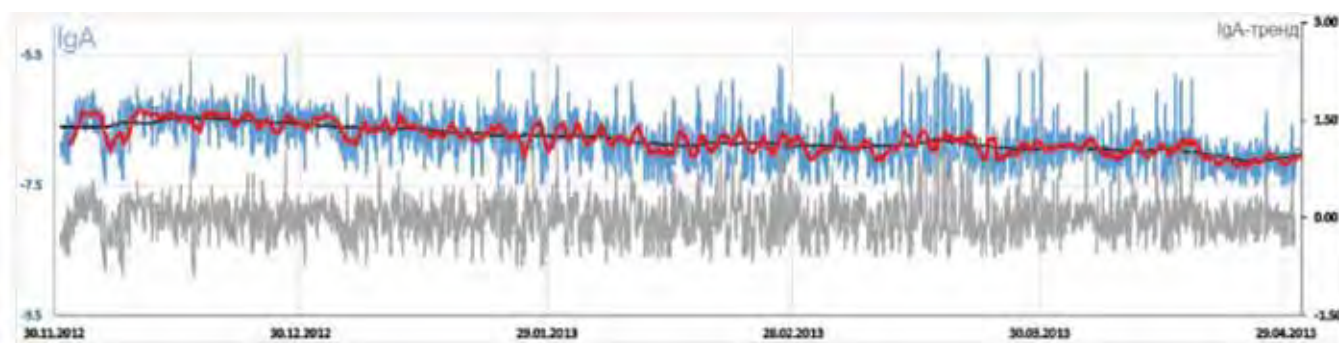


Рис.4. Пример участка временного хода амплитуд собственных колебаний плотины:  
синяя — исходная кривая;  
красная — сглаживание по 24 часам;  
черная — сглаживание по 10 дням;  
серая — вычитание медленного тренда.

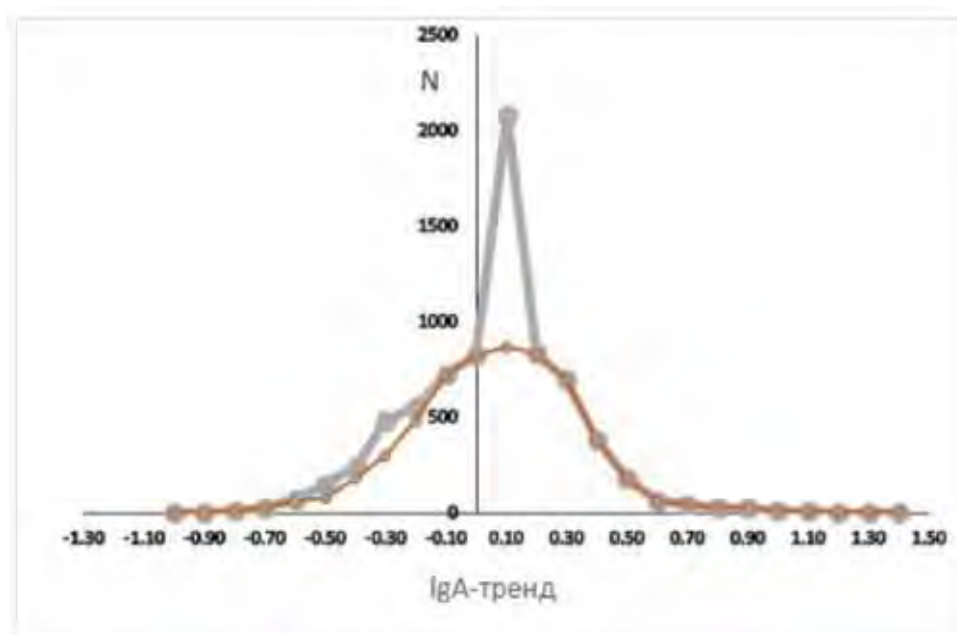


Рис.5. Распределение амплитуд временного хода собственных колебаний (кривые):  
серая — исходное распределение;  
коричневая — Пуассоновская часть.

очевидным, что появление выбросов — не ошибка аппаратуры, а свойство системы плотина-агрегат-водовод.

Получение вида распределения позволяет выбрать из всего количества выбросов «аномальные», т. е. такие, для которых величины амплитуд колебаний составляют более 2σт.е. в данном случае (lgA-тренд) = 0.55.

На рис.6 показан тот же участок кривой, что и на рис.4, но отмечены моменты и величины отобранных выбросов. Очевидно, что такие выбросы имеют тенденцию к группированию.

При проведении экспертно-аналитической оценки из всей совокупности отобранных выбросов оставляются те, для которых длительность действия составляет более 2 часов. Длительность колебательного процесса менее значения указанного промежутка времени оце-

нивается как возможность регистрации «простых» пусков агрегатов. На рисунке выбранные длительные явления отмечены черными звездочками.

Анализ полученной совокупности аномальных вибраций плотины позволяет произвести некоторую условную классификацию (табл.1).

В табл.1 для оценки сейсмических воздействий на плотину от техногенной вибрации была использована формула Ф. Ф. Аптикаева для расчета балльности  $I$ :  
$$I = 2.75 (\lg A + 0.5 \lg t), \quad (1)$$

где  $A$  — амплитуда ускорений в  $\text{см}/\text{с}^2$ ,  
 $t$  — длительность воздействия в секундах.

Заметим, что формулу (1) используют, как правило, для оценки интенсивности (в баллах) сейсмического воздействия при более коротких воздействиях.

Учитывая результаты теоретических и экспериментальных исследований, каса-

ющихся вибрационных испытаний сооружений, показывают, что при длительном воздействии включаются механизмы неупругой и (или) нелинейной работы, которые проявляются в виде трещин, разрывов, иных повреждений, приведенные выше оценки для плотины можно считать как «нижние».

Оценка техногенных динамических воздействий приведена на рис.7, где для нормальных (синий цвет) и аномальных (красный цвет) пусков установлена взаимосвязь между расчетной сейсмичностью и длительностью колебаний при вибрациях.

Согласно представленным данным, «нормальная» вибрация при долгих пусках (№3) может рассматриваться как соответствующая 5-балльному (сильному) землетрясению, а сверхдлгое воздействие с аналогичными параметрами мо-

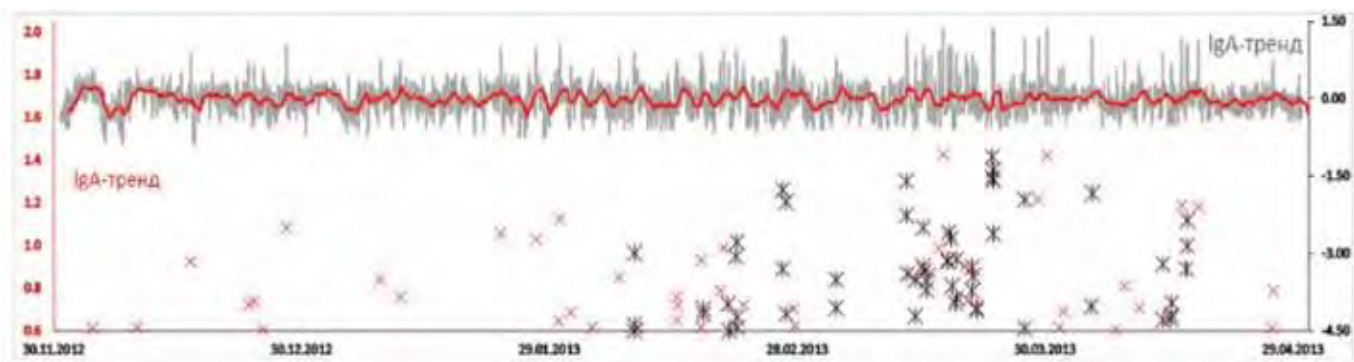


Рис.6. Пример участка временного хода амплитуд собственных колебаний плотины:

кривые: серая — вычитание медленного тренда; красная — сглаживание по 24 часам; маркеры: красные — события с амплитудами, большими  $2\sigma$ ; черные — с длительностью более 2 (двух) часов.

жет рассматриваться как воздействие, соответствующее по силе «катастрофическому» землетрясению.

При «аномальных» пусках (№5) воздействие также было достаточно сильным (оценивается как воздействие силой более 4 баллов). При затянувшихся пусках такое воздействие может также рассматриваться как соответствующее «катастрофическому».

В процессе проведения экспертно-аналитической оценки подсчитана статистика «сильных сейсмических событий» (табл.1), в результате чего получено, что на плотине за период наблюдений (один год) зафиксировано 5 техногенных динамических воздействий интенсивность которых может быть оценена в 5 баллов по шкале MSK-64.

Характерно, что ни одно из рассматриваемых воздействий не проявилось в виде соответствующих последствий (разрушений, повреждений и пр.), которые были выявлены в результате анализа ранее известных и происшедших за последние десятилетия сильных и катастрофических землетрясений.

**Заключение**

В статье приведены результаты наблюдений и экспертно-аналитической оценки, полученные в процессе опытной эксплуатации системы мониторинга, установленной на Чиркейской ГЭС (Россия, Республика Дагестан).

Рассмотрен набор записей «аномальных» пусков агрегата гидроэлектростанции, приведена статистика техногенных сейсмических событий на плотине в течение 1 года, когда было зафиксировано 5 событий, соответствующих по интенсивности сейсмическим воздействиям в 5 баллов по шкале MSK-64. Характерно,

Таблица 1.  
**Условная классификация и параметры техногенных динамических воздействий на плотину Чиркейской ГЭС по данным сейсмологического мониторинга**

Тип	Описание пуска	A, см/с <sup>2</sup>	Время, ч	I, балл	Кол-во, шт.
1	Нормальный	0.0025/0.01	<1	0	136
2	Затянутый (затянувшийся)	0.0025	2	2.7	19
3	Долгий	0.0025	2.5	5.1	3
4	Сверхдолгий	0.0025	3/3.5	7.8/9.9	1/0
5	Аномальный	0.01	2	4.3	14
6	Аномальный затянутый	0.01	2.5	6.6	2
7	Аномальный сверхдолгий	0.01	3	10	0

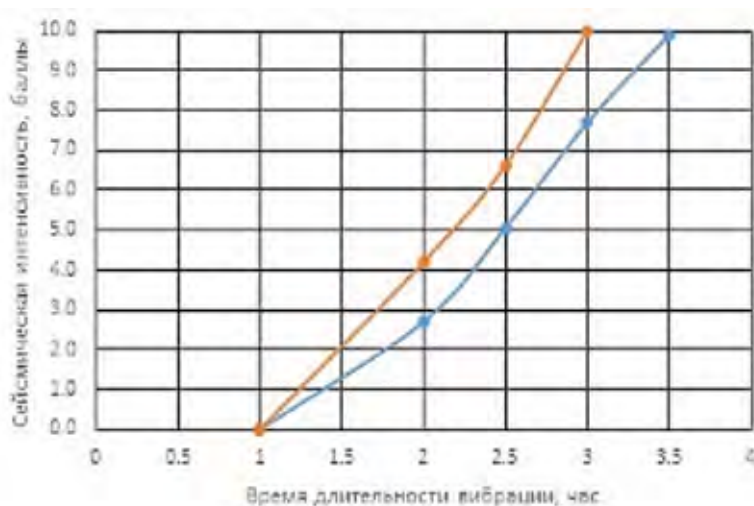


Рис.7. Оценка (в баллах) воздействия на плотину длительных техногенных динамических воздействий — вибраций (кривые): синяя — для «нормальной» амплитуды; красная — для «аномальной» амплитуды колебаний.

что ни одно из указанных воздействий не проявилось в виде соответствующих последствий (разрушений, повреждений и пр.).

Полученные в результате экспертно-аналитические оценки «аномальных»

для Чиркейской ГЭС пусков (техногенных динамических событий) являются важными, подлежащими учету при проведении оценки сейсмического риска и уязвимости объектов.

Очевидно, что системные исследо-

вания данного направления необходимо продолжить, распространить на изучение других аналогичных объектов, в том чис-

ле расположенных в несейсмических районах Российской Федерации.

Проводить исследования данного

направления предлагается в рамках отраслевых целевых программ и (или) специальных проектов.

Контактная информация: ФГБУН Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, 123995, ГСП-5, Москва Д-242, Б. Грузинская ул., 10, стр. 1. E-mail: nkarustian@gmail.com.

eng

Karustian N. K., Rogozhin Ye. A., Akbiev R. T.

## THE EXPERT-ANALYTICAL ASSESSMENT AND MONITORING OF TECHNOGENIC SEISMIC EVENTS IN THE LOCATIONS OF POWERFUL HYDROELECTRIC POWER STATIONS (ON THE EXAMPLE OF CHIRKEISK GES)

*The paper describes the results of observations during the trial operation of the system of monitoring Chirkeisk GES (Russia, Republic of Dagestan). A set of records «abnormal» launches hydroelectric units, parameters of oscillations which are comparable to strong earthquakes was reviewed. See some statistics technogenic dynamic effects on the dam within 1 year. 5 events were fixed relevant to the intensity of earthquakes up to 5 points according to MSK-64 scale. It is typically that none of the above impacts are manifested in the form of manifestation of relevant impacts (destruction, damage, etc.).*

*Key words: «abnormal» launch, vibration, impact, hydrogeological safety, urban development safety, earthquakes, intensity, monitoring, seismicity, seismic safety, technogenic, expert-analytical assessment.*

### ПОРЯДОК ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ СТАТЬИ

Уважаемые авторы, при направлении рукописей статей для опубликования просим соблюдать следующие требования:

1. Объем статей не должен превышать 10 страниц машинописного текста (10-20 тыс. знаков).
2. Текст статьи должен быть набран на компьютере с использованием текстового редактора Microsoft Word (в формате \*.doc или \*.rtf) без расстановки переносов.
3. В начале статьи указывается: название статьи; инициалы и фамилии авторов; ученая степень, звание, должности авторов, организация, в которой была проведена работа. (Автор, по желанию, может предоставить свою фотографию в формате \*.tiff, \*.jpg)
4. Обязательно прилагается аннотация к статье из 5-8 строк и ключевые слова на русском языке (по возможности и на английском языке).
5. Цитируемая в статье литература приводится в виде списка. В тексте в квадратных скобках дается ссылка на порядковый номер списка. Библиографические ссылки оформляются в соответствии с ГОСТ 7.0.5-2008 «Библиографическая справка. Общие требования и правила составления».
6. После списка литературы обязательно указывается контактная информация: «Материал хранится в ...» (полный почтовый адрес организации/автора и телефон, при наличии — адрес электронной почты).
7. Иллюстрации (фотографии, рисунки, графики, диаграммы и др.) представляются только в графических редакторах в формате \*.eps, \*.tif, \*.jpg, \*.cdr, \*.xls с разрешением от 300 dpi. Подписанные подписи обязательно и могут быть приведены в конце текстового блока статьи. Обозначения по осям графиков и внутририсуночные надписи должны быть четкими и хорошо читаемыми. Натурные рисунки и фотографии должны быть хорошего контрастного качества. Графики, диаграммы, схемы и т.п. иллюстрации сделанные в Microsoft Excel должны быть сгруппированы. Все иллюстрации прилагаются отдельными файлами. Иллюстрации в формате \*.doc (Word) к публикации не принимаются!
8. Таблицы должны быть напечатаны с минимальными размерами строк и столбцов и вставлены в текст статьи. Все наименования в таблицах даются полностью без сокращения слов.
9. Математические формулы и выражения должны быть записаны в Microsoft Word или с помощью редактора Microsoft Equation 3.0. Отдельные символы и специальные знаки записываются с помощью Microsoft Word опции «вставка-символ».
10. Все условные обозначения в тексте, таблицах, иллюстрациях приводятся в системе СИ.
11. Не использовать подстрочные сноски в связи с трудоемкостью их расстановки при наборе и верстке текста.
12. Статьи принимаются в электронном виде на любом носителе информации или присылаются по электронной почте.
13. К статье должно прилагаться рекомендательное письмо от организации, которую представляет автор.
14. Представленная автором статья рецензируется экспертным научно-техническим советом журнала.
15. Публикация научно-технических статей в журнале для аспирантов бесплатная.
16. Статьи могут быть направлены в редакцию: почтовый адрес — 111024, Москва, ул. Душинская, 9, ООО «Издательский дом «ГРАД-ИНФО» e-mail: [editor@grad-info.com](mailto:editor@grad-info.com) | тел./факс: +7 (495) 361234 1