

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ УСТАНОВОК ЦЕНТРОБЕЖНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ (ЧАСТЬ 01 ИСТОРИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ)

Зайцев А.А.

21 января 2019 г.

Аннотация: В данном препринте, открывающем серию работ, приводятся сведения об истории метода физического моделирования на установках геотехнических центрифугах (centrifuge modelling) получившего значительное развитие настоящее время в мире. Начало этого метода исследований которого исходит отчитывается от работ отечественных ученых в области геотехнических исследований, гидротехники, проектировании и эксплуатации железных дорог, горно-добывающей промышленности и др.

Ключевые слова: физическое моделирование, установки центробежного моделирования, технологии, история, centrifuge modelling, строительство, геотехника, земляное полотно.

ВВЕДЕНИЕ

Применение установок центробежного моделирования в настоящее время получило большое развитие.

При упоминании таких установок сразу вспоминается информация об испытаниях на центробежных установках космонавтов (рисунок 1).

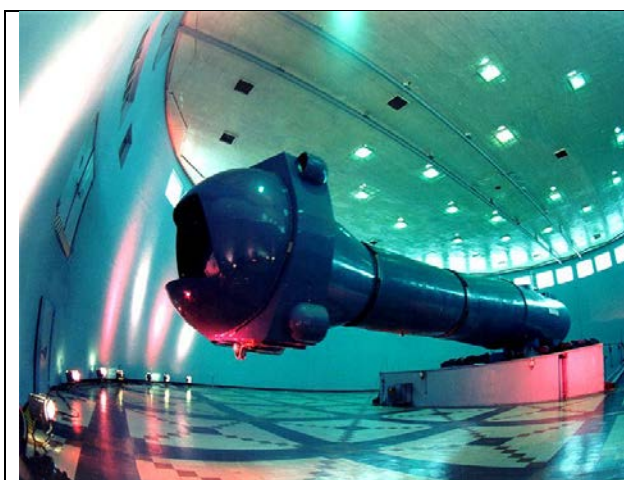


Рисунок 1 2002 г. ATLAS aerospace
(Центр Подготовки Космонавтов)
http://www.atlasaerospace.net/centr_tech.html Atlas aerospace
Характеристики установки
1. Радиус вращения 7 м 2. Максимальная перегрузка 20 g
3. Максимальный градиент перегрузки 7 g/c 4. Максимальная угловая скорость 50.7 об./мин.
5. Мощность привода
-номинальная 1280 кВт
-пусковая 820 кВт

На такой установке «посадка в кабину осуществляется через боковой люк. Перед лицом испытуемого установлены дуга с лампочками и видеокамера. Во время эксперимента имеется возможность проверить

остроту зрения и время реакции испытуемого. С помощью системы управления испытатель может задавать перегрузку и управлять спускаемым аппаратом. Контроль за состоянием испытуемого осуществляется врачебной группой с использованием телеметрической информации (ЭКГ, пневмограммы, температуры тела и т.д.), двусторонней голосовой связи и видеоинформации. [Atlas aerospace].

В этом препринте речь идет о другой теме - изложена информация по истории центробежного моделирования в геотехнике, физического моделирования сооружений из грунта, конструкций, взаимодействующих с грунтом и т.п., в том числе на основе опыта работы на геотехнической центробежной установке Российского университета Транспорта.

1. ОБ ИСТОРИИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ: ВОПЛОЩЕНИЕ ИДЕИ

1.1. Сущность метода центробежного моделирования

Идея о возможности использования сил инерции использования инерционных сил в моделировании конструкционной устойчивости и долговечности мостов была высказана в XIX веке французским инженером и математиком Эдуардом Филлипсом в 1869г. Филлипс (рисунок 2) в 1869 г.

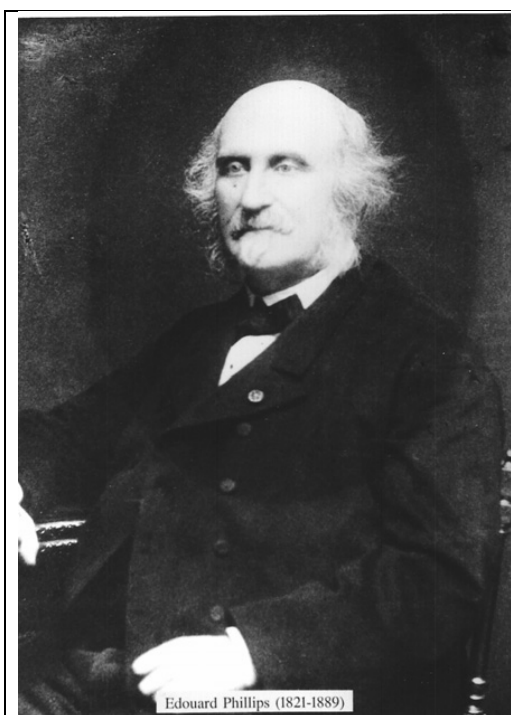


Рисунок 2 Эдуард Филлипс
(Edouard Phillips)

(Collection Ifsttar, formerly LCPC,
Centre de Nantes, [Craig W. H. et al
2015])

Центробежное моделирование как метод изучения различных процессов в горных породах и грунтовых сооружениях появился в начале XX века в связи с бурным ростом строительства массивных инженерных сооружений и необходимостью практического решения вопросов о давлениях

грунта на сооружения, устойчивости откосов под воздействием собственного веса, исследований несущей способности грунтов и других вопросов.

Сущность метода центробежного моделирования заключается в том, что моделирование работы грунтовых сооружений при проведении испытаний в обычном гравитационном поле не может привести к правильным результатам, поскольку нарушается подобие напряжений от сил собственного веса, которые являются доминирующей нагрузкой в геотехническом проектировании напрямую связанной с поведением грунтовой массы.

На рисунке 3 показаны результаты расчетов напряжений по формулам линейной теории упругости для прямоугольного блока (прототип – вариант 1) 10.6×20.0 при действии прямоугольной полосовой нагрузки 80 кПа.

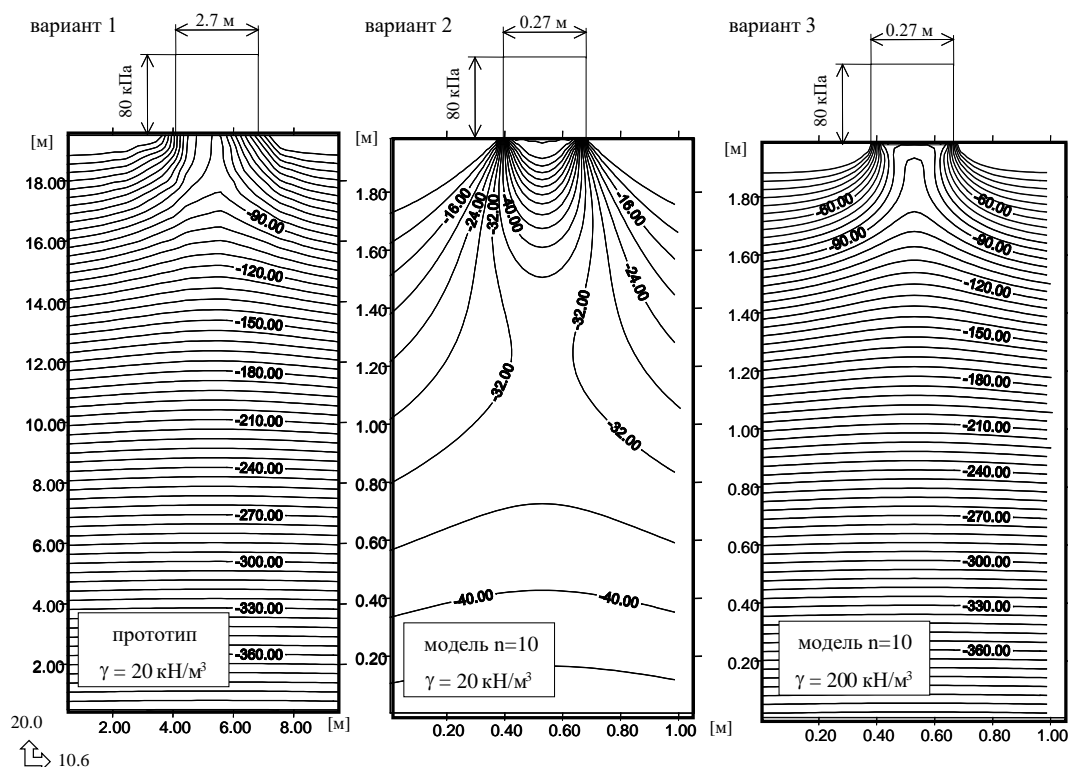


Рисунок 3 – Вертикальные напряжения от нагрузки и собственного веса грунта для прототипа и модели

Сравнение суммарных напряжений от собственного веса и полосовой нагрузки для прототипа (вариант 1) и его уменьшенной в 10 раз модели (вариант 2) показывает, что во втором случае, напряжения вызванные нагрузкой значительно больше, чем от сил гравитации.

Для того, чтобы уравнивать напряжения в модели необходимо поместить модель в гравитационное поле в 10 раз большее чем у прототипа (вариант 3). Такого эффекта можно достичь только с использованием поля центробежных сил, приложенных к модели [Яковлева Т.Г., Иванов Д.И., 1980], [Oshima. A., Takada, N. and Mikasa, M. 1991].

1.1. Основатели метода центробежного моделирования и их исследования

Метод центробежного моделирования впервые создан в СССР в начале 30-х годов благодаря работам Н.А.Наседкина и Г.И.Покровского [Покровский Г.И., Федоров И.С. 1968]. Конкретные предложения по реализации идеи использования центробежной силы инерции для осуществления моделирования сооружений из грунта в нашей стране поступили примерно одновременно от Г.И. Покровского и Н.Н.Давиденкова. Первое было реализовано в Москве в 1932 г. в лаборатории механики грунтов Института гидротехники и гидрогеологии в связи с решением ряда конкретных задач в области гидротехнического строительства и, в частности, решением вопроса о проверке устойчивости откосов деривационного канала между реками Волгой и Усой по проекту строительства Куйбышевской гидроэлектростанции довоенного периода (спрямление Самарской Луки).

Была построена первая в СССР центробежная машина как установка для моделирования различных процессов в грунтах и горных породах.

В США в то же время инженер Филипп Бакки [Bucky P.B. 1934] применил центрифугу для изучения вопросов устойчивости горных выработок, используя центробежную машину при линейном масштабе моделирования $n = 1268$.



Рисунок 4 Фотопортреты основоположников физического моделирования в СССР и США

Покровский Георгий Иосифович и Федоров Илья Сергеевич в период с 30х по 60е годы выпустили ряд монографий на тему центробежного моделирования, в том числе:

- 1939 монография «Моделирование прочности грунтов», в работе были освещены вопросы: методы осуществления подобия (напряжения в грунте, поле сил, моделирование во времени), конструкции центрифуг (рисунок 5, исследований устойчивость откосов (в том числе для деривационных каналов гидроэлектростанций), применения киносъемки (изучение деформаций моделей), исследований напряжений в грунте под фундаментами, моделирование удара и взрыва.

- 1953 Центробежное моделирование для решения инженерных задач,

- 1968 Центробежное моделирование в строительном деле,

1969. Центробежное моделирование в горном деле,

1979 совместно с Г.А.Алиевым Теория и практика центробежного моделирования в горном деле

Федоров Илья Сергеевич с коллективом авторов (В.Г.Мельник, Тейтельбаум А.И., Саввина В.А.): 1984 Теория и практика центробежного моделирования в строительстве.

В дальнейшем широкое применение для решения различных инженерных и исследовательских задач центробежное моделирование нашло в СССР, где в 30-х, а затем в 60-х годах был построен целый ряд центробежных машин различной мощности.

В СССР были построены центробежные установки в ВОДГЕО, НИОСПе, ЦНИИСе, Гидропроекте, МИИТе (Москва), в Институте Сейсмического строительства (Баку), ДИИТе (Днепропетровск, Украинская ССР) и других промышленных городах СССР.

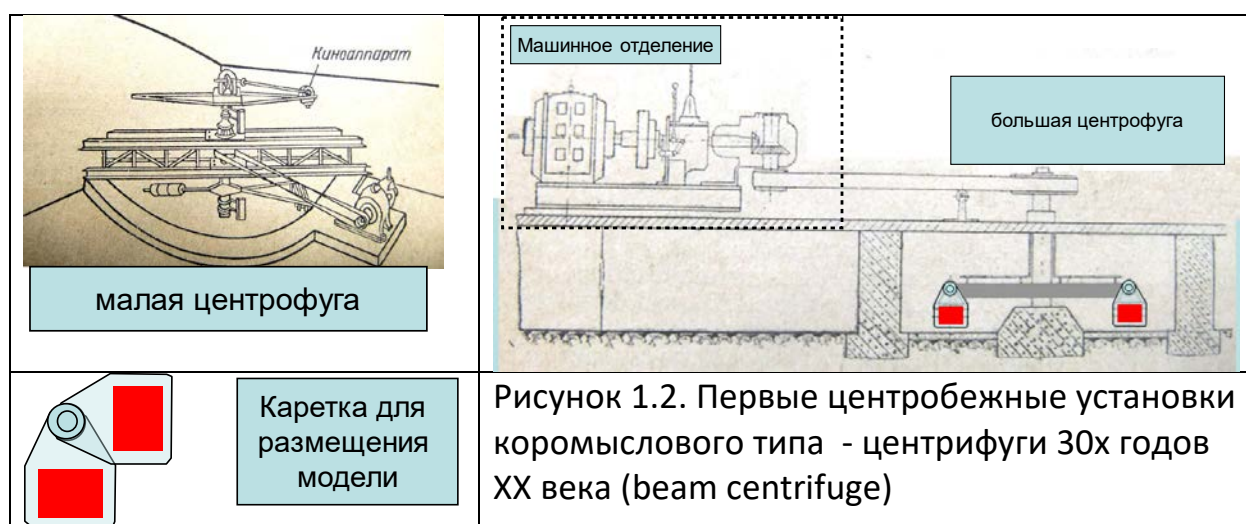


Рисунок 5 Центрифуги 30-х годов XX века

Работы по физическому моделированию устойчивости откосов

В данных исследованиях установлено значение устойчивого откоса для увлажненного песка в 37 градусов, с доведением до разрушения и замерами

устойчивой части откоса, оценки деформации скашивания и обрушений в виде конуса, в форме постепенного уположения до устойчивого состояния и моделирования устойчивости откосов канала Доно – Волжской ГЭС (1938 г.) [Покровский Г.И., Федоров И.С.1939].

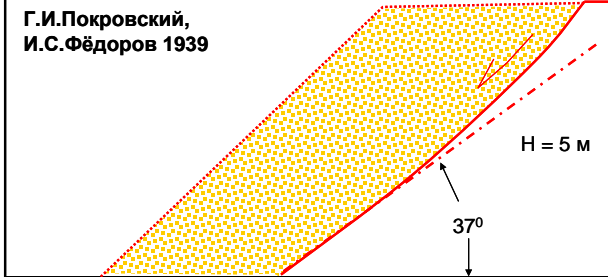
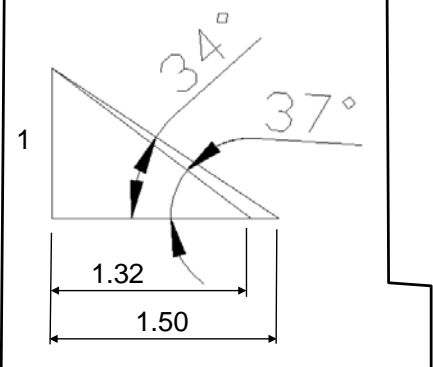
<p>Г.И.Покровский, И.С.Фёдоров 1939</p> 	
<p>Моделирование водонасыщенного откоса из песка для определения угла устойчивого откоса</p>	<p>Треугольник демонстрирующий устойчивый откос</p>

Рисунок 6 – Моделирование устойчивости откосов

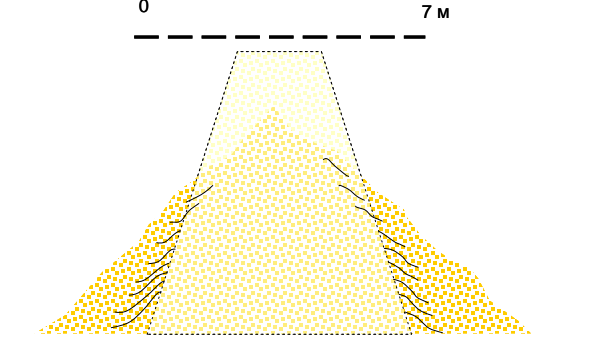
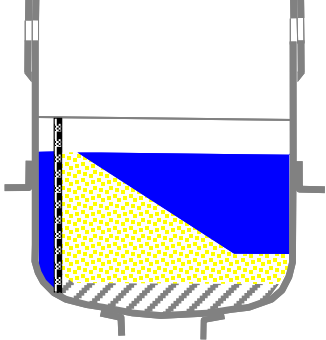
	
<p>деформации скашивания и обрушений в виде конуса, в форме постепенного уположения до устойчивого состояния</p>	<p>Прототип: откос канала с заложением 3,5 при высоте 38,7 м грунт: песок мелкий</p> <p>Схема положения образца в каретке центрифуги при исследовании устойчивости канала</p>

Рисунок 7 – Моделирование устойчивости откосов канала Доно – Волжской ГЭС (1938 г.) [Покровский Г.И., Федоров И.С.1939]

1.2. Развитие метода центробежного моделирования в РУТ (МИИТ) в сфере исследований нижнего строения железнодорожного пути – земляного полотна (в период 1962 – 1997 г.г.)

В 40-е-60-е годы в СССР было построено несколько десятков центробежных установок, которые позволили решать целый ряд важнейших проблем по вопросам прочности и устойчивости плотин, земляного полотна железных и автомобильных дорог, бортов карьеров и пр. Наиболее эффективно использовались центрифуги в НИИОСПе, ВОДГЕО, Гидропроекте, ЦНИИС Минтрансстроя, МИИТе (сейчас Российский Университет Транспорта), ДИИТе (Украинская СССР).

Было обеспечено научно-техническое обоснование конструкций, исследованы прочность, устойчивость, трещиноватость ряда гидротехнических сооружений (ВОДГЕО и Гидропроект), обоснованы нормы плотности грунтов для железнодорожных насыпей, типовые поперечные профили насыпей на болотах из местных грунтов при строительстве железных дорог в Западной Сибири: линий Тюмень-Сургут, Сургут-Уренгой и другие вопросы строительства и эксплуатации грунтовых сооружений [Яковлева Т.Г. и Иванов Д.И. 1980].

Таблица 1 Характеристики отечественных центробежных установок

Организация – обладатель	Эффективный радиус R , м	Объем кареток, m^3	Макс. частота вращения, об/мин	Макс. центробежное ускорение, g
ВИОС (1935-1942 г.г.)	2.0	0.052	190	20
Строительство канала Москва-Волга (1933-1938 гг.)	2.0	0.052	200	75
ВНИИВОДГЕО (1938-1947 гг.)	1.5	0.117	260	100
АзНИИСМиС им. С.А.Дадашева (1947-1952 гг.)	2.25	0.225	230	82
ВНИИВОДГЕО (проект 1950 г.)	2.3	0.160	315	250
ЦНИИС 1951 г.	2.5	0.160	200	125
НИГРИ (1950-1966 г.)	2.0	0.312	235	100
Гидропроект (1953 г.)	2.5	0.245	340	300
ВУГИ (1954 г.)	2.2	0.122	350	300
МИИТ (1960 г.)	2.5	0.120	340	320
ВНИИВОДГЕО (1966 г.)	2.0	0.135	350	273
ДИИТ (1956 г.)	2.0	0.128	300	100
АзИС-2	5.0	0.48	150-300	160-300

В период с 1962 по 1997 г.г. на центробежной установке были выполнены важнейшие исследования, позволившие решить целый ряд теоретических и практических задач по заданиям Министерства путей сообщения.

Наиболее значимые из них следующие:

- Моделирование более 100 насыпей различной высоты при различной номенклатуре грунтов и различной их плотности и влажности. В результате получены данные о возможных эксплуатационных осадках насыпей, что послужило основой разработки новых норм плотностей грунтов насыпей, вошедших в ряд нормативных документов на проектирование земляного полотна железных дорог: в таблицу 8 - СН 449–72, а затем в модернизированном виде в СН Ц–01–95 и в СП 32–104–98 [Яковлева Т.Г. и Иванов Д.И.1980, Козлов В.А. 1968].

- Проверка моделированием около 80 насыпей новых проектных решений Сибгипротранса о целесообразности использования местных мелких и пылеватых песков для строительства на болотах насыпей линий Тюмень – Сургут и Сургут – Уренгой , в результате чего были созданы новые типовые поперечные профили насыпей на болотах глубиной 3 – 4 м из мелких и пылеватых песков . Эти типовые решения вошли в СН 449 – 72 (стр.46-47) , а затем в СП 32 – 104 – 98 (стр.16-19) [Яковлева Т.Г. и Иванов Д.И.1980].

- Моделирование более 200 насыпей разной высоты, при различной номенклатуре грунтов, разной их плотности и влажности при воздействии специально разработанной модели динамической поездной нагрузки, отражающей параметры вибродинамического воздействия поезда на насыпь, позволило выявить такой уровень динамических напряжений, действующих на основную площадку, при котором возникает предельное состояние насыпи на устойчивость сооружений [Яковлева Т.Г. и Иванов Д.И. 1980]. Это дало возможность разработать метод интегрального учета для осредненных условий эксплуатации динамического состояния насыпей при расчетах их устойчивости. Метод вошел в СП 32–104–98 (стр.64– 65).

- Моделирование насыпей на болотах для Северной железной дороги (линия Москва–Вологда), позволившее дать рекомендации по их усилению или по разработке графиков требующихся подъёмов пути на балласт. Моделирование устойчивости откосов выемок для линии Мудьюга – Обозерская при предварительном многократном промораживании и оттаивании в морозильной камере откосов модели выемок. Это позволило дать рекомендации по защите откосов от сползания. Аналогичное моделирование производилось для изучения устойчивости высоких насыпей на Горьковской железной дороге.

- При разработке серии способов для усиления эксплуатируемых деформирующихся и потенциально опасных насыпей армогрунтовыми конструкциями. Наряду с массовыми расчетами выполнялось выборочное

моделирование их с усилением армогрунтовыми стенами, армированными контрбанкетами, стягивающими элементами, габионными структурами и пр. Предлагаемые технические решения, эффективность которых была подтверждена результатами моделирования на центрифуге МИИТа, были применены на Львовской, Юго–Западной, Северной, Юго–Восточной, Горьковской, Октябрьской и Московской железных дорогах. В результате разработан ряд нормативных документов в части проектирования, строительства и эксплуатации железных дорог.

Список использованных источников

1.Покровский Г. И., Федоров И.В. Моделирование прочности грунтов - Москва ; Ленинград : Госстройиздат, 1939. - 144 с.

2.Козлов В.А. Влияние режима разгона машины на результаты центробежного моделирования // Труды МИИТ. - М.: Изд-во МИИТа, 1968. Вып.273.-С.59-73.

3.Яковлева Т.Г., Иванов Д.И. Моделирование прочности и устойчивости железнодорожного полотна.- М.: Транспорт, 1980.-255с.

4.Bucky P.B. (1934) Applications of the principles of similitude to design of mine workings. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, New York 109: 25–42.

5.Pokrovsky GI (1933) On the use of a centrifuge in the study of models of soil structures. Zeitschrift fur Technische Physik 14(4): 160–162 (in German); Журнал Технической Физики 3(4): 537–539.

6.Craig W. H., Vinogradov V. V., Frolovsky Y.K., Zaytsev A.A. Pioneers of centrifuge modelling //International Journal of Physical Modelling in Geotechnic, Volume 15 Issue 1, March 2015, pp. 3-18 DOI: 10.1680/ijpmg.14.00018

7.Oshima. A., Takada, N. and Mikasa, M. (1991). Strength anisotropy of Clay in Slope Stability / Proceedings of Centrifuge 91, pp591 - 598.

http://www.atlasaerospace.net/centr_tech.html (ссылка 2002 г.)

<http://www.scriu.com/15/83596111589.php>

[Центробежная установка МИИТа, конструкция, электропривод, специальные службы \(30 Мая 2018\)](#)

http://www.gctc.ru/media/files/Periodicheskie_izdaniya/Magazine.5.pdf (исх. 10 Ноя 2016)

[ФГБУ Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А.Гагарина](#)