



# *Научно-технический вестник*

БРЯНСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

*Nauchno-Tekhnicheskiy Vestnik  
Bryanskogo Gosudarstvennogo  
Universiteta*

Б Р Я Н С К

2020(4)

ISSN 2413-9920

**Научно-технический  
ВЕСТНИК  
Брянского  
государственного  
университета**

**№ 4  
2020**

**Технические науки**

**Nauchno-tehnicheskij**  
**VESTNIK**  
**Bryanskogo**  
**gosudarstvennogo**  
**universiteta**

**Scientific and Technical Journal of  
Bryansk State University**

**№ 4**  
**2020**

**Engineering Science**

ББК 74.580.4

Н-34

Научно-технический вестник Брянского государственного университета. № 4 (2020). Брянск: РИСО БГУ, 2020. – Точка доступа: <http://ntv-brgu.ru>  
Размещено на официальном сайте журнала: 25.12.2020

Распоряжением Минобрнауки России от 12 февраля 2019 г. № 21-р сетевое издание «Научно-технический вестник Брянского государственного университета» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим специальностям научных работников:

05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин (технические науки);

05.02.11 – Методы контроля и диагностика в машиностроении (технические науки);

05.05.03 – Колесные и гусеничные машины (технические науки);

05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины (технические науки)

**Председатель Редакционного совета БГУ им. акад. И.Г. Петровского:**

*А.В. Антюхов* – доктор филологических наук, профессор, ректор Брянского государственного университета им. акад. И.Г. Петровского (г. Брянск, Россия).

**Главный редактор сетевого издания:**

*А.В. Лагерев* – доктор технических наук, заместитель директора НИИ фундаментальных и прикладных исследований Брянского государственного университета им. акад. И.Г. Петровского (г. Брянск, Россия)

**Ответственный секретарь сетевого издания:**

*И.В. Мельников* – кандидат биологических наук, начальник Редакционно-издательского отдела Брянского государственного университета им. акад. И.Г. Петровского (г. Брянск, Россия).

**Редакционная коллегия сетевого издания:**

*Д.В. Артамонов* – доктор технических наук, первый проректор Пензенского государственного университета (г. Пенза, Россия);

*Н.И. Баурова* – доктор технических наук, декан факультета дорожных и технологических машин Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (г. Москва, Россия);

*В.В. Беляков* – доктор технических наук, начальник управления научно-исследовательских и инновационных работ Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (г. Нижний Новгород, Россия);

*А.В. Вершинский* – доктор технических наук, профессор кафедры подъемно-транспортных систем Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (г. Москва, Россия);

*А.А. Короткий* – доктор технических наук, заведующий кафедрой транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (г. Ростов-на-Дону, Россия);

*А.В. Лагерев* – доктор технических наук, заместитель директора НИИ фундаментальных и прикладных исследований Брянского государственного университета им. акад. И.Г. Петровского (г. Брянск, Россия);

*И.А. Лагерев* – доктор технических наук, проректор по инновационной работе Брянского государственного университета им. акад. И.Г. Петровского (г. Брянск, Россия);

*В.М. Пашкевич* – доктор технических наук, проректор по научной работе Белорусско-Российского университета (г. Могилев, Беларусь);

*И.А. Полянин* – доктор технических наук, профессор кафедры транспортно-технологических машин Поволжского государственного технологического университета (г. Йошкар-Ола, Россия);

*А.В. Рыбаков* – доктор технических наук, начальник лаборатории информационного обеспечения населения и технологий информационной поддержки Академии гражданской защиты МЧС России (г. Химки, Россия);

*Н.Г. Ярушкина* – доктор технических наук, первый проректор-проректор по научной работе Ульяновского государственного технического университета (г. Ульяновск, Россия).

**Editorial Council Chairman of Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University:**

*A.V. Antyukhov* – Doctor of Philological Sciences, Professor, Rector at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russia).

**Chief editor:**

*A.V. Lagerev* - Doctor of Technical Sciences, Vice director of Institute of basic and applied research at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russia).

**Executive secretary:**

*I.V. Melnikov* – Candidate of Biological Sciences, Chief of Editorial-publishing Department at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russia).

**Editorial Board:**

*D.V. Artamonov* – Doctor of Technical Sciences, first Vice rector at Penza State University (Penza, Russia);

*N.I. Baurova* – Doctor of Technical Sciences, Dean of faculty of road and technological machines at Moscow automobile and road construction state technical University (Moscow, Russia);

*V.V. Belyakov* – Doctor of Technical Sciences, Head of research and innovation Department at Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (Nizhny Novgorod, Russia);

*A.V. Vershinsky* - Doctor of Technical Sciences, Professor of chair of Lifting and transport system at Moscow State Technical University named N.E. Bauman (Moscow, Russia);

*A.A. Korotky* - Doctor of Technical Sciences, Head of chair of transport systems and logistics at Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia);

*A.V. Lagerev* - Doctor of Technical Sciences, Vice director of Institute of basic and applied research at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russia);

*I.A. Lagerev* – Doctor of Technical Sciences, Vice rector at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russia);

*V.M. Pashkevich* - Doctor of Technical Sciences, Vice rector at Belarusian-Russian University (Mogilev, Belarus Republic);

*I.A. Polyenin* - Doctor of Technical Sciences, Professor of chair of transport and technological machines at Povolzhskiy State Technical University (Yoshkar-Ola, Russia);

*A.V. Rybakov* - Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory of information technologies and providing the population at Academy of Civil Defence EMERCOM of Russia (Khimki, Russia);

*N.G. Yarushkina* - Doctor of Technical Sciences, first Vice rector at Ulyanovsk State Technical University (Ulyanovsk, Russia).

Электронный журнал «Научно-технический вестник Брянского государственного университета» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации: Эл № ФС77-62798 от 18 августа 2015 г.

16+

Ответственность за точность фактологического материала, используемого в статьях, несут авторы.

© Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2020  
© 2020 Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta



The Journal and its metadata are licensed under CC BY-SA

## СОДЕРЖАНИЕ

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



## Машиностроение и машиноведение

## Транспортное, горное и строительное машиностроение

Статьи, опубликованные в этом разделе, соответствуют требованиям Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, на соискание ученой степени кандидата наук по специальностям научных работников 05.02.02; 05.02.11; 05.05.03; 05.05.04  
(Распоряжение Минобрнауки России от 12 февраля 2019 г. № 21-р)

Гринчар Н.Г., Шошин А.С., Чалова М.Ю. (Москва, Российская Федерация)

DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-477-485

Применение современных буровых машин в транспортном строительстве ..... 477

Корытов М.С., Щербаков В.С., Почекуева И.Е. (Омск, Российская Федерация)

DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-486-496

Имитационная модель виброзащитного механизма кресла с участком квазиулевого жесткости оператора строительно-дорожной машины ..... 486

Сафронов Е.В., Носко А.Л., Балашова А.И. (Москва, Российская Федерация)

DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-497-505

Исследование влияния длины накладки на скорость движения паллеты по центробежному фрикционному ролику ..... 497

Таричко В.И. (Брянск, Российская Федерация)

DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-506-517

Структурная оптимизация гидропривода мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса на основе парето-оптимальных решений ..... 506

Фомин К.В. (Тверь, Российская Федерация)

DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-518-528

Методика расчета спектральной плотности момента сопротивления на рабочем органе дорожной фрезы ..... 518

Гончаров К.А., Гришин А.В. Брянск, Российская Федерация)

DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-529-538

Экспериментальное исследование теплового режима работы мотор-барабана короткого ленточного конвейера ..... 529

## Безопасность деятельности человека

Рыбаков А.В., Иванов Е.В., Сибгатулина Д.Ш., Алёшкин Г.С. (Химки, Казань,

Российская Федерация)

DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-539-546

Оценка устойчивости гидротехнических сооружений к воздействию поражающих факторов опасных природных явлений ..... 539

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Мамарозиков У.Д., Суюндикова Г.М., Кирезиди С.В. (Ташкент, Узбекистан)

DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-547-576

Металлогеническая специализация сиенитоидных малых интрузий и даек Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов (Чаткало-Кураминский регион, Срединный Тянь-Шань) ..... 547

## CONTENT

## ENGINEERING SCIENCE


**Machinery Building and Theoretical Engineering  
Transport, Mining and Construction Machinery**

The articles published in this section comply with the requirements of the List of peer-reviewed scientific publications, in which the main scientific results of dissertations for the degree of Doctor of Science, for the degree of Candidate of Science in the specialties of scientific workers 05.02.02; 05.02.11; 05.05.03; 05.05.04

(Order of the Ministry of Education and Science of Russia of February 12, 2019 No. 21-p)

- Grinchar N.G., Shoshin A.S., Chalova M.Yu. (Moscow, Russian Federation)*  
DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-447-485  
Application of modern drilling machines in transport construction ..... 477
- Korytov M.S., Sherbakov V.S., Pochekueva I.E. (Omsk, Russian Federation)*  
DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-486-496  
Simulation model of the vibration-protective mechanism of a chair with a section of quasi-zero rigidity for the operator of a road and construction machine ..... 486
- Safronov E.V., Nosko A.L., Balashova A.I. (Moscow, Russian Federation)*  
DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-497-505  
The influence of the length of the lining on the speed of movement of the pallet on the centrifugal friction roller ..... 497
- Tarichko V.I. (Bryansk, Russian Federation)*  
DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-506-517  
Structural optimization of the hydraulic drive of a mobile transport and reloading rope complex based on Pareto-optimal solutions ..... 506
- Fomin K.V. (Tver, Russian Federation)*  
DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-518-528  
Method for calculating the spectral density of the moment resistance on the working body of the road mill machine ..... 518
- Goncharov K.A., Grishin A.V. (Bryansk, Russian Federation)*  
DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-529-538  
Experimental study of operation heat mode of the motor drum of a short belt conveyor ..... 529

**Safety of Human Activities**

- Rybakov A.V., Ivanov E.V., Sibgatulina D.S., Alyoshkin G.S. (Khimki, Kazan, Russian Federation)*  
DOI: 10.22281/2413-9920-2000-00-00-539-546  
Assessing the stability of hydraulic structures to the impact of hazardous factors of hazardous natural phenomena ..... 539

**EARTH SCIENCE**

- Mamarozikov U.D., Suyundikova G.M., Kirezidi S.V. (Tashkent, Uzbekistan)*  
DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-547-576  
Metallogenic specialization of sienitoid small intrusions and dikes of the Kumbel-Ugam zone of depth faults (Chatkal-Kurama region, Middle Tian Shan) ..... 547

УДК (UDC) 625.144

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ БУРОВЫХ МАШИН  
В ТРАНСПОРТНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕAPPLICATION OF MODERN DRILLING MACHINES  
IN TRANSPORT CONSTRUCTIONГринчар Н.Г., Шошин А.С., Чалова М.Ю.  
Grinchar N.G., Shoshin A.S., Chalova M. Yu.Российский университет транспорта (Москва, Россия)  
Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation)

*Аннотация.* Широкие масштабы плана освоения Крайнего Севера, Сибири предусматривают ежегодную разработку сотен миллионов кубометров вечномёрзлых грунтов и горных пород, большая часть которых требует применения буровзрывных работ. Наиболее трудоёмким процессом подготовки пород к выемке является создание скважин. Бурение вечномёрзлых грунтов, грунтов со скальными включениями, монолитных и трещиноватых горных пород требует тщательного анализа и подробных расчётов для каждого из видов породы. Необходимо также учитывать, что тяжелые климатические условия работы на Крайнем Севере, открытых горных месторождениях, подразумевают также и значительное удаление от каких-либо населенных пунктов, поэтому, опираясь на вышеперечисленные факторы, следует с особым вниманием исследовать проблемы мобильности и надёжности буровых тракторных станков. В данной статье рассматривается применение современных буровых машин, приведено сравнение бурового тракторного станка с гидродвигателем бурового става со станком с гидродвигателем бурового става, перечислены факторы, подтверждающие целесообразность применения гидравлического привода бурового става, рассмотрены результаты испытаний бурения различных пород, а также влияния структуры пород на колебания давления и увеличения расхода гидравлической жидкости в системе привода станка.

**Ключевые слова:** бурение, вечномёрзлые грунты, транспортное строительство.

*Дата принятия к публикации:* 09.12.2020  
*Дата публикации:* 25.12.2020

**Сведения об авторах:**

**Гринчар Николай Григорьевич** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические средства», ФГАУ ВО «Российский университет транспорта»,  
*e-mail:* nggrin@yandex.ru.

**Шошин Александр Сергеевич** – аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические средства», ФГАУ ВО «Российский университет транспорта»,  
*e-mail:* ferzool@yandex.ru

**Abstract.** The broad scale of the plan for the development of the Far North, Siberia, provides for the annual development of hundreds of millions of cubic meters of permafrost soils and rocks, most of which require the use of drilling and blasting operations. The most time consuming process of preparing rocks for excavation is the creation of wells. Drilling of permafrost soils, soils with rock inclusions, monolithic and fractured rocks requires careful analysis and detailed calculations for each type of rock. It should also be borne in mind that the harsh climatic conditions of work in the Far North, open mining fields, also imply a significant distance from any settlements, therefore, based on the above factors, special attention should be paid to investigate the problems of mobility and reliability of tractor drilling rigs. This article discusses the use of modern drilling machines, provides a comparison of a tractor drilling rig with a mechanical drive of a drill string with a machine with a hydraulic drive, lists the factors confirming the feasibility of using a hydraulic drive of a drilling string, examines the results of tests of drilling various rocks, as well as the effect of rock structure on vibrations pressure and increase in the flow rate of hydraulic fluid in the drive system of the machine.

**Keywords:** drilling, permafrost, transport construction.

*Date of acceptance for publication:* 09.12.2020  
*Date of publication:* 25.12.2020

**Authors' information:**

**Nikolay G. Grinchar** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department «Ground transportation and technological means» at Russian University of Transport,  
*e-mail:* nggrin@yandex.ru.

**Alexander S. Shoshin** – postgraduate student of the Department «Ground transportation and technological vehicles» of the Russian University of Transport,  
*e-mail:* ferzool@yandex.ru



**Чалова Маргарита Юрьевна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические средства», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта»,  
e-mail: [margarita\\_chalova@mail.ru](mailto:margarita_chalova@mail.ru).

**Margarita Yu. Chalova** – Candidate Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department «Ground transportation and technological means» at Russian University of Transport,  
e-mail: [margarita\\_chalova@mail.ru](mailto:margarita_chalova@mail.ru).

## 1. Введение

Основу машинного парка, обеспечивающего разработку взрывных скважин при строительстве железных и автомобильных дорог, а также скважин под свайные фундаменты промышленных и гражданских зданий составляют строительные буровые машины, созданные в результате многолетних работ.

Создание современных строительных буровых машин является одной из важнейших задач в повышении производительности и снижении себестоимости наиболее трудоёмкого и дорогостоящего процесса подготовки скальных пород к выемке - разработки скважин для размещения в них зарядов взрывчатых веществ. Буровая техника транспортного строительства развивалась в непосредственной зависимости от опыта машиностроения в нефтяной промышленности, от технологии, построенной на базе комплексной механизации открытой и подземной разработки полезных ископаемых [3-5, 7].

Однако исследования режимов работы строительных буровых машин показали, что условия их работы и характер нагружения приводов обладают целым рядом индивидуальных особенностей, позволяющих выделить их в отдельную группу. Основными отличительными признаками этой группы являются:

1. Повышенные требования к автономности, мобильности и манёвренности.
2. Ограничение по типу и мощности силовой установки, определяемой базой промышленного трактора.
3. Ограничение по массе навесного бурового оборудования и по массе машины в целом.
4. Очистка скважин преимущественно воздухом.
5. Удалённость от ремонтной базы.
6. Тяжёлые породные условия, характеризующиеся значительным процентом тре-

щиноватых пород (от 30 до 70%), а также необходимостью бурения мёрзлых и вечно-мёрзлых грунтов с содержанием до 70% валунно-галечных и скальных включений.

Для бурения взрывных скважин и шпуров при сооружении земляного полотна, образовании скальных выемок, добыче щебня в притрассовых карьерах применяются в основном самоходные буровые тракторные станки БТС-150 [2, 6].

Буровая машина БТС-150 предназначена для бурения скважин в скальных легкодробимых породах V-VIII категорий при разработке на объектах линейного строительства при мощности взрываемого слоя породы более 3,5 м скальных выемок взрывным способом. Машина может быть также использована на бурении скважин в моренных грунтах с включением валунов, мёрзлых грунтах без скальных включений, в том числе вечно-мёрзлых, предназначенных для взрывного рыхления [1]. В качестве бурового инструмента используется шарошечное долото; очистка забоя от буровой мелочи и охлаждение инструмента осуществляются сжатым воздухом, подаваемым в забой через буровой став от придаваемой к бурильной машине компрессорной станции типа ПК-10. От устья скважины измельченная скальная порода транспортируется вентилятором по шлангу в пылеосадительную камеру.

Первоначально в качестве базового трактора для машины БТС-150 был принят промышленный гусеничный трактор Т-130 (рис. 1).

На шасси шарнирно в четырех точках закреплена сварная рама станка. Горизонтирование осуществляется при помощи трёх опорных гидродомкратов. Шарнирное крепление буровой рамы к основной раме станка обеспечивает возможность её наклона, осуществляемого при помощи двух гидроцилиндров. Буровая рама снабжена двумя направляющими штангами и квадратным валом. Давление на забой осуществляется гидроцилиндром подачи.

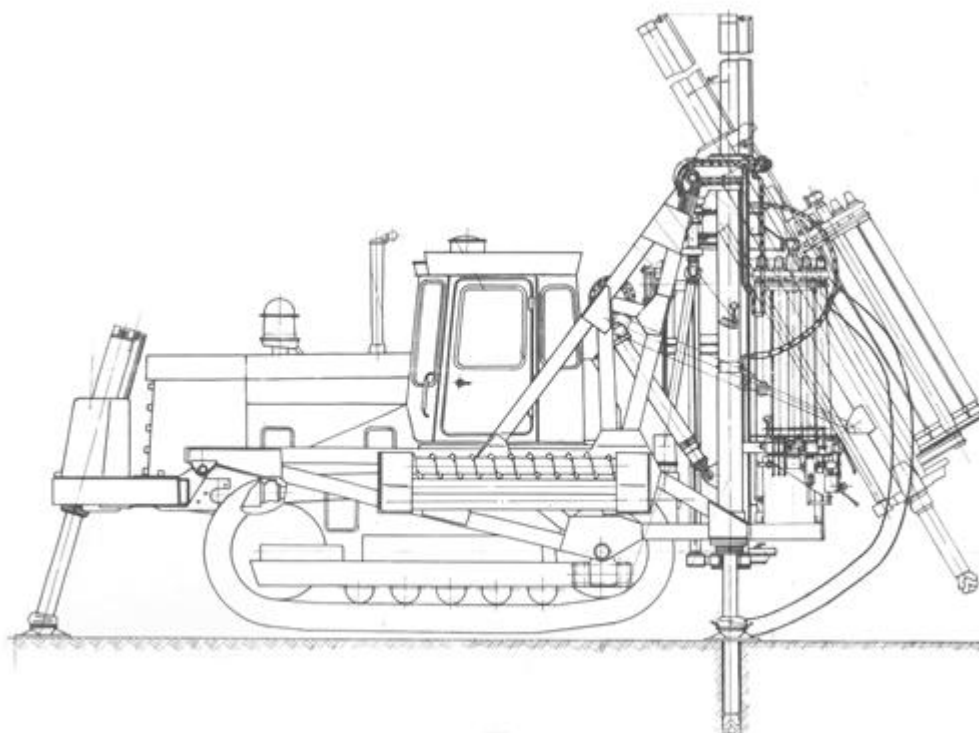


Рис. 1. Буровая машина БТС-150 на базе трактора Т-130 в рабочем положении

Машина БТС-150 в изначальной комплектации на базе трактора Т-130 имела механический привод бурового става.

Кинематическая схема представлена на рис. 2. Крутящий момент от вала отбора мощности дизеля 1 передавался на буровой став посредством громоздкой и сложной кинематической цепи. Коробка передач 2 механическая с приводом от вала отбора мощности двигателя трактора. Она позволяла получить две рабочие скорости вращения бурового става и обратный ход. Шестерни коробки - постоянного зацепления. Коробка передач 2 соединялась с левым коническим редуктором привода 4 с помощью карданного вала 3. Правый конический редуктор 5 привода закреплялся на буровой раме и имел возможность поворачиваться относительно левого редуктора при наклоне буровой рамы.

В гнездо выходного вала правого редуктора привода входил квадратный вал 6, передававший крутящий момент вращателю 7. Соединённый с вращателем 7 посредством переходного замка 8 буровой став 9 соосен с гидроцилиндром подачи на забой, шток которого шарнирно закреплён на крышке вращателя. Сам вращатель представлял собой

одноступенчатый цилиндрический редуктор, через который внутрь бурового става подводился сжатый воздух от компрессорной станции. Вся конструкция требовала высокой точности изготовления и сборки элементов привода.

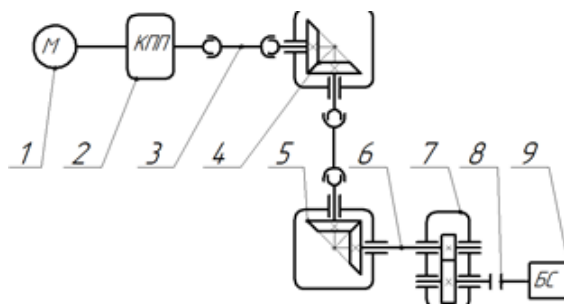


Рис. 2. Кинематическая схема механической трансмиссии бурового става машины БТС-150

Незначительный дисбаланс вращающихся элементов вращателя мог вызвать значительные колебания как трансмиссии, так и станка в целом. Частота вращения бурового става регулировалась исключительно оборотами двигателя и двумя ступенями коробки передач. Ввиду того, что у двигателя внутреннего сгорания крутящий момент зависит от частоты

ты вращения коленчатого вала, некоторые режимы бурения могут вызывать скачки оборотов и стопорения. Этот факт, в свою очередь, снижает надёжность и так громоздкой кинематической схемы. Данная конструкция имела относительно низкий ресурс как трансмиссии, так и перегруженного ДВС.

Дальнейшее совершенствование машин этого типа связано с заменой механической трансмиссии на гидрообъемный привод [1, 8].

Данный тип привода позволяет при небольших габаритах и весе гидроагрегата, легко реверсировать направление вращения, исключает необходимость применения сложных передач, а также ввести автоматическое и полуавтоматическое управление, использование которого улучшает условия труда машиниста. Кроме того, независимое расположение в пространстве насоса и гидродвигателя, а также их малые габаритные размеры создают большие компоновочные удобства, позволяют принципиально по-новому решать конструкцию узлов, уменьшать габариты и вес при одновременном увеличении энерговооружённости машины, сокращается номенклатура и количество запасных частей, требующихся в эксплуатации.

В связи с широким применением во всех без исключения современных строительных буровых машинах гидропривода типа насос-силовой гидроцилиндр, введение дополнительной подсистемы насос-гидродвигатель не усложняет существенно систему гидропривода в целом.

Эти основные преимущества гидравлического привода и предопределили расширяющееся его применение в модернизированном приводе строительных буровых машин с шарошечным рабочим органом (БТС-150БГ) (рис.3).

Базой гидрофицированной машины служит промышленный гусеничный трактор Т-170, на который навешивается основная рама буровой машины с четырьмя опорными гидродомкратами. На задней части этой рамы шарнирно закреплена буровая рама, по направляющим которой с помощью гидроцилиндра подачи перемещается вращатель, соединённый с буровой штангой.

В приводе гидрофицированной машины кинематическая схема гораздо более про-

стая: были исключены квадратный и карданные валы, а также конические редукторы. Масса бурового станка снизилась, улучшилась развесовка, что позволило убрать противовес с передней части машины.

Конструкция данной машины, благодаря гидравлическому приводу, позволяет плавно регулировать частоту вращения бурового става, при этом двигатель работает не перегружаясь, при постоянной частоте вращения коленчатого вала. В станках с гидравлическим приводом бурового става наращивание и разборка бурового става механизированы и осуществляются с помощью кассеты барабанного типа с набором запасных штанг, подводимой к буровому ставу гидроцилиндром. В рабочем положении машина горизонтируется с помощью гидродомкратов. Управляют машиной возможно как из кабины, так и с дистанционного пульта. При транспортировании машины на большие расстояния используют автомобильный прицеп грузоподъёмностью не менее 15 т или железнодорожную платформу.

Для защиты рабочей зоны от пыли на машине смонтирована модернизированная установка сухого пылеподавления, состоящая из пылеприёмника, отводного рукава, циклонного и рукавного фильтров, отсасывающего вентилятора. Для работы в районах с суровым климатом предусмотрен подогрев двигателя, компрессорного и гидравлического оборудования. Пульт управления размещён в закрытой кабине, оснащённой установками подогрева и вентиляции воздуха [2, 6].

Кинематическая схема привода бурового става машины БТС-150БГ представлена на рис. 4.

## 2. Экспериментальные исследования функционирования привода вращения бурового става машины БТС-150

Надёжность, и, в частности долговечность элементов трансмиссии зависят, прежде всего, от режима эксплуатации [1].

С целью уточнения фактических параметров процесса бурения скальных пород были проведены натурные испытания машины.

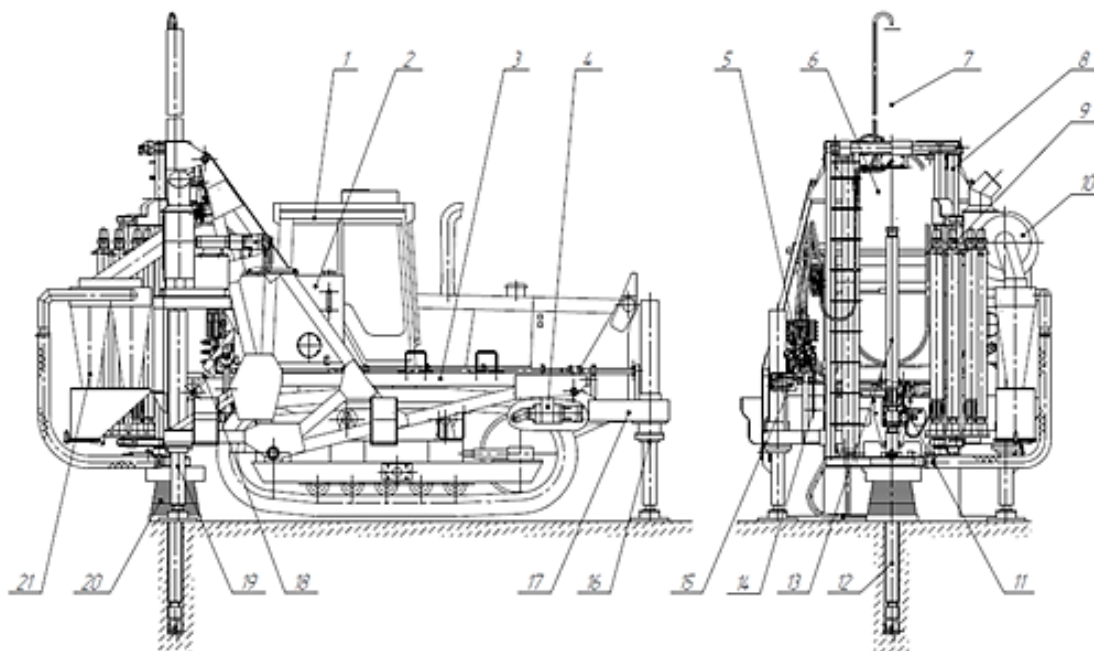


Рис. 3. Буровой тракторный станок БТС-150БГ в рабочем положении:  
1 - трактор; 2 - гидравлический бак; 3 - основная рама; 4 - передняя насосная установка;  
5 - гидрооборудование; 6 - вращатель; 7 - гидроцилиндр подачи; 8 - буровая рама;  
9 - механизм подачи штанг; 10 - вентилятор; 11 - основная насосная установка;  
12 - гладкая штанга; 13 - противовибрационная штанга; 14 - управление подачей топлива двигателя трактора; 15 - пульт управления; 16 - передний домкрат; 17 - рама передних домкратов; 18 - гидроцилиндр наклона; 19 - задний домкрат; 20 - пылеприемник; 21 - циклон

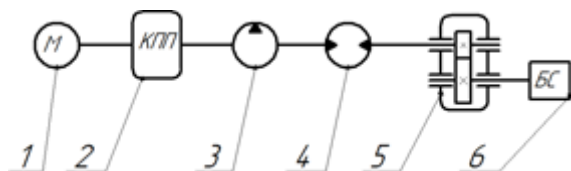


Рис. 4. Кинематическая схема гидромеханической трансмиссии бурового става машины БТС-150Г

В процессе испытаний на экране осциллографа фиксировались следующие основные параметры, характеризующие работу буровой машины и гидропривода вращения бурового става в частности:

- давление рабочей жидкости в напорной магистрали гидромотора вращателя  $P_{зм}$ ;
- давление жидкости в напорной магистрали гидроцилиндра подачи бурового става  $P_{ос}$ ;
- частота вращения бурового става  $n$ .

Основные результаты экспериментальных исследований сводятся к следующему:

- 1) режим работы гидросистемы вращателя может существенно изменяться, как при изменении породных условий, так и при изменении числа оборотов бурового става;
- 2) независимо от величины осевого давления при частоте вращения 76 об/мин наблюдаются значительные колебания давления с амплитудой до 16 МПа (160 кгс/см<sup>2</sup>);
- 3) перегрузки гидросистемы сопровождались разрывом рукавов высокого давления и трубопроводов;
- 4) непосредственно в процессе натурных испытаний и при анализе результатов причины возникновения столь значительных по амплитуде колебаний давления в гидросистеме вращателя установить не удалось.

Разбуриваемые горные породы были слоистыми и характеризовались наличием трещин.

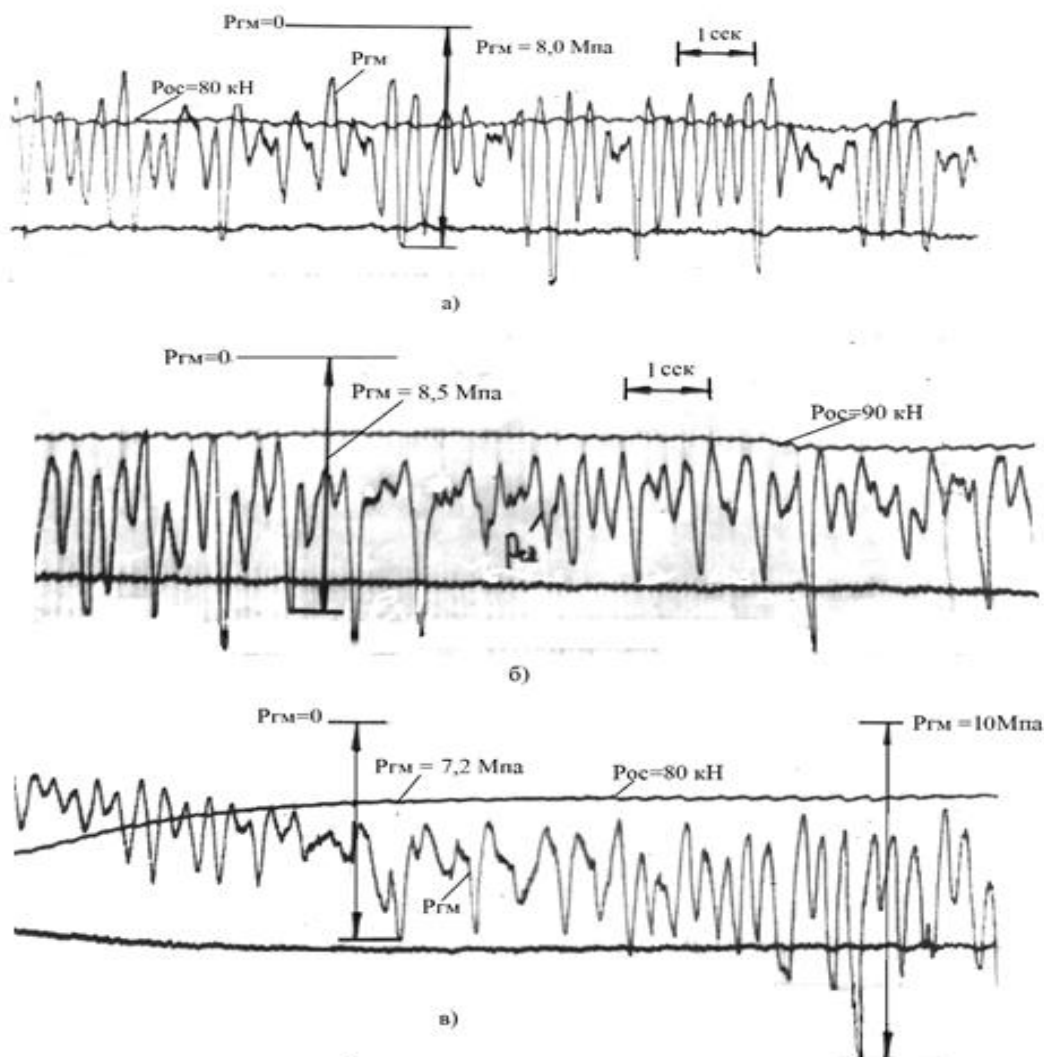


Рис. 5. Осциллограммы режимов нагружения гидросистемы механизма вращения бурового става тракторного станка БТС-150 ( $P_{GM}$  – давление в напорной линии гидромотора привода вращения бурового става;  $P_{OC}$  – давление в напорной линии гидроцилиндра подачи бурового става, соответствующее осевому усилию на буровой став: а - 80 кН, б - 90 кН, в - 80 кН)

Анализ и интерпретация полученных результатов натурных испытаний проводились в соответствии с рекомендациями, изложенными в [9, 10].

Анализ осциллограмм показывает, что в общем случае режим нагружения гидросистемы вращателя имеет случайный нестационарный характер, что можно объяснить неоднородностью структуры и, соответственно, физико-механических свойств разрабатываемой породы.

Так как параметры режима бурения практически постоянны, то следует полагать, что свойства породы изменяются при прочих равных условиях, в значительной степени определяют статическую и динамическую со-

ставляющие процесса, что можно показать на примере осциллограмм (рис.6, а, б), на которых записаны режимы нагружения гидросистемы вращателя, отличающиеся только породными условиями, а параметры режима бурения  $P_{зи}$  и  $n$  оставались постоянными.

Режим нагружения гидросистемы при бурении монолитных пород характеризуется меньшим средним значением давления  $P = 6,5$  МПа (против  $P = 10,5$  МПа в трещиноватых) и среднеквадратическим отклонением  $\sigma = 0,21$  МПа (против  $\sigma = 1,0$  МПа в трещиноватых). Распределение свойств породы по глубине проходки и по поверхности забоя является, очевидно, случайным. Режимы наг-

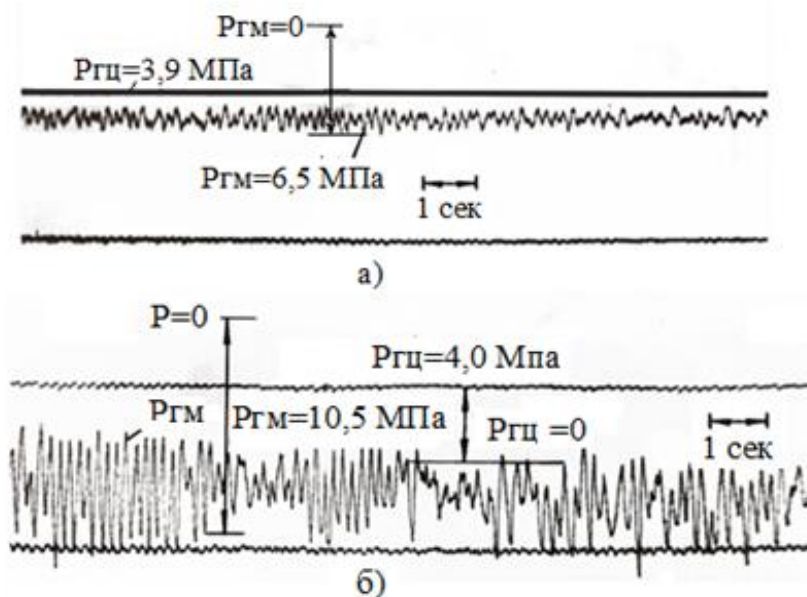


Рис. 6. Типовые осциллограммы режимов нагружения гидросистемы механизма вращения бурового става БТС-150 при бурении: а - монолитных пород; б - трещиноватых пород ( $P_{гм}$  – давление в напорной линии гидромотора привода вращения бурового става;  $P_{гц}$  - давление в напорной линии гидроцилиндра подачи бурового става)

ружения гидросистемы вращателя отличаются только породными условиями, давление и частота вращения бурового става оставались постоянными.

Влияние частоты вращения бурового става на формирование режима нагружения гидросистемы вращателя можно проиллюстрировать на совмещённых в одних координатных осях графиках средних спектров процессов, которые получены при различной частоте вращения исполнительного органа.

Анализ графика совмещённых средних спектров (рис. 7) показывает, что мощность колебаний на частоте в три раза высшей частоты вращения бурового става возрастает при снижении частоты вращения исполнительного органа. Известно, что генератором колебаний частоты, в три раза превосходящей частоту вращения бурового става, является трехшарошечное долото при взаимодействии последнего с неравнопрочной породой.

Средние спектры (рис. 7) характеризуются также наличием пиков, мощность которых значительно меньше мощности колебаний, генерируемых трехшарошечным долотом. Частоты отмеченных пиков кратны частоте вращения бурового става в отношении 1 и 2 колебания нагрузки за один оборот исполни-

тельного органа. Очевидно, что источником низшей частоты, которая равна частоте вращения исполнительного органа, является несоосность бурового става и вращателя. Наличие двух генераторов колебаний с соотношением частот 1:1:3 вызывает в гидравлической системе вращателя появление промежуточной частоты, которая будет лежать между ними.

В процессе экспериментов при частоте вращения бурового става 76...78 об/мин и 119 об/мин были зафиксированы режимы работы гидропривода вращателя под нагрузками, которые характеризуются забросами давления свыше 12,0 МПа (рис. 7). Анализ показывает, что оба режима имеют основную мощность колебаний, сосредоточенную на частоте 3,8 Гц, являющейся частотой, генерируемой трехшарошечным долотом при частоте вращения бурового става  $n = 76...78$  об/мин и промежуточной при  $n = 119$  об/мин, хотя на остальных частотах вращения бурового става такого перераспределения мощности колебаний не наблюдается. Поэтому было выдвинуто предположение о резонансной природе забросов давления в гидросистеме вращателя бурового става при частоте вращения исполнительного органа 78 и 119 об/мин.

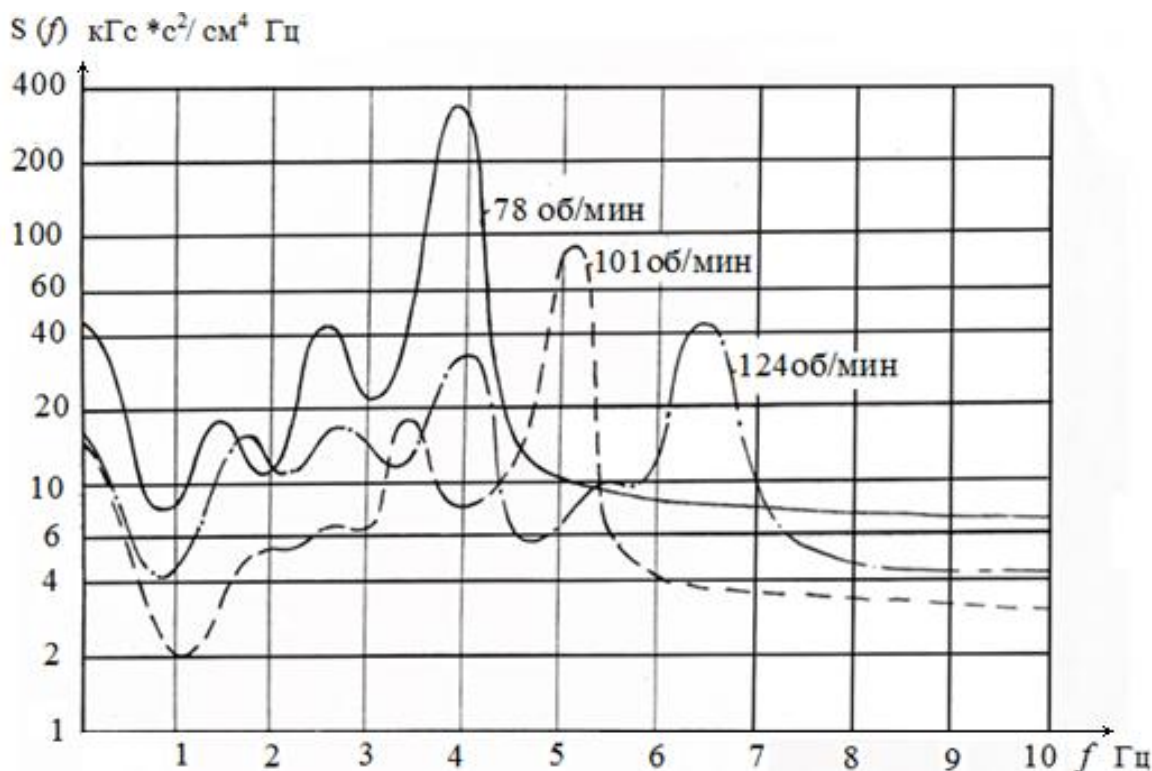


Рис.7. Графики средних спектров

Для решения данной задачи была рассчитана собственная частота гидросистемы при следующих исходных параметрах:

- момент инерции привода, приведённый к валу гидромотора  $I = 0,0817 \text{ Н}\cdot\text{мм}^2\cdot\text{с}^2$  ( $0,833 \text{ кг}\cdot\text{см}^2\cdot\text{с}^2$ );

- рукава высокого давления длиной  $l = 2800 \text{ мм}$ , диаметром  $d = 20 \text{ мм}$ ;

- приведённый модуль упругости рабочей жидкости и рукавов высокого давления  $E = 107,87 \text{ Н/мм}^2$  ( $1,1\cdot 10^3 \text{ кгс/см}^2$ );

- механическая жёсткость  $C_m = 50,96 \text{ Н/мм}^2$  ( $519,6 \text{ кгс}\cdot\text{см}$ ).

Анализируя средние спектры мощности колебаний (рис. 7) заметно наличие пиков, мощность которых значительно меньше мощности колебаний, генерируемых трехшарошечным долотом, являющегося источником этих колебаний, частота которых пропорциональна частоте вращения исполнительного органа. Кроме того, источниками колебаний являются несоосность бурового става и вращателя относительно друг друга.

В результате расчёта получено, что первая гармоника собственной частоты вращателя с гидроприводом находится на частоте  $3,97 \text{ Гц}$ . Отсюда следует вывод о принципиальной возможности резонансного режима

при частоте вращения бурового става  $76\dots 80 \text{ об/мин}$  и  $118\dots 120 \text{ об/мин}$ , что соответствует частоте вынужденных и кратных колебаний в диапазоне  $3,8\dots 4,0 \text{ Гц}$ .

### 3. Заключение

В результате экспериментальных исследований режимов нагружения гидросистемы вращателя буровой машины БТС-150 установлено, что при определенных динамических свойствах вращательного механизма и характере внешнего нагружения колебания давления и расхода рабочей жидкости могут достигать недопустимо большой величины, что приводит к преждевременному выходу из строя аппаратов гидроспривода. В свою очередь, это ведет к выходу из строя машины в целом. Такой режим функционирования может быть оценен как сверхтяжелый [1]. Поэтому на стадии проектирования буровых машин с гидрообъемным приводом необходимо учитывать в комплексе как динамические особенности последнего, так и параметры нагрузки на буровом стае.

Учитывая, что при анализе режимов нагружения гидросистемы вращателя бурового става машины БТС-150 имеется довольно

ограниченное количество реализаций, для проверки условий возникновения резонансных колебаний необходимо проведение дальнейших исследований, в результате которых должна быть создана уточненная методика расчёта динамических параметров враща-

тельно-подающего механизма исполнительного органа строительных буровых машин, с целью определения рациональных параметров, обеспечивающих снижение динамических нагрузок в гидроприводе машины.

### Список литературы

1. Гринчар Н.Г. Надежность гидроприводов строительных, путевых и подъемно-транспортных машин. М.: Автограф, 2016. 368 с.
2. Журба В.А. Машины для транспортного строительства. М.: Транспорт, 1984. 429 с.
3. Ильский А.Л., Шмидт А.П. Буровые машины и механизмы. М.: Недра, 1989. 396 с.
4. Кирсанов А.Н., Зиненко В.П., Кардыш В.Г. Буровые машины и механизмы. М.: Недра, 1981. 447 с.
5. Медведев И.Ф. Режимы бурения и выбор буровых машин. М.: Недра, 1986. 223 с.
6. Недорезов И.А., Машкович О.Н., Спивак С.Г. Машины и механизмы транспортного строительства. М.: Транспорт, 1989. 358 с.
7. Ржевский В.В. Процессы открытых горных работ. М.: Недра, 1978. 544 с.
8. Иванов, Г.М. Проектирование гидравлических систем машин. М.: Машиностроение, 1992. 224 с.
9. Тарко Л.М. Переходные процессы в гидравлических механизмах. М.: Машиностроение, 1973. 168 с.
10. Цветков Э.И. Нестационарные случайные процесс и их анализ. М.: Энергия, 1973. 129 с.

### References

1. Grinchar N.G. Reliability of hydraulic drives of construction, track and lifting-transport machines. Moscow, Autograph, 2016. 368 p. (In Russian).
2. Zhurba V.A. Transport construction machines. Moscow, Transport, 1984. 429 p. (In Russian).
3. Il'skiy A.L., Schmidt A.P. Drilling machines and mechanisms. A textbook for techies. Moscow, Nedra, 1989. 396 p. (In Russian).
4. Kirsanov A.N., Zinenko V.P., Kardysh V.G. Drilling machines and mechanisms. Textbook. Moscow, Nedra, 1981. 447 p. (In Russian).
5. Medvedev I.F. Drilling modes and selection of drilling machines. Moscow, Nedra, 1986. 223 p. (In Russian).
6. Nedorezov I.A., Mashkovich O.N., Spivak S.G. Machines and mechanisms of transport construction. Moscow, Transport, 1989. 358 p. (In Russian).
7. Rzhevsky V.V. Open pit mining processes. Moscow, Nedra, 1978. 544 p. (In Russian).
8. Ivanov G.M. Design of machine hydraulic systems. Moscow, Mashinostroenie, 1992. 224 p. (In Russian).
9. Tarko L.M. Transient processes in hydraulic mechanisms. Moscow, Mashinostroenie, 1973. 168 p. (In Russian).
10. Tsvetkov E.I. Non-stationary stochastic processes and their analysis. Moscow, Energiya, 1973, 129 p. (In Russian).



УДК (UDC) 62-752.2

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВИБРОЗАЩИТНОГО МЕХАНИЗМА КРЕСЛА  
С УЧАСТКОМ КВАЗИНУЛЕВОЙ ЖЕСТКОСТИ ОПЕРАТОРА  
СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНОЙ МАШИНЫSIMULATION MODEL OF A CHAIR VIBRATION PROTECTIVE MECHANISM  
WITH A PART OF QUASI-ZERO-STIFFNESS FOR THE OPERATOR  
OF A ROAD-BUILDING MACHINEКорытов М.С., Щербаков В.С., Почекуева И.Е.  
Korytov M.S., Sherbakov V.S., Pochekueva I.E.Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (Омск, Россия)  
Siberian State Automobile and Highway University (Omsk, Russian Federation)

**Аннотация.** Вибрации узлов строительных и дорожных машин, возникающие при их работе, являются вредным производственным фактором для операторов машин, поэтому их снижение может считаться весьма актуальной задачей. Основным путем передачи вибраций являются системы виброизоляции сиденья и кабины оператора. Проще и экономичнее обеспечить виброизоляцию оператора с помощью его кресла, снизив вибрации. Для кресел могут использоваться наиболее простые и надежные виброзащитные системы с одной степенью свободы, ограниченной вертикальными перемещениями кресла. Перспективными считаются виброзащитные механизмы и систем с квазинулевой жесткостью. Они обеспечивают постоянную статическую силу в некотором диапазоне перемещений объекта. Актуальной является задача разработки математических моделей, описывающих виброзащитные системы с квазинулевой жесткостью. В программном комплексе Matlab с использованием библиотеки моделирования физических элементов Simscape, разработана имитационная математическая модель виброзащитной системы кресла с одной степенью свободы. Основание кресла в разработанной модели совершает гармонические синусоидальные перемещения. Выходными параметрами разработанной математической модели выступают временные зависимости координат и ускорений кресла. Описаны используемые в модели блоки, приведена статическая силовая характеристики, заданная при помощи сплайна Эрмита. Модель включает блок жесткого ограничения перемещений. Приведен пример использования разработанной имитационной математической модели кресла. Разработанная модель позволяет задавать как размеры участка квазинулевой жесткости, так и вид кривых силовой статической характеристики виброзащитной системы. Она может быть интегрирована в модели более высокого уровня.

**Ключевые слова:** вибрации, виброзащита, модель, Simscape, квазинулевая жесткость.

**Abstract.** Vibrations of construction and road machinery components that occur during their operation are a harmful production factor for machine operators, therefore, their reduction can be considered a very urgent task. The main route of vibration transmission is through vibration isolation systems for the operator's seat and cab. The easiest and most cost-effective way to isolate the operator from vibration is through his seat by reducing vibration. The simplest and most reliable vibration protection systems with one degree of freedom limited by vertical movements of the chair can be used for the chairs. Vibration protection mechanisms and systems with quasi-zero rigidity are considered promising. They provide constant static force over a certain range of movement of the object. The task of developing mathematical models describing vibration protection systems with quasi-zero rigidity is urgent. In the Matlab software package using the Simscape library for modeling physical elements, a simulation mathematical model of the vibration protection system of a chair with one degree of freedom has been developed. The base of the chair in the developed model performs harmonic sinusoidal movements. The output parameters of the developed mathematical model are the time dependences of the chair coordinates and accelerations. The blocks used in the model are described, the static force characteristics are given, given using the Hermite spline. The model includes a block of hard movement restrictions. An example of using the developed simulation mathematical model of the chair is given. The developed model makes it possible to specify both the dimensions of the quasi-zero stiffness section and the shape of the curves of the force static characteristics of the vibration protection system. It can be integrated into higher level models.

**Keywords:** vibration, vibration protection, simulation model, Simscape, quasi-zero-stiffness.

Дата принятия к публикации: 02.11.2020 † Date of acceptance for publication: 02.11.2020  
Дата публикации: 25.12.2020 † Date of publication: 25.12.2020

#### Сведения об авторах:

**Корытов Михаил Сергеевич** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», e-mail: kms142@mail.ru.

ORCID: 0000-0002-5104-7568

**Щербаков Виталий Сергеевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов и электротехника» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», e-mail: sherbakov\_vs@sibadi.org.

ORCID: 0000-0002-3084-2271

**Почекуева Ирина Евгеньевна** – аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов и электротехника» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», e-mail: iriska-97-17-13@mail.ru.

#### Authors' information:

**Mikhail S.ch Korytov** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Department “Automobiles, Construction Materials and Technologies” at Siberian State-Impact Automobile and Road University (SibADI), e-mail: kms142@mail.ru.

ORCID: 0000-0002-5104-7568

**Vitaliy S. Sherbakov** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department “Automation of Production Processes and Electrical Engineering” at Siberian State-Impact Automobile and Road University (SibADI), e-mail: sherbakov\_vs@sibadi.org.

ORCID: 0000-0002-3084-2271

**Irina E. Pochekueva** – postgraduate of Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering at Siberian State-Impact Automobile and Road University (SibADI), e-mail: iriska-97-17-13@mail.ru.

## 1. Введение

Вибрации узлов строительных и дорожных машин приводят к заболеваниям операторов [1], усталостному разрушению узлов и рабочих органов [2], снижению рабочих характеристик машин [3] и т. д.

Современные строительные и дорожные машины имеют тенденцию не только к постоянному повышению производительности и мощности [4], но также и к повышению безопасности и уровня сохранения здоровья операторов машин [5].

Вибрации, вызываемые взаимодействием между ходовыми элементами (гусеничным, колесным движителем) либо рабочими органами машин, с одной стороны, и упругопластическим грунтом с другой стороны, передаются оператору через системы виброизоляции сиденья и кабины [6].

Соответственно, виброизоляция рабочего места оператора строительной или дорожной машины может быть осуществлена путем использования демпферов в местах крепления кабины к базовому шасси машины [7]. Другим распространенным способом такой виброизоляции является использование систем виброзащиты кресла оператора [8].

Последний вариант имеет преимущества в плане экономичности, пониженной мате-

риалоемкости, компактности, лучшей ремонтпригодности.

Системы виброизоляции разделяют по признаку подвода и использования внешней энергии как активные (эти системы используют внешнюю энергию для компенсации вынужденных колебаний виброзащищаемого объекта) и пассивные (внешняя энергия не используется) [9].

Несмотря на то, что активные виброзащитные системы считаются более перспективными и обладают более широкими возможностями, им свойственны также некоторые недостатки в виде меньшей надежности и долговечности, усложненной конструкции, требующей более частого технического обслуживания и т.д.

Другим перспективным направлением виброзащиты в последние годы считается применение механизмов и систем с квазиулевой жесткостью [10] в некотором диапазоне перемещений виброзащищаемого объекта [11].

Суть обеспечения квазиулевой жесткости состоит в том, что сила, действующая на виброзащищаемый объект со стороны виброзащитного механизма, остается постоянной в некотором диапазоне перемещений объекта [12].

Эти виброзащитные системы позволяют защитить объект от вибрации при повто-

ряющихся внешних воздействиях, например, синусоидального вида.

Указанные виброзащитные системы с квазиулевой жесткостью могут быть как активными, так и пассивными. Вне зависимости от признака подвода и использования внешней энергии, актуальной является задача разработки математических моделей, описывающих поведение виброзащитной системы и виброзащищаемого объекта в зависимости от внешних воздействий.

Использование математических моделей позволяет заменить сложные и дорогостоящие натурные эксперименты на реальных опытных образцах моделированием. Оптимизация конструктивных параметров и алгоритмов систем управления виброзащитных систем также становится практически доступной при использовании их математических моделей [13].

Целесообразна разработка достаточно универсальной математической модели виброзащитной системы кресла человека-оператора, которая могла бы описывать поведение пассивных систем с произвольной статической жесткостной характеристикой с участком квазиулевой жесткости.

В работе [14] приведена имитационная модель, разработанная в программном комплексе MATLAB/Simulink с использованием библиотеки Simscape, описывающая систему поддрессирования колесного трактора. Недостатком известной модели является отсутствие возможности учета участка квазиулевой жесткости, а также линейный характер статической жесткостной характеристики отдельных элементов модели.

## 2. Постановка задачи

Необходимо разработать имитационную математическую модель вынужденных вертикальных колебаний одномассовой системы кресла с человеком-оператором в программном комплексе MATLAB/Simulink с использованием библиотеки Simscape для моделирования и симуляции физических систем [14].

Рассматриваются гармонические (синусоидальные) перемещения основания кресла.

В качестве исходных данных выступают следующие постоянные параметры конструкции и процесса:  $T_{kon}$  – конечное время моделирования, с;  $T_{izm}$  – длина интервала времени измерения контролируемых параметров процесса в конце моделирования, с ( $T_{izm}$  составляет часть  $T_{kon}$ );  $dt$  – шаг времени для вывода результатов моделирования и их статистической обработки, с;  $m$  – масса кресла с оператором, кг;  $b$  – коэффициент вязкого трения виброзащитного устройства кресла, Н/(м/с);  $A_{mp}$  – амплитуда вертикальных перемещений основания кресла, м;  $T_o$  – период колебаний основания кресла, с;  $\omega = 2\pi/T_o$  – угловая (круговая) частота колебаний основания кресла, рад/с;  $v_0$  – скорость груза начальная в неподвижной системе координат, м/с;  $X_0$  – размер зоны квазиулевой жесткости, м;  $X$  – односторонняя длина хода виброзащитного механизма от границы зоны квазиулевой жесткости до отбойника (жесткого ограничителя), м;  $F_0$  – статическая сила, создаваемая виброзащитным механизмом в зоне квазиулевой жесткости, Н;  $F_T$  – статическая сила, создаваемая виброзащитным механизмом на границе с отбойником (жестким ограничителем), Н;  $\dot{F}_0$  – первая производная статической силы виброзащитного механизма по перемещению на границе зоны квазиулевой жесткости Н/м;  $\ddot{F}_0$  – вторая производная статической силы виброзащитного механизма по перемещению на границе зоны квазиулевой жесткости Н/м<sup>2</sup>;  $\dot{F}_T$  – первая производная статической силы виброзащитного механизма по перемещению на границе с отбойником (жестким ограничителем) Н/м;  $\ddot{F}_T$  – вторая производная статической силы виброзащитного механизма по перемещению на границе с отбойником (жестким ограничителем) Н/м<sup>2</sup>.

Выходными параметрами разрабатываемой математической модели будут выступать временные зависимости: вертикальной координаты кресла с оператором в неподвижной системе координат  $x(t)$ , вертикаль-

ной координаты кресла с оператором относительно основания кресла (в локальной системе координат основания)  $x_1(t)$ , ускорения кресла с оператором в неподвижной системе координат  $a(t)$ . А также результаты пост-обработки значений элементов векторов указанных временных зависимостей после окончания моделирования. Это позволит оценить вибронегруженность рабочего места человека оператора, в частности, определив такие параметры как максимальное ускорение кресла и амплитуду его вертикальных вынужденных колебаний.

### 3. Разработка имитационной математической модели кресла

Для разработки имитационной математической модели кресла человека-оператора использовалась библиотека Simscape Foundation системы MATLAB. В ней поддерживается принцип визуального программирования. В библиотеку Simscape входят библиотеки компонентов, охватывающих более десяти различных физических областей. Одна из них, Simscape Mechanical, включает в себя группу блоков Mechanical

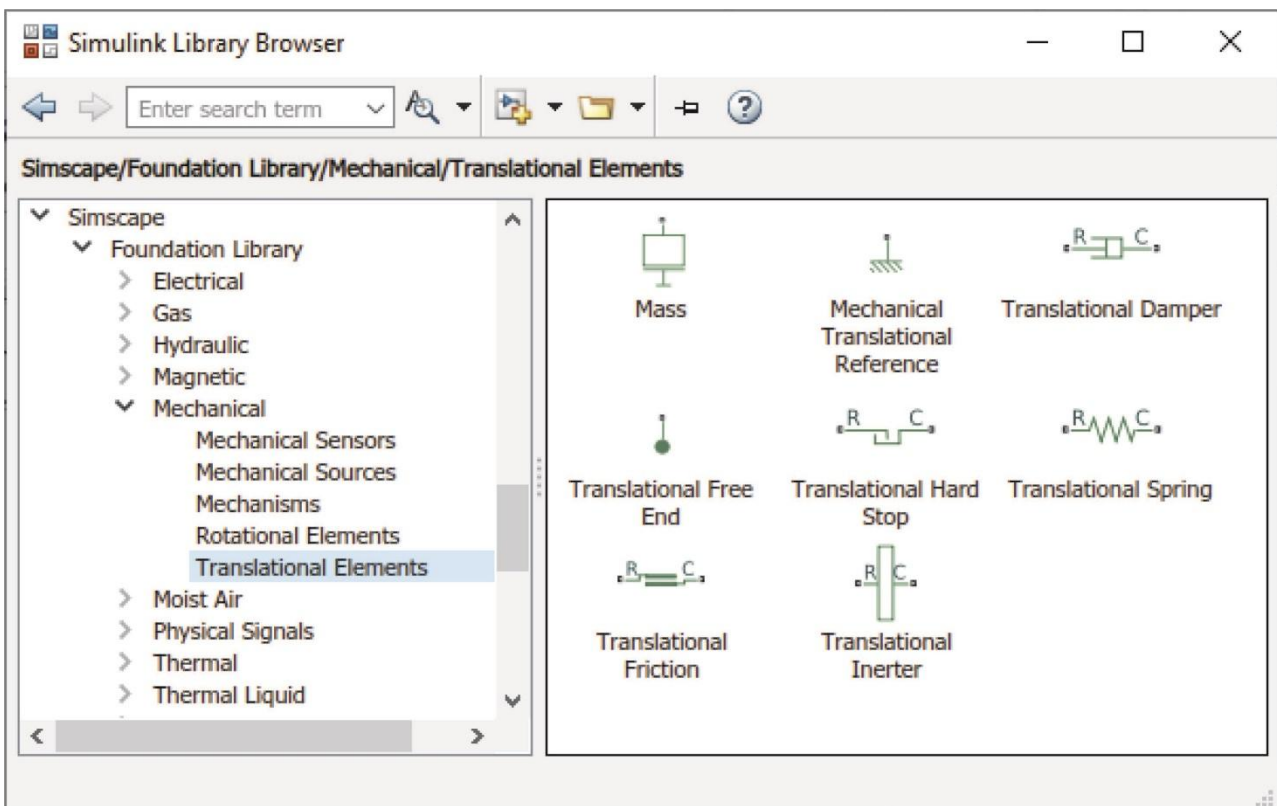


Рис. 1. Группа блоков поступательного движения Mechanical Translational Elements библиотеки Simscape Foundation системы MATLAB

Translational Elements для описания механических элементов с одной степенью свободы, совершающих поступательное движение (рис. 1) [15].

В эту группу входят перечисленные ниже блоки, которые использовались в разработанной модели.

Mass – блок идеальной движущейся поступательно сосредоточенной массы, для которой справедливо следующее дифференциальное уравнение:

$$F_i = m \frac{dv}{dt},$$

где  $F_i$  – сила инерции;  $m$  – масса кресла с человеком-оператором;  $v$  – скорость кресла с человеком-оператором в неподвижной системе координат;  $t$  – время.

В параметрах блока задаются величина массы  $m$  и единицы ее измерения.

Mechanical Translational Reference – механический блок неподвижной опоры. Он яв-

ляется опорной точкой всех механических портов поступательного перемещения. Все порты поступательного перемещения, жестко закрепленные относительно неподвижной системы координат (Земли), в модели обязательно должны быть соединены с блоком Mechanical Translational Reference. Данный блок не имеет настраиваемых параметров.

Translational Damper – демпфер вязкого трения в механических моделях с поступательным движением. Для него справедливы следующие два уравнения:

$$F_b = b \cdot v; v = v_R - v_C.$$

где  $F_b$  – сила вязкого трения, создаваемая виброзащитным устройством;  $b$  – коэффициент демпфирования (вязкого трения) виброзащитного устройства;  $v$  – относительная скорость изменения собственной длины демпфера;  $v_R, v_C$  – абсолютные скорости двух подвижных точек демпфера, определяющих его длину.

Параметром блока Translational Damper является коэффициент демпфирования  $b$ .

Translational Hard Stop – блок жесткого ограничения перемещений в обе стороны. Использование данного блока ограничивает поступательное перемещение объекта (виброзащищаемой массы) двумя границами: верхней и нижней. Подобные границы имеет любое реальное физическое виброзащитное устройство, поэтому необходимо их учитывать. Упругое взаимодействие перемещаемого тела и двух ограничителей описывается линейной зависимостью (в виде условных пружин с линейной характеристикой). Учитываются также дополнительная диссипация энергии (демпфирование) при взаимодействии объекта и ограничителей и неупругие эффекты.

Сила  $F_s$ , создаваемая жесткими упорами, описывается системой уравнений:

$$F_s = \begin{cases} K_p \cdot (x_1 - g_p) + D_p \cdot v_1 & \text{при } x_1 \geq g_p; \\ 0 & \text{при } g_n < x_1 < g_p; \\ K_n \cdot (x_1 - g_n) + D_n \cdot v_1 & \text{при } x_1 \leq g_n, \end{cases}$$

где  $g_p$  – начальный зазор между точкой подвеса кресла и верхней границей (упором);  $g_n$  – начальный зазор между точкой подвеса

кресла и нижней границей (упором);  $K_p$  – коэффициент жесткости упора верхней границы;  $K_n$  – коэффициент жесткости упора нижней границы;  $D_p$  – коэффициент демпфирования упора верхней границы;  $D_n$  – коэффициент демпфирования упора нижней границы;  $v_1$  – скорость точки подвеса кресла в локальной системе координат основания кресла.

Задаваемыми параметрами блока являются:  $g_p, g_n, K_p, K_n, D_p, D_n$  (рис. 2).

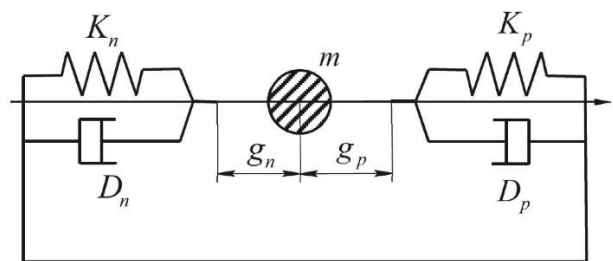


Рис. 2. Модель жесткого ограничения перемещений массы

Кроме перечисленных, в разработанной имитационной математической модели кресла человека-оператора, использовались блоки библиотек Simscape источников сигналов и виртуальных сенсоров, перечисленные ниже.

Ideal Translational Velocity Source – блок идеального задания скорости. Он создает разность скоростей на двух своих физических выходах. Эта разность равна входному физическому сигналу. Идеальность задания скорости заключается в следующем. Предполагается, что источник задания скорости настолько мощный, чтобы обеспечить заданную относительную скорость двух сопрягаемых объектов вне зависимости от сил, действующих на них.

Ideal Force Source – блок идеального задания силы. Он создает силу притяжения или отталкивания на двух своих физических выходах. Эта сила равна входному физическому сигналу. Идеальность задания силы данным блоком, аналогично блоку задания скорости, заключается в следующем. Предполагается, что источник задания силы настолько мощный, чтобы обеспечить заданную силу притяжения или отталкивания двух

сопрягаемых объектов вне зависимости от их относительной скорости.

Блоки Ideal Translational Velocity Source и Ideal Force Source не имеют настраиваемых параметров, величины относительной скорости и силы задаются в них при помощи входных физических сигналов.

Ideal Translational Motion Sensor – блок измерения перемещений между двумя механическими поступательно движущимися точками модели. В качестве настраиваемого параметра блока выступает начальное перемещение.

Кроме блоков моделирования физических систем библиотеки Simscape в разработанной модели присутствуют также перечисленные ниже блоки пакета Simulink.

Abs – блок вычисления абсолютного значения величины сигнала.

Sum – блок суммирования/вычитания сигналов двух или нескольких величин.

Fcn – блок вычисления значения математической функции на основании значений аргументов – элементов векторного входного сигнала.

Constant – блок выдачи сигнала постоянной величины.

To Workspace – блок записи данных из модели в рабочую область MATLAB.

Mux – блок объединения нескольких сигналов в векторный сигнал.

Saturation – блок ограничения значений сигнала.

Кроме того, использовались блоки Simulink-PS Converter и PS-Simulink Converter, конвертирующие обычный сигнал пакета Simulink в физический сигнал Simscape, и наоборот, соответственно.

Общий вид окна разработанной имитационной модели приведен на рис. 3.

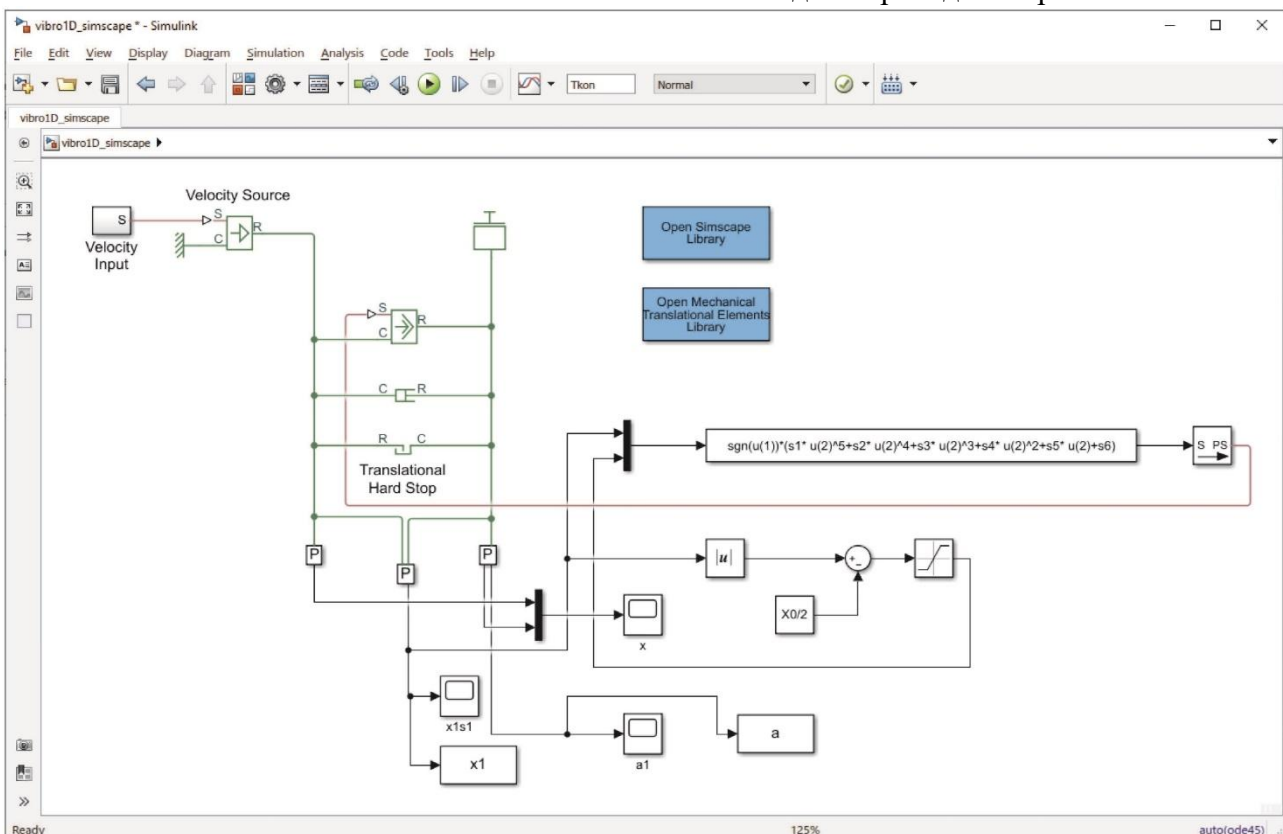


Рис. 3. Имитационная модель виброзащитного механизма кресла с участком квазиулевого жесткости в обозначениях Simulink/Simscape

Ключевой особенностью разработанной модели является вычисление статической силы  $F$  виброзащитного механизма от перемещения кресла относительно основания

$F(x_1)$  согласно выражению сплайна Эрмита [16, 17]:

$$F = \operatorname{sgn}(x_1) \cdot (s_1 \cdot (x_{10})^5 + s_2 \cdot (x_{10})^4 + s_3 \cdot (x_{10})^3 + s_4 \cdot (x_{10})^2 + s_5 \cdot (x_{10}) + s_6), \quad (1)$$

где постоянные коэффициенты определяются выражениями [16, 17]:

$$s_1 = \frac{\left(\frac{\ddot{F}_T}{2} + \frac{6 \cdot \dot{F}_T}{X^2} - \frac{3 \cdot \dot{F}_T}{X}\right)}{X^3} - \frac{\left(\frac{\ddot{F}_0}{2} + \frac{6 \cdot \dot{F}_0}{X^2} + \frac{3 \cdot \dot{F}_0}{X}\right)}{X^3};$$

$$s_2 = \frac{\left(\frac{3 \cdot \ddot{F}_0}{2} + \frac{18 \cdot \dot{F}_0}{X^2} + \frac{9 \cdot \dot{F}_0}{X}\right)}{X^2} - \frac{\left(\dot{F}_0 + \frac{3 \cdot \dot{F}_0}{X}\right)}{X^3} - \frac{\left(X \cdot \ddot{F}_T - 7 \cdot \dot{F}_T + \frac{15 \cdot F_T}{X}\right)}{X^3}; \quad (2)$$

$$s_3 = \frac{\left(3 \cdot \dot{F}_0 + \frac{9 \cdot F_0}{X}\right)}{X^2} - \frac{F_0}{X^3} - \frac{\left(\frac{3 \cdot \ddot{F}_0}{2} + \frac{18 \cdot \dot{F}_0}{X^2} + \frac{9 \cdot \dot{F}_0}{X}\right)}{X} + \frac{\left(\frac{\ddot{F}_T \cdot X^2}{2} - 4 \cdot \dot{F}_T \cdot X + 10 \cdot F_T\right)}{X^3};$$

$$s_4 = \frac{\ddot{F}_0}{2} + \frac{9 \cdot \dot{F}_0}{X^2} + \frac{3 \cdot \dot{F}_0}{X} - \frac{3 \cdot \dot{F}_0 + \frac{9 \cdot F_0}{X}}{X}; \quad s_5 = \dot{F}_0; \quad s_6 = F_0.$$

Вычисление по формуле (1) выполняется при помощи блока Fsp имитационной модели (рис. 3).

Постоянные коэффициенты сплайна Эрмита  $s_1, s_2, s_3, s_4$  однократно вычислялись по формулам (2) в скрипте, написанном на языке программирования MATLAB, и выполняемом перед запуском имитационной модели.

Текущее скорректированное значение смещения  $x_{10}$  (смещение от границ участка квазиулевой жесткости), вычислялось по выражениям (3), как и значение  $F$ , непосредственно в имитационной модели:

$$x_{10} = \begin{cases} |x_1| - \frac{X_0}{2} & \text{при } |x_1| > \frac{X_0}{2}; \\ 0 & \text{при } |x_1| \leq \frac{X_0}{2}. \end{cases} \quad (3)$$

Выражение (3) описывает участок квазиулевой жесткости размером  $X_0$  в середине хода виброзащитного механизма, и справедливо при  $F_0=0$  Н. В реальных механизмах статическая сила  $F_0$ , создаваемая виброзащитным механизмом в зоне квазиулевой жесткости, должна уравновешивать силу тяжести кресла с оператором  $F_g$ . В то же время, учитывая постоянное значение силы тяжести груза  $F_g = \text{const}$ , настоящая математическая модель, полученная при  $F_0=0$  Н, ведет себя полностью идентично модели,

полученной при  $F_0=F_g$ . При условии, что в последней модели функция статической силы виброзащитного механизма на всем диапазоне перемещений увеличена на постоянное слагаемое  $F_g = \text{const}$ .

#### 4. Пример использования разработанной имитационной математической модели кресла

Для запуска разработанной имитационной математической модели необходимо задать значения всех входных параметров модели.

В рассматриваемом примере они принимали значения:  $T_{kon}=500$  с;  $T_{izm}=100$  с;  $dt=0,01$  с;  $m=200$  кг;  $b=20$  Н/(м/с);  $A_{mp}=0,1$  м;  $T_o=5$  с;  $v_0=0$  м/с;  $X_0=0,1$  м;  $X=0,1$  м;  $F_0=0$  Н;  $F_T=1000$  Н;  $\dot{F}_0=0$  Н/м;  $\ddot{F}_0=0$  Н/м<sup>2</sup>;  $\dot{F}_T=20000$  Н/м;  $\ddot{F}_T=0$  Н/м<sup>2</sup>.

График функциональной зависимости, используемой в настоящей работе, статической силы виброзащитного механизма от перемещения кресла относительно основания  $F(x_1)$ , соответствующий приведенным выше значениям параметров исходных данных, приведен на рис. 4.

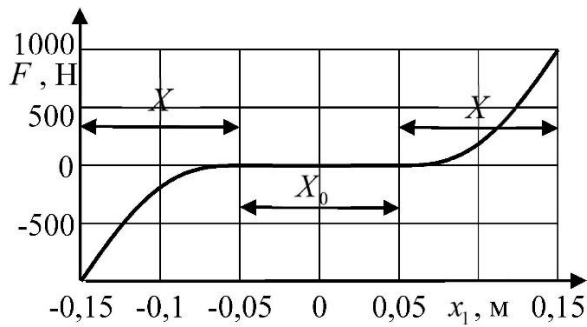


Рис. 4. Функциональная зависимость статической силы виброзащитного механизма от перемещения кресла относительно собственного основания (пример)

Некоторые результаты моделирования в виде временных зависимостей первых 100 с переходного процесса представлены на рис. 5.

Наибольшее практическое значение имеют графики на рис. 5, б, в, где приведены перемещение виброзащитного устройства кресла относительно собственного основания, и абсолютное ускорение кресла с оператором соответственно.

После 100 с переходного процесса и до его окончания (т.е. от 100 до 500 с в рассматриваемом примере) временные зависимости практически не отличаются от второй половины зависимостей, приведенных на рис. 5 (от 50 до 100 с). То есть, зависимости приобретают установившийся, стационарный характер.

Это позволяет оценить как максимальную амплитуду перемещений кресла относительно собственного основания (внутренний ход виброзащитного механизма), так и максимальное ускорение кресла с оператором.

В рассматриваемом примере, при времени оценки  $T_{izm}=100$  с в конце переходного процесса, максимальная амплитуда перемещений кресла относительно собственного основания составила  $z_{1max}=0,102$  м, и максимальное ускорение –  $a_{max}=1,043$  м/с<sup>2</sup>.

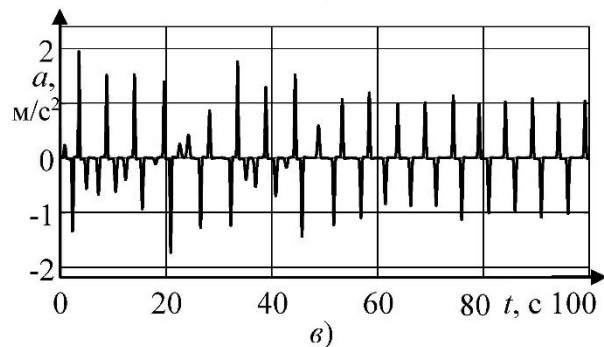
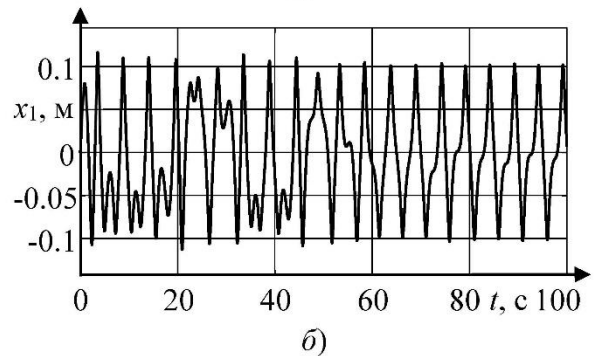
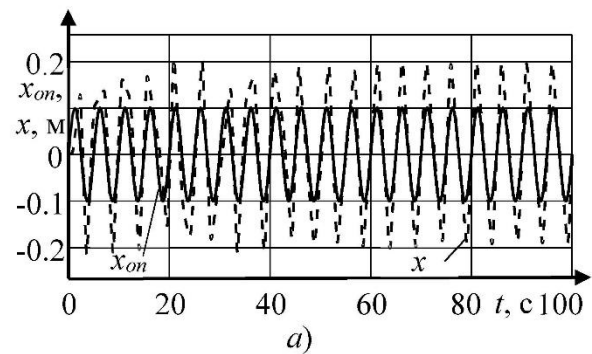


Рис. 5. Пример результатов моделирования в виде временных зависимостей (первые 100 с): а - абсолютных координат основания кресла и его центра масс; б - перемещения кресла относительно собственного основания; в - абсолютного ускорения кресла

## 5. Заключение

С использованием ряда блоков поступательного движения Mechanical Translational Elements библиотеки моделирования физических систем Simscape Foundation MATLAB, разработана имитационная математическая модель виброзащитной системы кресла человека-оператора с участком квазиуравной жесткости.

Разработанная имитационная математическая модель может быть использована для



исследования вынужденных вертикальных колебаний кресла с человеком-оператором.

Использование сплайнов Эрмита для аналитического описания зависимости статической силы виброзащитного механизма от перемещения кресла относительно собственного основания, позволило задать две первые производные статической силы по перемещению, и обеспечить за счет этого плавный переход от участка квазиулевого жесткости к участку возрастающей силы.

Размеры участка квазиулевого жесткости, равно как и значения максимальной силы и ее производных в рассматриваемом диапазоне перемещений кресла относительно собственного основания, могут принимать любые заданные значения.

Использование в модели блока жесткого ограничения перемещений позволило учесть

жесткие упоры, которые имеет любое реальное физическое виброзащитное устройство, и приблизить таким образом математическое описание модели к реальному объекту.

В качестве выходных параметров модели выступают временные зависимости относительной и абсолютной координат кресла с оператором, а также виброускорения. Последующая обработки временных зависимостей при помощи программного кода позволяет определить статистические параметры виброзащитной системы.

Разработанная имитационная математическая модель может быть, при необходимости, интегрирована в качестве составного элемента в модели более высокого иерархического уровня.

#### Список литературы

1. Nehaev V.A., Nikolaev V.A., Zakernichnaya N.V. Vibration protection of a human-operator based on the application of disturbance-stimulated control mechanism // *Journal of Physics Conference Series*. 2018. Vol. 1050. Pp. 012057. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012057
2. Bosnjak S.M., Arsic M.A., Gnjatovic N.B. et al. Failure of the bucket wheel excavator buckets // *Engineering failure analysis*. 2018. Vol. 84. Pp. 247-261. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.11.017
3. Korchagin P.A., Teterina I.A., Rahuba L.F. Improvement of human operator vibroprotection system in the utility machine // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 944. Pp. 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012059
4. Pobedin A.V., Dolotov A.A., Shekhovtsov V.V. Decrease of the vibration load level on the tractor operator working place by means of using of vibrations dynamic dampers in the cabin suspension // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. Pp. 1252-1257. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.136
5. Poje A., Grigolato S., Potočnik I. Operator Exposure to Noise and Whole-Body Vibration in a Fully Mechanised CTL Forest Harvesting System in Karst Terrain // *Croatian*

#### References

1. Nehaev V.A., Nikolaev V.A., Zakernichnaya N.V. Vibration protection of a human-operator based on the application of disturbance-stimulated control mechanism. *Journal of Physics Conference Series*, 2018, Vol. 1050, pp. 012057. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012057
2. Bosnjak S.M., Arsic M.A., Gnjatovic N.B. et al. Failure of the bucket wheel excavator buckets. *Engineering failure analysis*, 2018, Vol. 84, pp. 247-261. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.11.017
3. Korchagin P.A., Teterina I.A., Rahuba L.F. Improvement of human operator vibroprotection system in the utility machine. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 944, pp. 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012059
4. Pobedin A.V., Dolotov A.A., Shekhovtsov V.V. Decrease of the vibration load level on the tractor operator working place by means of using of vibrations dynamic dampers in the cabin suspension. *Procedia Engineering*, 2016, Vol. 150, pp. 1252-1257. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.136
5. Poje A., Grigolato S., Potočnik I. Operator Exposure to Noise and Whole-Body Vibration in a Fully Mechanised CTL Forest Harvesting System in Karst Terrain. *Croatian*

Journal of Forest Engineering. 2019. Vol. 40. Pp. 139-250.

6. Renqiang J., Vanliem N., Vanquynh L. Ride comfort performance of hydro pneumatic isolation for soil compactors cab in low frequency region // *Journal of Vibroengineering*. 2020. Vol. 22. No. 5. Pp. 1174-1186. DOI: 10.21595/jve.2020.21345

7. Lyashenko M.V., Pobedin A.V., Potapov P.V. Analysis of possible dynamic vibration dampers uses in tractor cabins suspensions // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. Pp. 1245-1251. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.132

8. Teterina I.A., Korchagin P.A., Letopolsky A.B. Results of investigating vibration load at human operator's seat in utility machine // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2019. No. 9783319956299. Pp. 177-184. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5\_19

9. Zhang F., Shao S., Tian Z. et al. Active-passive hybrid vibration isolation with magnetic negative stiffness isolator based on Maxwell normal stress // *Mechanical systems and signal processing*. 2019. Vol. 123. Pp. 244-263. DOI: 10.1016/j.ymsp.2019.01.022

10. Зотов А.Н. Виброизоляторы с квази-нулевой жесткостью // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2007. № 2. С. 147-151.

11. Wu W., Tang B. An approximate method for solving force and displacement transmissibility of a geometrically nonlinear isolation system // *International journal of nonlinear mechanics*. 2020. Vol. 125. Pp. 103512. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2020.103512

12. Корытов, М.С., Щербakov В.С., Почекуева И.Е. Сравнительный анализ пружинных механизмов виброзащитных кресел дорожно-строительных машин // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2020. № 1. С. 62-72. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-01-62-72

13. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Titenko V.V., Ots D.A. Simulation model for the determination of energy losses during vibrations of the working equipment of a earth-moving machine in the transport mode // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1260. Pp. 112015. DOI: 10.1088/1742-

*Journal of Forest Engineering*, 2019, Vol. 40, pp. 139-250.

6. Renqiang J., Vanliem N., Vanquynh L. Ride comfort performance of hydro pneumatic isolation for soil compactors cab in low frequency region. *Journal of Vibroengineering*, 2020, Vol. 22, No. 5, pp. 1174-1186. DOI: 10.21595/jve.2020.21345

7. Lyashenko M.V., Pobedin A.V., Potapov P.V. Analysis of possible dynamic vibration dampers uses in tractor cabins suspensions. *Procedia Engineering*, 2016, Vol. 150, pp. 1245-1251. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.132

8. Teterina I.A., Korchagin P.A., Letopolsky A.B. Results of investigating vibration load at human operator's seat in utility machine. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2019, No. 9783319956299, pp. 177-184. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5\_19

9. Zhang F., Shao S., Tian Z. et al. Active-passive hybrid vibration isolation with magnetic negative stiffness isolator based on Maxwell normal stress. *Mechanical systems and signal processing*, 2019, Vol. 123, pp. 244-263. DOI: 10.1016/j.ymsp.2019.01.022

10. Zotov A.N. Vibrozolyatory s kvazinulevoy zhestkostyu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*, 2007, No. 2, pp. 147-151. (In Russian)

11. Wu W., Tang B. An approximate method for solving force and displacement transmissibility of a geometrically nonlinear isolation system. *International journal of nonlinear mechanics*, 2020, Vol. 125, pp. 103512. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2020.103512

12. Korihtov M.S., Therbakov V.S., Pochekueva I.E. Sravniteljnihyj analiz pruzhinnikh mekhanizmov vibrozatitnikh kresel do-rozhno-stroiteljnihkh mashin. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No. 1, pp. 62-72. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-01-62-72

13. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Titenko V.V., Ots D.A. Simulation model for the determination of energy losses during vibrations of the working equipment of a earth-moving machine in the transport mode. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, Vol. 1260, pp. 112015. DOI: 10.1088/1742-

6596/1260/11/112015

14. Кузьмин В.А., Федоткин Р.С., Крючков В.А. Разработка имитационной модели для оценки эффективности виброзащиты системы поддрессирования колесного сельскохозяйственного трактора класса 4 // Инновации в сельском хозяйстве. 2018. № 2 (27). С. 340-347.

15. Yerrawar R.N., Arakerimath R.R. Performance assessment and control policies for semiactive suspension using SIMSCAPE // 2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT): Pune, 2016. Pp. 1163-1168. DOI: 10.1109/ICACDOT.2016.7877769

16. Shustov V.V. Approximation of functions by asymmetric two-point Hermite polynomials and its optimization // Computational mathematics and mathematical physics. 2015. Vol. 55. № 12. Pp. 1960-1974. DOI: 10.7868/S0044466915120169

17. Shustov V.V. Approximation of functions by two-point Hermite interpolating polynomials // Computational mathematics and mathematical physics. 2015. Vol. 55. № 7. Pp. 1077-1093. DOI: 10.7868/S004446691504016X

6596/1260/11/112015

14. Kuzjmin V.A., Fedotkin R.S., Kryuchkov V.A. Razrabotka imitacionnoy modeli dlya ocenki ehffektivnosti vibrozathitih sistemih podressorivaniya kolesnogo seljskokhozyayjstvennogo traktora klassa 4. *Innovatsii v selskom khozyaystve*, 2018, No. 2 (27), pp. 340-347.

15. Yerrawar R.N., Arakerimath R.R. Performance assessment and control policies for semiactive suspension using SIMSCAPE. *2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT)*: Pune, 2016, pp. 1163-1168. DOI: 10.1109/ICACDOT.2016.7877769

16. Shustov V.V. Approximation of functions by asymmetric two-point Hermite polynomials and its optimization. *Computational mathematics and mathematical physics*, 2015, Vol. 55, No. 12, pp. 1960-1974. DOI: 10.7868/S0044466915120169

17. Shustov V.V. Approximation of functions by two-point Hermite interpolating polynomials. *Computational mathematics and mathematical physics*, 2015, Vol. 55, No 7, pp. 1077-1093. DOI: 10.7868/S004446691504016X

УДК (УДК) 621.867.61

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЛИНЫ НАКЛАДКИ НА СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ  
ПАЛЛЕТЫ ПО ЦЕНТРОБЕЖНОМУ ФРИКЦИОННОМУ РОЛИКУTHE INFLUENCE OF THE LENGTH OF THE LINING ON THE SPEED OF  
MOVEMENT OF THE PALLET ON THE CENTRIFUGAL FRICTION ROLLERСафронов Е.В., Носко А.Л., Балашова А.И.  
Safronov E.V., Nosko A.L., Balashova A.I.Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Москва, Россия)  
Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russian Federation)

**Аннотация.** Одним из современных решений по системам хранения высокой плотности для паллет является гравитационный стеллаж. Высокая стоимость гравитационных стеллажей связана с необходимостью применения устройств безопасности, таких как тормозные ролики. В 95% случаев в качестве тормозного ролика используется центробежный фрикционный ролик. В статье проанализирована существующая методика расчета скорости движения паллет по центробежному фрикционному ролику гравитационного стеллажа для паллет, одним из недостатков которой является отсутствие учета длины фрикционной накладки. При этом в действительности контакт фрикционной накладки и обечайки ролика происходит по дуге, которая в процессе эксплуатации достигает полной длины накладки. Предложена методика расчета скорости движения паллеты по центробежному фрикционному ролику, а также получена расчетная формула, позволяющая учитывать равномерное распределение силы нормального давления по длине накладки. Представлены результаты сравнительного расчета, которые показали, что скорость движения паллеты при учете длины накладки ниже значений, полученные без ее учета. Установлено, что при длине накладки до 70 мм её можно не учитывать в расчетах, используя более простую формулу, а при длине накладки более 70 мм - рекомендуется использовать полученную в работе расчетную формулу.

**Ключевые слова:** гравитационный стеллаж, тормозной ролик, центробежный тормоз, фрикционная накладка, паллета.

**Дата принятия к публикации:** 19.10.2020  
**Дата публикации:** 25.12.2020

**Сведения об авторах:**

**Сафронов Евгений Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные системы», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), e-mail: gen-s@mail.ru.

**Abstract.** Pallet flow rack is one of the high-density storage systems. One of the main safety elements of the systems is a brake roller. Centrifugal frictional brake is the widely used type of the brake rollers, which used as speed governor for the pallet. The known method of calculation of the pallet speed on the flow rack does not take into account the length of the friction lining. In reality, the contact of the friction lining and the roller shell occurs in an arc that reaches the full length of the lining during operation. The method of calculating the speed of movement of the pallet on a centrifugal friction roller is given, and a calculation formula is obtained that allows taking into account the uniform distribution of the force of the normal pressure along the length of the lining. The results of a comparative calculation are presented, which showed that the speed of the pallet movement when taking into account the length of the lining is lower than the values obtained without taking it into account. It is found that if the lining length is up to 70 mm, it can be ignored in the calculations using a simpler formula, and if the lining length is more than 70 mm, it is recommended to use the calculation formula obtained in the work

**Keywords:** flow rack, brake roller, centrifugal brake, friction lining, pallet.

**Date of acceptance for publication:** 19.10.2020  
**Date of publication:** 25.12.2020

**Authors' information:**

**Evgeniy V. Safronov** – Candidate Technical Sciences, Assistant of the Department "Lifting and Transport Systems" at Bauman Moscow State Technical University, e-mail: gen-s@mail.ru.

**Носко Андрей Леонидович** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Подъемно-транспортные системы», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана),  
e-mail: [dr.nosko@mail.ru](mailto:dr.nosko@mail.ru).

**Балашова Алина Игоревна** – магистрант, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), e-mail: [balashovaai@mail.ru](mailto:balashovaai@mail.ru).

**Andrey L. Nosko** – Doctor Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department “Lifting and Transport Systems” at Bauman Moscow State Technical University, e-mail: [dr.nosko@mail.ru](mailto:dr.nosko@mail.ru).

**Alina I. Balashova** – graduate student at Bauman Moscow State Technical University,  
e-mail: [balashovaai@mail.ru](mailto:balashovaai@mail.ru).

## 1. Введение

Гравитационные стеллажи представляют собой рамные конструкции [1], на которых установлены гравитационные роликовые конвейеры. Пакетированный груз или паллета легко продвигается из зоны загрузки к зоне выгрузки, двигаясь под действием силы тяжести, не требуя дополнительных усилий или расхода электроэнергии.

Такой тип стеллажей имеет целый ряд преимуществ, таких как [2, 3]:

- уменьшение количества обслуживающего персонала и пробега вилочных погрузчиков;
- увеличение плотности хранения;
- сокращение потребления электроэнергии;
- обеспечение высокой производительности отгрузки.

Однако недостатками гравитационных роликовых конвейеров таких стеллажей являются:

- высокая стоимость;
- особые требования к форме паллет и коробок;
- сложности при проведении инвентаризации на складе.

Высокая стоимость гравитационных стеллажей связана с необходимостью применения устройств безопасности, таких как устройство остановки и разделения паллет и тормозные ролики, работающих как система [4]. Анализ, проведенный в работе [5], показал, что в более чем 95% случаев в качестве тормозных роликов применяются центробежные фрикционные ролики.

Существующая методика расчета центробежных фрикционных роликов [6, 7], расчетная схема которой показана на рис. 1, предназначена для определения скорости установившегося движения паллеты по центробежному фрикционному ролику, которая не должна превышать допустимых значений. Подробно расчет допустимых скоростей из условия работоспособности упора устройства остановки и разделения паллет гравитационного роликового конвейера приведен в [4, 8].

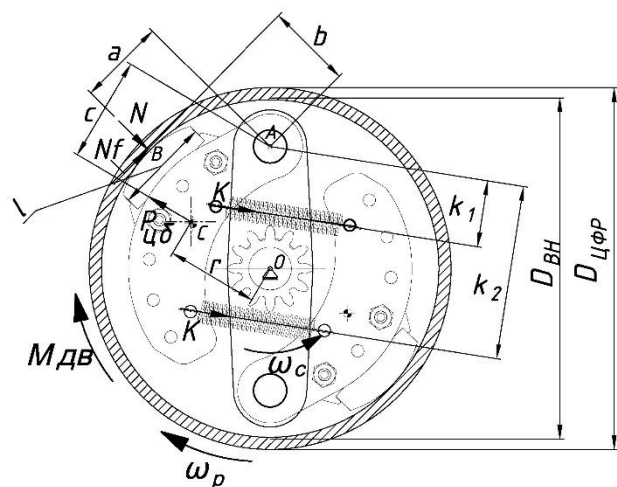


Рис. 1. Расчетная схема центробежного фрикционного ролика

Одним из недостатков предложенной методики расчета центробежного фрикционного ролика является то, что сила трения  $N_f$  между фрикционной накладкой центробежного тормоза и обечайкой, а также сила нормального давления  $N$  приложены по линии контакта  $B$  (центр фрикционной накладки) поперек накладки. Такой подход не учитывает длину  $l$  фрикционной накладки центробежного тормоза (рис. 1), при этом в дейст-

вительности контакт по линии  $B$  имеет место только в начале эксплуатации центробежного фрикционного ролика, когда его фрикционная накладка не полностью притерта к обечайке.

Таким образом, целью работы является исследование влияния длины фрикционной накладки на скорость движения паллет по центробежному фрикционному ролику гравитационного роликового конвейера для паллет.

## 2. Особенности позиционирования фрикционной накладки

Установка фрикционной накладки на тормозной колодке определяется углом установки  $\beta$ , при этом в процессе эксплуатации центробежного фрикционного ролика и износа накладки контактная площадь увеличивается, что приводит к увеличению зоны контакта, определяемой углами контакта  $\beta_1$  и  $\beta_2$ . В процессе длительной эксплуатации зона контакта увеличивается до полной площади фрикционной накладки и определяется углами контакта  $\beta_1^{min}$  и  $\beta_2^{max}$  (рис. 2).

При этом дуга контакта  $l_K$  может быть определена как (рис 2, а):

$$l_K = \frac{D_{BH}}{2} (\beta_2 - \beta_1), \quad (1)$$

где  $D_{BH}$  – внутренний диаметр обечайки центробежного фрикционного ролика.

При условии полной площади фрикционного контакта (рис 2, б):

$$l_K = l_H = \frac{D_{BH}}{2} (\beta_2^{max} - \beta_1^{min}),$$

где  $l_H$  – длина дуги накладки.

Длину накладки можно определить по формуле

$$l = D_{BH} \sin \left( \frac{\beta_2^{max} - \beta_1^{min}}{2} \right).$$

С учетом допущения о симметричности углов контакта  $\beta_1$  и  $\beta_2$  относительно угла установки  $\beta$ , а также с учетом (1):

$$\begin{cases} \beta_1 = \beta - \frac{\beta_2 - \beta_1}{2} = \beta - \frac{l_K}{D_{BH}} \\ \beta_2 = \beta + \frac{\beta_2 - \beta_1}{2} = \beta + \frac{l_K}{D_{BH}} \end{cases} \quad (2)$$

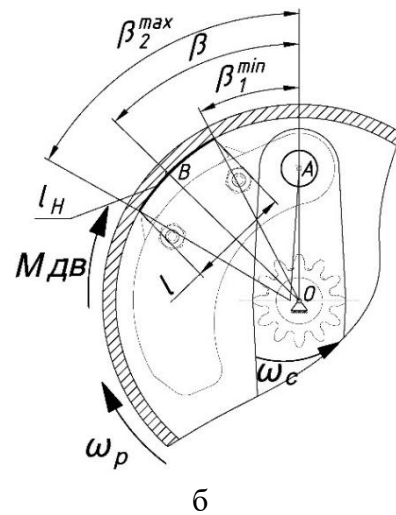
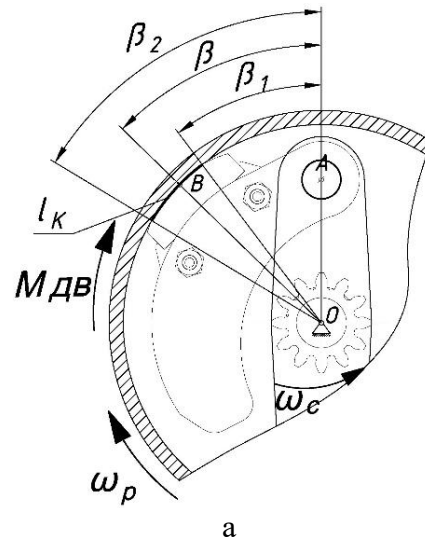


Рис. 2. Углы контакта накладки центробежного фрикционного ролика:

а – при неполной площади контакта,  
 б – при полной площади контакта

Так как для анализа учета длины фрикционной накладки в расчетах нет разницы, рассматривать длину  $l_H$  дуги накладки или длину  $l$  самой накладки, то далее в работе под длиной фрикционной накладки понимается длина дуги накладки.

## 3. Скорость движения паллет по центробежному фрикционному ролику с учетом длины фрикционной накладки

Чтобы определить зависимость скорости движения паллет с учетом длины фрикционной накладки, необходимо знать закон распределения удельных давлений по длине накладки. Как известно из [9, 10] удельное дав-

ление распределено неравномерно по длине накладки. Характер распределения является синусоидальной функцией и пропорционально деформации накладки в процессе ее прижатия. Однако, как показано в работе [9], уточнение при учете неравномерности распределения удельных давлений не превышает 12% по сравнению с равномерным распределением. При этом, как показывают данные, приведенные в работах [10, 11], коэффициент трения для применяемых в центробежных фрикционных роликах материа-

лов изменяется в более широких пределах (до 20% и более). Таким образом, в расчетах скорости движения паллеты по центробежному фрикционному ролику, будем считать, что удельное давление, а значит и сила нормального давления, распределено равномерно по длине фрикционной накладки.

Расчетная схема центробежного фрикционного ролика с равномерным распределением силы  $N$  нормального давления по дуге контакта представлена на рис. 3.

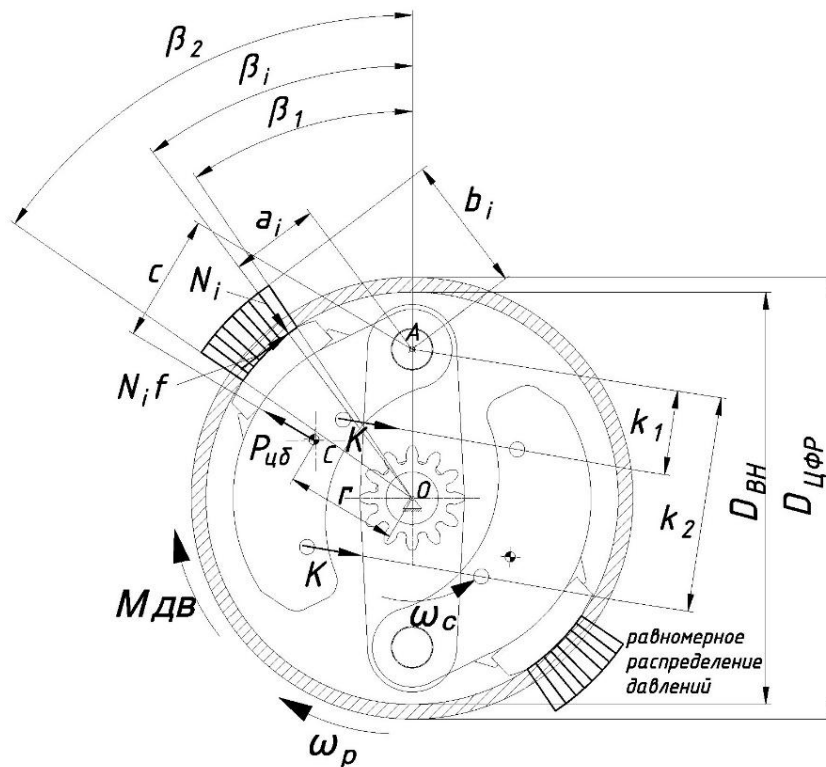


Рис.3. Расчетная схема центробежного фрикционного ролика с равномерным распределением силы  $N$  нормального давления (пружины не показаны) по дуге контакта

Уравнение равновесия сил, действующих на тормозную колодку:

$$P_{цб}c + \sum_i N_i f b_i - \sum_i N_i a_i - K(k_1 + k_2) = 0,$$

где  $P_{цб}$  – центробежная сила, действующая на тормозную колодку;  $c$  – плечо центробежной силы;  $f$  – коэффициент трения;  $N_i$  – значение силы  $N$  в  $i$ -ой точке фрикционной накладки;  $a_i, b_i$  – значение плеч сил трения  $N_i f$  и нормального давления  $N_i$ ;  $K$  – сила упругости размыкающей пружины;  $k_1, k_2$  – плечи действия силы  $K$ .

Из геометрических соображений плечи  $a_i, b_i$ :

$$\begin{cases} a_i = l_0 \sin \beta_i \\ b_i = \frac{D_{вн}}{2} - l_0 \cos \beta_i' \end{cases}$$

где  $l_0$  – расстояние от оси вращения центробежного фрикционного ролика до оси вращения тормозной колодки.

При переходе к интегралу учитываем, что  $N_i$  определено на углах контакта от  $\beta_1$  до  $\beta_2$ , при этом:

$$dN = \frac{N}{l_K} dl_K = \frac{ND_{BH}}{2l_K} d\beta.$$

Тогда уравнение равновесия сил, действующих на тормозную колодку, примет вид:

$$P_{ЦБ}c + \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{ND_{BH}}{2l_K} f \left( \frac{D_{BH}}{2} - l_0 \cos \beta \right) d\beta - \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{ND_{BH}}{2l_K} l_0 \sin \beta d\beta - K(k_1 + k_2) = 0$$

Рассмотрим каждый интеграл отдельно:

$$\int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{ND_{BH}}{2l_K} f \left( \frac{D_{BH}}{2} - l_0 \cos \beta \right) d\beta = \frac{ND_{BH}}{2l_K} f \left[ \frac{D_{BH}}{2} (\beta_2 - \beta_1) - l_0 (\sin \beta_2 - \sin \beta_1) \right].$$

$$\int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{ND_{BH}}{2l_K} l_0 \sin \beta d\beta = -\frac{ND_{BH}}{2l_K} l_0 (\cos \beta_2 - \cos \beta_1).$$

С учетом преобразований и выражений (1) и (2):

$$\sin \beta_2 - \sin \beta_1 = 2 \sin \frac{\beta_2 + \beta_1}{2} \cos \frac{\beta_2 - \beta_1}{2} = 2 \sin \frac{l_K}{D_{BH}} \cos \beta$$

$$\cos \beta_2 - \cos \beta_1 = -2 \sin \frac{\beta_2 + \beta_1}{2} \sin \frac{\beta_2 - \beta_1}{2} = -2 \sin \frac{l_K}{D_{BH}} \sin \beta$$

Тогда выражения интегралов можно преобразовать как:

$$\int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{ND_{BH}}{2l_K} f \left( \frac{D_{BH}}{2} - l_0 \cos \beta \right) d\beta =$$

$$V = \frac{D_{ЦФР}}{2u} \sqrt{\frac{1}{rcm_r} \left\{ N \left[ \frac{D_{BH}}{l_K} \sin \frac{l_K}{D_{BH}} (l_0 \sin \beta + f l_0 \cos \beta) - f \frac{D_{BH}}{2} \right] + K(k_1 + k_2) \right\}}, \quad (6)$$

где сила  $N$  нормального давления может быть найдена по формуле:

$$N = \frac{D_{ЦФР} M g (\tan \alpha - w)}{i_K D_{BH} f (1 + u \eta_{ЦФР})}, \quad (7)$$

где  $D_{ЦФР}$  – диаметр обечайки центробежного фрикционного ролика;  $M$  – масса тормозной колодки;  $\tan \alpha$  – уклон роликового полотна;  $w$  – приведенный коэффициент сопротивления передвижению паллеты по роликовому полотну гравитационного роликового кон-

$$= N f \left( \frac{D_{BH}}{2} - \frac{D_{BH} l_0}{l_K} \sin \frac{l_K}{D_{BH}} \cos \beta \right),$$

$$\int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{ND_{BH}}{2l_K} l_0 \sin \beta d\beta = N \frac{D_{BH} l_0}{l_K} \sin \frac{l_K}{D_{BH}} \sin \beta.$$

Тогда уравнение равновесия сил, действующих на тормозную колодку, примет вид:

$$P_{ЦБ}c + N f \left( \frac{D_{BH}}{2} - \frac{D_{BH} l_0}{l_K} \sin \frac{l_K}{D_{BH}} \cos \beta \right) - N \frac{D_{BH} l_0}{l_K} \sin \frac{l_K}{D_{BH}} \sin \beta - K(k_1 + k_2) = 0.$$

С учетом преобразований получим:

$$P_{ЦБ}c - N \left[ \frac{D_{BH}}{l_K} \sin \frac{l_K}{D_{BH}} (l_0 \sin \beta + f l_0 \cos \beta) - f \frac{D_{BH}}{2} \right] - K(k_1 + k_2) = 0. \quad (3)$$

Центробежная сила в уравнении (4) может быть найдена по формуле:

$$P_{ЦБ} = \frac{m_r \pi^2 n_B^2 r}{30^2}, \quad (4)$$

где  $n_B$  – частота вращения ступицы центробежного тормоза,  $r$  – радиус действия центробежной силы.

Частота вращения ступицы центробежного тормоза при условии отсутствия проскальзывания паллеты по центробежному фрикционному ролику равна:

$$n_B = \frac{60uV}{\pi D_{ЦФР}}, \quad (5)$$

где  $V$  – скорость движения паллеты по центробежному фрикционному ролику.

Тогда из уравнения равновесия (3) с учетом выражений (4) и (5) получим, что скорость движения паллеты по центробежному фрикционному ролику с учетом длины фрикционной накладке:

вейера;  $i_K$  – количество тормозных колодок;  $u$  – передаточное отношение мультипликатора;  $\eta_{ЦФР}$  – коэффициент полезного действия центробежного фрикционного ролика.

#### 4. Результаты и их анализ

Проанализируем полученную зависимость (6) скорости движения паллеты по центробежному фрикционному ролику с



учетом длины фрикционной накладки и сравним с методикой расчета, рассмотренной в [6, 7].

Исходные данные для расчета скорости движения паллеты по центробежному фрикционному ролику представлены в табл. 1.

Таблица 1  
 Исходные данные для расчета скорости движения паллеты по центробежному фрикционному ролику

| Параметр центробежного фрикционного ролика  | Значение | Единица измерения |
|---|----------|-------------------|
| Масса паллеты $M$   | 300-1500 | кг                |
| Диаметр обечайки центробежного фрикционного ролика $D_{\text{ЦФР}}$   | 0,089    | м                 |
| Передаточное отношение мультипликатора $u$  | 24       | -                 |
| Внутренний диаметр обечайки центробежного фрикционного ролика $D_{\text{ВН}}$   | 0,083    | м                 |
| Радиус действия центробежной силы $r$   | 0,0226   | м                 |
| Плечо центробежной силы $s$   | 0,0258   | м                 |
| Масса тормозной колодки $m_{\text{Г}}$  | 0,04     | кг                |
| Количество тормозных колодок $i_{\text{К}}$   | 2        | -                 |
| Приведенный коэффициент сопротивления передвижению паллеты по роликовому полотну гравитационного роликового конвейера $w$ | 0,02     | -                 |
| Уклон роликового полотна $\tan \alpha$  | 0,04     | -                 |
| Коэффициент полезного действия центробежного фрикционного ролика $\eta_{\text{ЦФР}}$                                      | 0,75     | -                 |
| Коэффициент трения $f$  | 0,44     | -                 |
| Длина накладки $l$  | 0,023    | м                 |
| Расстояние от оси вращения центробежного фрикционного ролика до оси вращения тормозной колодки $l_0$                      | 0,03     | м                 |
| Сила упругости размыкающей пружины $K$  | 3,4      | Н                 |
| Плечо первой размыкающей пружины $k_1$  | 0,016    | м                 |
| Плечо второй размыкающей пружины $k_2$  | 0,042    | м                 |

Результаты сравнения методик расчета без учета и с учетом длины фрикционной накладки ( $l_{\text{Н}}=50$  мм) при угле установки фрикционной накладки  $\beta=106^\circ$  представлены на рис. 4.

Расчеты показывают, что для всего диапазона масс паллет расчетные значения скорости движения паллеты по центробежному фрикционному ролику при учете длины накладки при угле ее  $\beta=106^\circ$  меньше, чем без учета длины накладки, полученные в [6, 7].

В процессе износа фрикционной накладки дуга контакта элементов пары трения центробежного фрикционного ролика увеличивается. Зависимость скорости движения

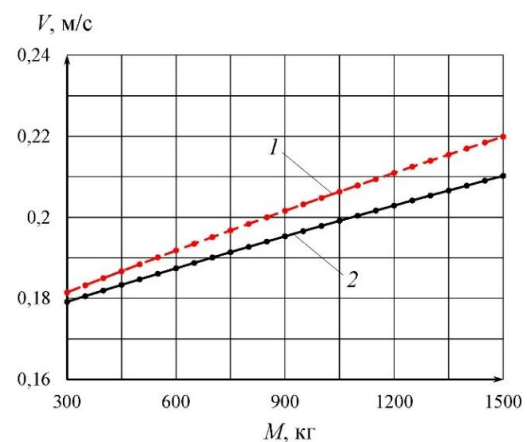


Рис. 4. Скорость движения паллеты по центробежному фрикционному ролику без учета (1) и с учетом (2) длины фрикционной накладки  $l_{\text{Н}}=50$  мм

паллеты по центробежному фрикционному ролику от дуги контакта фрикционной на-  
кладки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость скорости движения паллеты по центробежному фрикционному ролику от дуги контакта фрикционной накладки

| Масса паллеты $M$ , кг | Значения скорости без учета дуги контакта фрикционной накладки, м/с | Значения скорости с учетом дуги контакта фрикционной накладки, м/с |        |        |        |        |
|------------------------|---|--|--------|--------|--------|--------|
|                        |   | Дуга контакта $l_k$ фрикционной накладки, мм                       |        |        |        |        |
|                        |   | 10   | 30     | 50     | 70     | 90     |
| 300                    | 0,1821  | 0,1826   | 0,1817 | 0,1801 | 0,1777 | 0,1746 |
| 350                    | 0,1838  | 0,1843   | 0,1833 | 0,1815 | 0,1788 | 0,1752 |
| 400                    | 0,1854  | 0,1860   | 0,1849 | 0,1828 | 0,1798 | 0,1758 |
| 450                    | 0,1870  | 0,1876   | 0,1864 | 0,1842 | 0,1808 | 0,1764 |
| 500                    | 0,1885  | 0,1892   | 0,1879 | 0,1855 | 0,1818 | 0,1769 |
| 550                    | 0,1901  | 0,1908   | 0,1895 | 0,1868 | 0,1828 | 0,1775 |
| 600                    | 0,1917  | 0,1925   | 0,1910 | 0,1881 | 0,1838 | 0,1781 |
| 650                    | 0,1932  | 0,1941   | 0,1925 | 0,1894 | 0,1848 | 0,1787 |
| 700                    | 0,1948  | 0,1957   | 0,194  | 0,1907 | 0,1857 | 0,1792 |
| 750                    | 0,1963  | 0,1972   | 0,1955 | 0,1920 | 0,1867 | 0,1798 |
| 800                    | 0,1978  | 0,1988   | 0,1969 | 0,1932 | 0,1877 | 0,1804 |
| 850                    | 0,1993  | 0,2003   | 0,1984 | 0,1945 | 0,1887 | 0,1810 |
| 900                    | 0,2008  | 0,2019   | 0,1998 | 0,1958 | 0,1896 | 0,1815 |
| 950                    | 0,2023  | 0,2034   | 0,2013 | 0,1970 | 0,1906 | 0,1821 |
| 1000                   | 0,2037  | 0,2049   | 0,2027 | 0,1982 | 0,1915 | 0,1826 |
| 1050                   | 0,2052  | 0,2064   | 0,2041 | 0,1995 | 0,1925 | 0,1832 |
| 1100                   | 0,2067  | 0,2080   | 0,2055 | 0,2007 | 0,1935 | 0,1838 |
| 1150                   | 0,2081  | 0,2095   | 0,2070 | 0,2019 | 0,1944 | 0,1843 |
| 1200                   | 0,2096  | 0,2109   | 0,2084 | 0,2032 | 0,1954 | 0,1849 |
| 1250                   | 0,2110  | 0,2124   | 0,2097 | 0,2044 | 0,1963 | 0,1855 |
| 1300                   | 0,2124  | 0,2139   | 0,2111 | 0,2056 | 0,1972 | 0,186  |
| 1350                   | 0,2138  | 0,2153   | 0,2125 | 0,2068 | 0,1982 | 0,1866 |
| 1400                   | 0,2171  | 0,2167   | 0,2138 | 0,2079 | 0,1991 | 0,1871 |
| 1450                   | 0,2186  | 0,2182   | 0,2152 | 0,2091 | 0,2000 | 0,1877 |
| 1500                   | 0,2200  | 0,2196   | 0,2165 | 0,2103 | 0,2009 | 0,1882 |

Результаты, приведенные в табл. 2, показывают, что при длине дуги контакта фрикционной накладки менее 70 мм разница в расчетах не превышает 5%. Это позволяет рекомендовать для расчета скорости движения паллеты по центробежному фрикционному ролику формулу, полученную в [6, 7], которая не учитывает длину фрикционной накладки. При длине дуги фрикционной накладки более 70 мм для расчета скорости движения паллеты по центробежному фрик-

ционному ролику предпочтительнее использовать формулу (6), учитывающую длину дуги фрикционной накладки.

#### 4. Заключение

Получена расчетная формула (6) скорости движения паллеты по центробежному фрикционному ролику, учитывающая длину фрикционной накладки, а также проведены

исследования по оценке влияния дуги её контакта.

Проведенные расчеты показывают, что для всего диапазона масс паллет:

- расчетные значения скорости движения паллеты по центробежному фрикционному ролику для угла установки накладки  $\beta=106^\circ$  при учете ее длины меньше, чем без ее учета, полученные в [6, 7];
- при длине дуги контакта фрикционной накладки более 70 мм предпочтительнее

использовать формулу (6) для расчета скорости движения паллеты по центробежному фрикционному ролику;

- при длине дуги контакта фрикционной накладки менее 70 мм разница в расчетах не превышает 5%, что позволяет не учитывать длину фрикционной накладки в расчетах скорости движения паллеты по центробежному фрикционному ролику и использовать для ее определения формулу, полученную в [6, 7].

### Список литературы

1. Vujanac R., Miloradovic N., Vulovic S. Dynamic storage systems // *International Journal of Engineering*. 2016. Vol. XIV. P. 79-82.

2. Wu S., Wu Ya., Wang Ya., A structured comparison study on storage racks system. *Journal of Residuals Science & Technology*. 2016. Vol. 13. № 8.

3. Sulirova I., Zavodska L., Rakyta M., Pelantova V. State-of-the-art approaches to material transportation, handling and warehousing // *12th International scientific conference of young scientists on sustainable, modern and safe transport*, *Procedia Engineering*, Vol. 192, 857-862.

4. Сафронов Е.В., Шарифуллин И.А., Носко А.Л. Устройства безопасной эксплуатации гравитационных роликовых конвейеров паллетного типа. М: Университетская книга, 2018. 72 с.

5. Сафронов Е.В. Анализ конструкций тормозных роликов гравитационных конвейеров для паллет // Наземные транспортно-технологические средства: проектирование, производство, эксплуатация: Материалы I Всеросс. заочн. научно-практ. конф. Чита: Забайкальский государственный университет. 2016. С. 53-62.

6. Сафронов Е.В. Обеспечение безопасности и повышение эффективности работы гравитационного стеллажа для паллет: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04. М., 2019. 164 с.

7. Носко А. Л., Сафронов Е. В. Методика расчета тормозного ролика центробежного типа применительно к гравитационным роликовым конвейерам для паллет // *Механизация строительства*. 2017. Т. 78, №

### References

1. Vujanac R., Miloradovic N., Vulovic S. Dynamic storage systems. *International Journal of Engineering*, 2016, Vol. XIV, pp. 79-82.

2. Wu S., Wu Ya., Wang Ya. A structured comparison study on storage racks system. *Journal of Residuals Science & Technology*, 2016, Vol. 13, No. 8.

3. Sulirova I., Zavodska L., Rakyta M., Pelantova V., State-of-the-art approaches to material transportation, handling and warehousing. *12th International scientific conference of young scientists on sustainable, modern and safe transport*. *Procedia Engineering*, Vol. 192, pp. 857-862

4. Safronov E.V., Sharifullin I.A., Nosko A.L. *Ustroystva bezopasnoy ekspluatatsii gravitatsionnykh rolikovykh konveyerov pаллетnogo tipa* [Devices for safe operation of gravity roller conveyors of pallet type]. Moscow, Universitetskaya kniga, 2018. 72 p. (In Russian)

5. Safronov E.V. Analysis of designs of brake rollers gravity conveyors for pallets. *Nazemnye transportno-tekhnologicheskie sredstva: proektirovanie, proizvodstvo, ekspluatatsiya: Materialy I Vserossiyskoy zaochnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Ground transport and technological means: design, production, operation: Materials of the I all-Russian correspondence scientific and practical conference]. Chita. Zabaykal'skiy gosudarstvennyy universitet. 2016. P. 53-62. (In Russian)

6. Safronov E.V. Ensuring safety and increasing the efficiency of the gravity pallet rack. Diss. Cand. Sci.(Engineering). Moscow,

6. С. 26-31.

8. Safronov E., Nosko A. A method to determine allowable speed for a unit load in a pallet flow rack // *Acta Mechanica et Automatica*. 2019. Vol.13. № 2. P. 80-85. DOI: <https://doi.org/10.2478/ama-2019-0011>

9. Поляков В.С., Барбаш И.Д. Муфты. Конструкции и расчет. . Л.: Машиностроение, 1973. 336 с.

10. Александров М.П. Тормоза подъемно-транспортных машин. М.: Машгиз, 1953. 228 с.

11. Сафронов Е.В., Носко А.Л. Оценка неустойчивости коэффициента трения вальцованных ФПМ при низких давлениях // *Трибология – Машиностроению: Труды XII Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН*. Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований. 2018. С. 459-46.

‡ 2019. 164 P. (In Russian)

‡ 7. Nosko A.L., Safronov E.V. Calculation method for centrifugal type brake roller applied to gravity roller conveyors for pallets. *Mekhanizatsiya stroitelstva*, 2017, Vol. 78, No. 6, pp. 26-31. (In Russian)

‡ 8. Safronov E., Nosko A. A method to determine allowable speed for a unit load in a pallet flow rack. *Acta Mechanica et Automatica*, 2019, Vol.13, No.2, pp 80-85. DOI: <https://doi.org/10.2478/ama-2019-0011>

‡ 9, Polyakov V.S., Barbash I.D. *Mufty. Konstruktsii i raschet*. [Couplings. Constructions and calculation]. Leningrad, Mashinostroyeniye, 1973. 336 P. (In Russian)

‡ 10. Aleksandrov M.P. *Tormoza pod'yemno-transportnykh mashin* [Brakes of hoisting machines]. Moscow, Mashgiz. 1953. 228 p. (In Russian)

‡ 11. Safronov E.V., Nosko A.L. Otsenka nestabil'nosti koeffitsiyenta treniya valtsovannykh FPM pri nizkikh davleniyakh. *Tribologiya – Mashinostroyeniye: Trudy XII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu IMASH*. Izhevsk, Izhevsk Institute for Computer Research, 2018, pp. 459-461. (In Russian)

УДК (UDC) 621.86

**СТРУКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ГИДРОПРИВОДА МОБИЛЬНОГО  
ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕГРУЗОЧНОГО КАНАТНОГО КОМПЛЕКСА  
НА ОСНОВЕ ПАРЕТО-ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ****STRUCTURAL OPTIMIZATION OF THE HYDRAULIC DRIVE OF A MOBILE  
TRANSPORT AND RELOADING ROPE COMPLEX BASED ON  
PARETO-OPTIMAL SOLUTIONS**Таричко В.И.  
Tarichko V.I.АО «Брянский автомобильный завод» (Брянск, Россия)  
Bryansk Automobile Plant JSC (Bryansk, Russian Federation)

**Аннотация.** В статье предложен метод структурной оптимизации гидропривода мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов на базе специальных многоосных шасси повышенной грузоподъемности и проходимости. В настоящее время данный вид технологических машин можно рассматривать как новый класс технологических надземных транспортирующих средств, являющийся эффективной альтернативой стационарных грузовых канатных дорог для труднодоступных территорий со сложным рельефом и при необходимости оперативного развертывания транспортно-логистических операций. Рассмотрен алгоритм формирования множества Парето, состоящее из множества альтернативных вариантов исполнения гидропривода на основе сочетания объемных насосов и гидродвигателей допустимых типоразмеров. Предложен критерий выбора парето-оптимальных решений проектируемого гидропривода, исходя из трех показателей качества – суммарной массы гидромашин, удельной мощности и коэффициента полезного действия гидропривода.

**Ключевые слова:** мобильный канатный комплекс, гидропривод, структурная оптимизация, парето-оптимальное решение.

**Дата принятия к публикации:** 10.10.2020  
**Дата публикации:** 25.12.2020

**Сведения об авторе:**

**Таричко Вадим Игоревич** – кандидат технических наук, заместитель генерального директора – главный конструктор АО «Брянский автомобильный завод», e-mail: 32.6909@mail.ru

**Abstract.** The article proposes a method of structural optimization of the hydraulic drive of mobile transport and reloading rope complexes based on special multi-axle chassis with increased carrying capacity and cross-country ability. At present, this type of technological machines can be considered as a new class of technological overground transport vehicles, which is an effective alternative to stationary freight ropeways for hard-to-reach areas with difficult terrain and, if necessary, the rapid deployment of transport and logistics operations. An algorithm for the formation of the Pareto set is considered, which consists of a variety of alternative versions of the hydraulic drive based on a combination of positive displacement pumps and hydraulic motors of permissible standard sizes. A criterion for choosing the Pareto-optimal solutions of the designed hydraulic drive is proposed, based on three quality indicators - the total mass of the hydraulic machines, the specific power and the efficiency of the hydraulic drive.

**Keywords:** mobile aerial rope complex, hydraulic drive, structural optimization, Pareto-optimal solution.

**Date of acceptance for publication:** 10.10.2020  
**Date of publication:** 25.12.2020

**Author's information:**

**Vadim I. Tarichko** – Candidate of Technical Sciences, Deputy general director – General designer, Bryansk Automobile Plant JSC, e-mail: 32.6909@mail.ru

**Благодарности**

*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-докторов наук №МД-422.2020.8*

**Acknowledgements**

*The study was supported by Presidential Grant for Governmental Support to Young Russian Scientists No. №MD-422.2020.8*

## 1. Введение

Канатные транспортные системы в виде стационарных подвесных или буксировочных канатных дорог получили широкое распространение для организации перевозки грузов и пассажиров в горной и труднодоступной местности [1, 2]. Стационарность несущих конструкций препятствует оперативной перестройке транспортной сети под изменяющиеся интересы пользователей [1, 3]. Кроме того, невозможно быстрое возведение стационарных конструкций в труднодоступной местности, в условиях Арктики, а также в сложной оперативной обстановке, например, в условиях чрезвычайных ситуаций и др. [2].

Эффективной альтернативой стационарным канатным дорогам являются мобильные канатные транспортно-переправочные дороги и комплексы, у которых необходимое технологическое оборудование размещено на специальных многоцелевых шасси повышенной проходимости и грузоподъемности [2]. Мобильные канатные дороги и комплексы в условиях сложной оперативной обстановки могут обеспечить быструю переброску сил и средств через различные преграды (реки, болота, овраги). Они могут использоваться там, где применение других видов мобильной транспортно-перегрузочной техники невозможно или не целесообразно.

В настоящее время как в России, так и за рубежом отсутствуют мобильные машины и оборудование для практической реализации задачи по использованию канатных технологий с надземным перемещением транспортируемых грузов, достаточно хорошо зарекомендовавших себя для решения транспортно-логистических проблем на труднодоступных территориях со сложным рельефом. Поэтому несомненную актуальность имеют теоретические исследования и технологические разработки, направленные на эффективное решение транспортно-перегрузочных логистических задач на основе нового класса перспективных конкурентоспособных машин и на создание научных основ оптимального проектирования их механизмов и узлов для реализации мехатронных канатных тех-

нологий надземного транспортирования различных грузов.

В этой связи важное значение имеет создание расчетных методик автоматизированного проектирования гидропривода (включая задачу оптимизации структуры и ключевых технических характеристик привода) технологического оборудования мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов [4-6]. В определенной мере для решения этой проблемы можно использовать уже имеющиеся наработки по исследованию гидроприводов с частотно-дрессельным регулированием, например, представленные в [7-8].

## 2. Постановка задачи

Как показывает опыт проектирования насосных гидроприводов механизмов движения, используемых в настоящее время в различных механизмах и машинах, высокие показатели качества гидропривода в целом во многом определяются правильным выбором их основных технических характеристик – номинального рабочего давления  $p_{nom}$  и номинального расхода рабочей жидкости  $Q_{nom}$ , а также рациональной структурой гидропривода, т.е. составом используемых конструктивных элементов – гидромашин, гидроустройств и гидроаппаратов [10, 11].

В исходном документе на проектирование гидропривода – техническом задании – или по результатам начального этапа проектирования транспортно-технологической машины конструктору становится известна требуемая мощность  $N_{hd}$ , которую должен развивать проектируемый привод, и скорости выходных звеньев отдельных гидродвигателей [4, 12, 13]. Требуемая мощность определяется суммированием (с некоторым запасом работоспособности) мощности механизмов отдельных движений, которые по условиям технического задания или согласно нормативным документам Ростехнадзора могут или должны выполняться одновременно [14]. Мощность механизма однозначно определяется регламентируемыми заказчиком значением преодолеваемой выходным звеном гидродвигателя нагрузки и скоростью движения. Для

гидродвигателя механизма возвратно-поступательного движения (гидроцилиндра) преодолеваемая эксплуатационная (рабочая) нагрузка выражается сосредоточенной силой сопротивления линейному движению  $F$ , а скорость движения – линейной скоростью  $v$ . Для гидродвигателя механизма возвратно-поступательного движения (поворотного гидродвигателя) – крутящим моментом сопротивления при поворотном движении  $M$  и угловой скоростью  $\dot{\phi}$ . Для гидродвигателя механизма вращательного движения (гидромотора или обратимой гидромашины) – крутящим моментом сопротивления при вращательном движении  $M$  и частотой вращения  $n$ .

Таким образом, мощность отдельного механизма движения пропорциональна [10, 15, 16]:

- при линейном движении выходного звена гидродвигателя

$$N_{hd} \sim Fv;$$

- при поворотном движении выходного звена гидродвигателя

$$N_{hd} \sim M\dot{\phi};$$

- при вращательном движении выходного звена гидродвигателя

$$N_{hd} \sim 2\pi Mn;$$

- при наличии в конструкции гидропривода гидродвигателей, реализующих все перечисленные виды движения выходного звена

$$N_{hd} \sim \sum_{k=1}^{k=K} F_k v_k + \sum_{l=1}^{l=L} M_l \dot{\phi}_l + \sum_{m=1}^{m=M} M_m n_m,$$

где  $K, L, M$  – число гидродвигателей возвратно-поступательного, возвратно-поворотного и вращательного движения в составе гидропривода.

Необходимое значение  $N_{hd}$  обеспечивается соответствующим выбором номинального рабочего давления  $p_{nom}$  и номинального расхода рабочей жидкости  $Q_{nom}$  в гидроприводе таким образом, чтобы соблюдалось соотношение (рис. 1):

$$N_{hd} \sim p_{nom} Q_{nom} = const. \quad (1)$$

Необходимое значение  $N_{hd}$  может быть получено при различных сочетаниях давления  $p_{nom}$  и расхода  $Q_{nom}$ , удовлетворяющих совместно условию (1). Каждое подходящее

сочетание  $p_{nom}$  и  $Q_{nom}$  следует рассматривать как отдельный вариант структурного исполнения гидропривода.

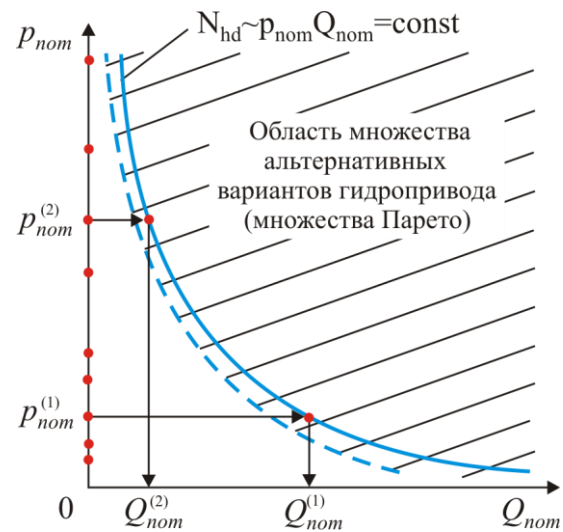


Рис. 1. Область существования возможных вариантов структурного исполнения гидропривода

Согласно ГОСТ 12445-80 [16] выбор возможного значения номинального давления  $p_{nom}$  должен производиться, исходя из нормального ряда давлений рабочей жидкости. Для гидроприводов транспортно-технологических и подъемно-транспортных машин и устройств, к числу которых относятся мобильные канатные комплексы, номинальные давления  $p_{nom}$  составляют 2,5; 4; 6,3; 10; 12,5; 16; 20; 25; 32; 40; 50 МПа. Для каждого значения давления отечественной и зарубежной промышленностью выпускаются объемные насосы разных типов и разной величины подачи  $Q_{nom}$  [15, 17, 18].

Таким образом, на основе всего множества выпускаемых промышленностью объемных насосов, каждый из которых характеризуется допустимым сочетанием пары дискретных значений – рабочего давления  $p_{nom}$  и объемной подачи насоса  $Q_{nom}$  – можно сформировать достаточное число вариантов структурного исполнения гидропривода мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса. Между собой эти варианты будут отличаться достигаемыми технико-экономическими показателями, причем следует ожидать, что среди них нельзя будет найти такой вари-

ант, который бы оказался наилучшим по всем показателям качества, предъявляемым к проектируемому гидроприводу. Следует ожидать, что будет выявлено несколько конкурирующих вариантов структурного исполнения гидропривода, каждый из которых будет показывать наилучшие значения части учитываемых показателей качества.

Это обстоятельство позволяет ставить задачу выявления оптимального варианта проектируемого насосного гидропривода как задачу выбора варианта, обладающего наилучшими значениями учитываемых проектировщиком технико-экономических показателей качества, путем выявления и анализа множества парето-оптимальных решений-вариантов [5, 19].

### 3. Методика парето-оптимизации структурного исполнения гидропривода

В [20] рассматривается структурная схема гидропривода мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса, которую можно рассматривать как типовую для данного вида транспортно-технологических машин. Анализ данной структурной схемы гидропривода, а также известного технического решения самоходной концевой станции мобильной канатной дороги [21] позволяет считать, что в наиболее общем случае гидропривод мобильного канатного комплекса должен обеспечивать работу нескольких его механизмов:

- механизма движения несущего тягового каната на базе гидродвигателя вращательного движения;

- механизма установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении на базе гидроцилиндра возвратно-поступательного движения;

- механизма ориентации канатного шкива на базе гидроцилиндра возвратно-поступательного движения;

- механизма установки аутригеров на базе четырех однотипных гидроцилиндров возвратно-поступательного движения;

- механизма привода анкерных устройств на основе нескольких гидродвигателей возвратно-поступательного или возвратно-поворотного движения.

Особенностью работы гидропривода мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса является то, что эти механизмы по времени работают индивидуально. Таким образом, при расчетной оценке одних показателей качества надо суммарно учитывать технические характеристики всех структурных элементов гидропривода, тогда как при оценке других – технические характеристики отдельного механизма. Примером первых показателей качества могут служить массо-габаритные показатели, примером вторых – энергетические показатели гидропривода.

Управляемыми параметрами задачи оптимизации будут выступать две характеристики, отличающие возможные варианты гидропривода друг от друга и подлежащие определению при выборе оптимального решения:

$$\{x\} = \{x_1 \quad x_2\} = \{p_{nom} \quad Q_{nom}\}.$$

В качестве показателей оптимальности, которые целесообразно учитывать при проектировании гидропривода мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса, учитывая рекомендации [5, 10, 22], целесообразно использовать такие технико-экономические и массо-габаритные характеристики, как

- коэффициент полезного действия гидропривода  $\eta_{hd}$ ;

- удельную мощность гидропривода  $n_{sp}$ ;

- общую массу гидромашин (насоса и гидродвигателей)  $m_{cm}$ .

Таким образом, задача оптимального проектирования гидропривода представляет собой задачу многокритериальной условной оптимизации. Векторная целевая функция имеет следующий вид

$$V(\{x\}, \{z\}) = V(-O\{x\}, \{z\})_{\eta};$$

$$-O\{x\}, \{z\})_{\eta}; O\{x\}, \{z\})_{m} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $O\{x\}, \{z\})_{\eta}$ ;  $O\{x\}, \{z\})_{\eta}$ ;  $O\{x\}, \{z\})_{m}$  - частные целевые функции показателей оптимальности  $\eta_{hd}$ ,  $n_{sp}$ ,  $m_{cm}$ .

На целевую функцию (2) накладываются ограничения, обусловленные лимитированием предельных (минимальных и максимальных) значений управляемых параметров, исходя из номенклатуры выпускаемых промышленностью объемных насосов:



$$\begin{aligned}x_1 - [p_{nom}]_{\min} &\geq 0; \\ [p_{nom}]_{\max} - x_1 &\geq 0; \\ x_2 - [Q_{nom}]_{\min} &\geq 0; \\ [Q_{nom}]_{\max} - x_2 &\geq 0,\end{aligned}$$

В выражении (2) знак «минус» перед частным целевыми функциями  $O\{x\}, \{z\}\}_\eta$  и  $O\{x\}, \{z\}\}_n$  обусловлен тем, что соответствующие им показатели  $\eta_{hd}$  и  $n_{cp}$  требуют нахождения их максимума.

Алгоритм построения множества Парето возможных вариантов исполнения гидропривода мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса включает последовательное проведение следующих расчетных действий:

1) расчет требуемых расходов жидкости в гидроприводе при различном рабочем давлении;

2) определение максимального и минимального расхода жидкости при различном рабочем давлении;

3) определение интервала допустимых рабочих давлений проектируемого гидропривода;

4) подбор насосов на различное рабочее давление (установление возможных альтернативных вариантов исполнения проектируемого гидропривода – формирование множества Парето исполнения гидропривода);

5) расчет показателей оптимальности для всех вариантов исполнения гидропривода;

6) выбор парето-оптимальных решений структурного исполнения гидропривода;

7) анализ выявленных парето-оптимальных решений и решение вопроса о структурном исполнении гидропривода.

Расчет требуемых расходов жидкости в гидроприводе при различном рабочем давлении включает расчет требуемых индивидуальных расходов рабочей жидкости в каждом из гидродвигателей, обеспечивающих преодоление заданной внешней нагрузки на выходном звене с заданной скоростью его движения, а также суммарного расхода в гидроприводе.

При этом необходимо рассмотреть все возможные варианты одновременной работы гидродвигателей и в качестве дальнейшего

расчетного варианта выбрать тот, при котором гидропривод должен обеспечиваться наибольший расход. Как правило, такой вариант определяется необходимостью обеспечения работы либо механизма движения несущего каната, либо механизма установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении.

Расчет требуемых расходов жидкости выполняется для всех значений рабочего давления  $p_{nom}$  из нормального ряда в интервале 2,5...50 МПа согласно ГОСТ 12445-80 [16].

Индивидуальный расход жидкости  $Q_i$  в  $i$ -м гидродвигателе определяется его конструктивным типом и рассчитывается по следующим зависимостям:

- для гидроцилиндра

$$Q_i = k_s F_i v_i;$$

- для поворотного гидродвигателя

$$Q_i = k_s M_i \dot{\phi}_i / p_{nom};$$

- для гидромотора

$$Q_i = 2\pi k_s M_i n_i / p_{nom},$$

где  $k_s$  – коэффициент запаса по усилию (рекомендуется  $k_s = 1,1 \dots 1,3$  [10]).

Суммарный требуемый расход жидкости  $Q_{nom}$  определяется как сумма расходов всех одновременно работающих гидродвигателей

$$Q_{nom} = \sum_i Q_i.$$

Величина максимального возможного расхода жидкости  $Q_{\max}$  в гидроприводе определяется, исходя из возможности подбора существующего насоса одного из выбранных конструктором типов:

$$Q_{\max} = \max_j (Q_{\max,j}),$$

где  $Q_{\max,j}$  – максимальная подача насосов  $j$ -го типа для номинального давления на выходе  $p_{nom}$ .

Величина минимального возможного расхода жидкости  $Q_{\min,i}$  в каждом  $i$ -м двигателе проектируемого гидропривода определяется по условию прочности их выходных звеньев.

Для гидроцилиндров и поршневых поворотных двигателей в качестве условия прочности используется условие недопущения

потери устойчивости штока под действием сжимающей осевой нагрузки, для шиберных поворотных двигателей и гидромоторов – условие недопущения разрушения выходного вала под действием скручивающей нагрузки. Приближенные зависимости для расчета минимальных расходов  $Q_{\min,i}$  имеют вид [10]:

- для поршневого гидроцилиндра

$$Q_{\min,i} = (1/k_d^2 - 1) k_f l_i v_i \sqrt{k_s F_i};$$

- для поршневого поворотного гидродвигателя

$$Q_{\min,i} = k_f k_s \varphi_i^2 \dot{\varphi}_i M_i / k_d^4;$$

- для шиберного поворотного гидродвигателя

$$Q_{\min,i} = n_{b,i} (1 - k_d^2) k_s \dot{\varphi}_i M_i / k_d^3,$$

где  $l_i$  – ход поршня;  $\varphi_i$  – угол поворота;  $k_f$  – коэффициент закрепления гидроцилиндра, определяемый [10];  $k_d$  – коэффициент диаметра штока ( $k_d = 0,5 \dots 0,7$ );  $n_{b,i}$  – число лопастей шиберного гидродвигателя.

Суммарный минимальный расход жидкости  $Q_{\min}$  в гидроприводе определяется как сумма расходов  $Q_{\min,i}$  всех одновременно работающих гидродвигателей

$$Q_{\min} = \sum_i Q_{\min,i}.$$

При определении интервала допустимых рабочих давлений проектируемого гидропривода значение минимально допустимого давления  $p_{\min}$  определяется по условию

$$Q_{nom}(p_{\min}) \leq Q_{\max}(p_{\min}),$$

а максимально допустимого давления  $p_{\max}$  – по условию

$$Q_{nom}(p_{\max}) \geq Q_{\min}(p_{\max}).$$

Оба найденных значения округляются до ближайшего большего из нормального ряда давлений согласно ГОСТ 12445-80 [16].

Рабочее давление  $p_{nom} < p_{\min}$  недопустимо из-за невозможности подобрать подходящий типоразмер насоса, а давление  $p_{nom} > p_{\max}$  недопустимо из-за необеспеченности прочности выходных звеньев гидродвигателей.

Графически процесс определения интервала допустимых рабочих давлений можно проиллюстрировать рис. 2.

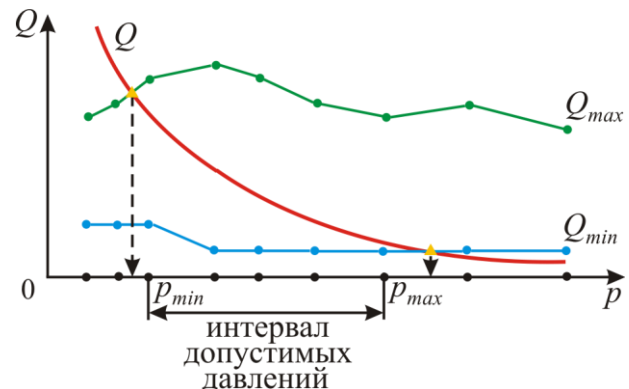


Рис. 2. Определение интервала допустимых рабочих давлений оптимизируемого гидропривода

Подбор насосов на различное рабочее давление является по своему смыслу является установлением возможных вариантов исполнения оптимизируемого гидропривода. Для каждого рабочего давления в пределах интервала  $p_{nom} \in [p_{\min}; p_{\max}]$  из насосов всех выбранных типов подбираются подходящие типоразмеры, которые должны удовлетворять следующим условиям:

$$Q_p > Q_{nom}; \quad p_p \geq p_{nom}.$$

Параметры  $Q_p$  и  $p_p$  различных типоразмеров насосов отечественного и зарубежного производства наиболее распространенных типов указаны, в частности, в [10, 15, 17, 18].

Количество подобранных таким образом типоразмеров насосов определяет объем множества решений Парето (число альтернативных вариантов исполнения гидропривода). Среди этих альтернативных вариантов подлежат дальнейшему выбору парето-оптимальные решения гидропривода для заданных условий эксплуатации мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса.

Расчет показателей оптимальности для всех вариантов исполнения гидропривода базируется на известных зависимостях проектирования объемных насосных гидроприводов [1, 11, 12, 23-25].

Общая масса гидромашин для  $k$ -го варианта исполнения  $m_{cm,k}$  рассчитывается по зависимости

$$m_{cm,k} = m_{p,k} + \sum_i m_{hd,i},$$

где  $m_{p,k}$  – масса насоса для  $k$ -го варианта исполнения гидропривода;  $m_{hd,i}$  – масса  $i$ -го гидродвигателя.

Для целей структурной оптимизации гидропривода на ранней стадии проектирования масса гидродвигателей  $m_{hd,i}$  приближенно может быть определена на основе следующих зависимостей, предложенных в [10]:

- для гидроцилиндра с односторонним штоком или с возвратной пружиной

$$m_{hd,i} = \frac{9500 l_i Q_i}{(1-k_d^2) v_i} \left[ k_d^2 + 2 \left( \sqrt{\frac{[\sigma] + 0,5 p_{nom}}{[\sigma] - 1,63 p_{nom}}} - 1 \right) \right];$$

- для гидроцилиндра с двухсторонним штоком

$$m_{hd,i} = \frac{19000 l_i Q_i}{(1-k_d^2) v_i} \left( k_d^2 + \sqrt{\frac{[\sigma] + 0,5 p_{nom}}{[\sigma] - 1,63 p_{nom}}} - 1 \right);$$

- для поршневого поворотного гидродвигателя

$$m_{hd,i} = \frac{15000 Q_i}{n_{pi} \dot{\phi}_i} \times$$

$$\left\{ n_{pi} \left[ \frac{\phi_i k_d^2}{2} + 2 \phi_i \left( \sqrt{\frac{[\sigma] + 0,5 p_{nom}}{[\sigma] - 1,63 p_{nom}}} - 1 \right) + \sqrt{\frac{1,25 p_{nom}}{[\sigma]}} + 2 k_d \right] \right\};$$

- для шиберного поворотного гидродвигателя

$$m_{hd,i} = \frac{5 \cdot 10^4 Q_i}{(1-k_d^2) n_{b,i}} \left[ k_d^2 (1 - \pi n_{b,i}) + \pi n_{b,i} k_d + 2 \left( \sqrt{\frac{[\sigma] + 0,5 p_{nom}}{[\sigma] - 1,63 p_{nom}}} - 1 \right) + \sqrt{\frac{1,25 p_{nom}}{[\sigma]}} \right],$$

где  $n_{pi}$  – число поршней поворотного гидродвигателя;  $[\sigma]$  – допустимое напряжение на разрыв материала корпуса гидроцилиндра.

Коэффициент полезного действия  $k$ -го варианта гидропривода рассчитывается по зависимости

$$\eta_{hd,k} = \frac{\eta_{p,k} k_s}{P_{nom,k} Q_{nom,k}} \times \left( \sum_{\nu=1}^{n_{\nu}} F_{\nu} v_{\nu} + \sum_{\mu=1}^{n_{\mu}} M_{\mu} \dot{\phi}_{\mu} + 2\pi \sum_{\lambda=1}^{n_{\lambda}} M_{\lambda} n_{\lambda} \right),$$

где  $\eta_{p,k}$  – коэффициент полезного действия типоразмера насоса  $k$ -го варианта;  $n_{hc}$ ,  $n_{rd}$ ,  $n_{hm}$  – число входящих в состав гидропривода гидроцилиндров, поворотных двигателей и гидромоторов.

Удельная мощность  $k$ -го варианта гидропривода  $n_{sp,k}$  определяется по зависимости

$$n_{sp,k} = k_s \left( \sum_{\nu=1}^{n_{hc}} F_{\nu} v_{\nu} + \sum_{\mu=1}^{n_{rd}} M_{\mu} \dot{\phi}_{\mu} + \sum_{\lambda=1}^{n_{hm}} M_{\lambda} n_{\lambda} \right) / m_{cm,k}.$$

Среди альтернативных вариантов исполнения гидропривода, формирующих в целом множество Парето, находятся те из них, которые имеют наибольшие значения коэффициента полезного действия  $\eta_{hd,k}$  и удельной мощности гидропривода  $n_{sp,k}$ , и эти значения присваиваются параметрам  $\eta_{hd,max}$  и  $n_{sp,max}$ . Аналогично находятся те варианты, которые имеют наименьшие значения общей массы гидромашин  $m_{cm,k}$ , и эти значения присваиваются параметру  $m_{cm,min}$ .

Указанные варианты исполнения гидропривода следует рассматривать как парето-оптимальные решения, каждое из которых является вариантом структурной оптимизации проектируемого гидропривода и каждое из которых поэтому может быть положено в основу дальнейшего детального проектирования гидропривода мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса.

Представляется также целесообразным проведение итогового анализа выявленных парето-оптимальных решений на основе их взаимного ранжирования.

Для этого каждому парето-оптимальному решению присваивается ранг в интервале от 1 до  $N_{Popt}$  включительно, где  $N_{Popt}$  – число парето-оптимальных решений. Ранг назначается следующим образом: наилучшему варианту по  $k$ -му критерию оптимальности присваивается ранг  $\rho_{n,k} = 1$ , следующему за ним – ранг  $\rho_{n,k} = 2$  и так далее до наихудшего варианта, которому присваивается ранг  $\rho_{n,k} = N_{Popt}$ .

Далее для каждого  $n$ -го парето-оптимального решения гидропривода с учетом весового коэффициента  $w_k$ , определяю-

щего степень значимости (по мнению проектировщика)  $k$ -го критерия оптимальности, выполняется расчетная оценка его суммарного ранга  $P_n$  по зависимости

$$P_n = \sum_{k=1}^{k=3} w_k \rho_{n,k} \quad (n = 1, 2, \dots, N_{\text{opt}}).$$

Вариант, имеющий минимальное значение  $P_k$ , является оптимальным решением задачи оптимизации структуры гидропривода мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса.

#### 4. Заключение

Как показывает опыт проектирования и моделирования рабочих процессов в гидроприводах с частотно-дрессельным регулированием для мобильных транспортно-перегрузочных комплексов, представленный в настоящее время в весьма ограниченном числе научных публикаций, в частности, в [8, 9, 26], структура и технические характеристики указанных гидропривода достаточ-

но разнообразны вследствие необходимости создания канатных систем с широким интервалом возможных требований заказчика по величине пролета между концевыми станциями, допустимому перепаду высот их взаимного расположения, требуемой грузоподъемности и др.

Предложенный метод структурной оптимизации гидроприводов является эффективным подходом при решении проектных задач на ранней стадии проектирования мобильных транспортно-перегрузочных комплексов с учетом всех конкретных требований, установленных в техническом задании на разработку. Это обусловлено тем, что наряду с установлением оптимального сочетания основных, наиболее ответственных и дорогостоящих конструктивных элементов проектируемого гидропривода, в первую очередь, гидромашин, определяются оптимальные значения первостепенных технических характеристик рабочего давления и объемного расхода рабочей жидкости.

#### Список литературы

1. Короткий А.А., Лагерев А.В., Месхи Б.Ч., Лагерев И.А., Панфилов А.В. Развитие транспортной инфраструктуры крупных городов и территорий на основе технологии канатного метро. Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2017. 344 с.

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1311913>

2. Короткий А.А., Лагерев А.В., Месхи Б.Ч., Лагерев И.А., Панфилов А.В., Таричко В.И. Транспортно-логистические технологии и машины для цифровой урбанизированной среды. Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2019. 268 с.

DOI: <http://doi.org/10.5281/zenodo.3551132>

3. Логвинов А.С., Короткий А.А. Пассажиры одноканатные дороги. Устройство и эксплуатация. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2016. 210 с.

4. Бажин И.И., Беренгард Ю.Г., Гайцгори М.М., Ермаков С.А. Автоматизированное проектирование машиностроительного гидропривода. М.: Машиностроение, 1988. 312 с.

#### References

1. Korotkiy A.A., Lagerev A.V., Meskhi B.Ch., Lagerev I.A., Panfilov A.V. *Razvitie transportnoy infrastruktury krupnykh gorodov i territoriy na osnove tekhnologii kanatnogo metro* [The development of transport infrastructure of large cities and territories on the basis of technology of passenger ropeways]. Rostov-na-Donu, DGTU, 2017. 344 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1311913> (In Russian)

2. Korotkiy A.A., Lagerev A.V., Meskhi B.Ch., Lagerev I.A., Panfilov A.V., Tarichko V.I. *Transportno-logisticheskie tekhnologii i mashiny dlya tsifrovoy urbanizirovannoy sredy* [Transport and logistics technologies and machines for the digital urban environment]. Rostov-on-Don, Don State Technical University, 2019. 268 p.

DOI: <http://doi.org/10.5281/zenodo.3551132> (In Russian)

3. Logvinov A.S., Korotkiy A.A. *Passazhirskie odnokanatnye dorogi. Ustroystvo i ekspluatatsiya* [Passenger ropeway devices and operation]. M.: Mashinostroyeniye, 1988. 312 p.

4. Bajin I.I., Berengard Yu.G., Gaytsgori M.M., Ermakov S.A. *Automatizirovannoye proyektirovaniye mashinostroyitel'nogo gidropryivoda*. M.: Mashinostroyeniye, 1988. 312 p.

5. Лагерев И.А., Лагерев А.В. Оптимальное проектирование подъемно-транспортных машин. Брянск: БГТУ, 2013. 228 с.  
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1202230>
6. Лагерев А.В., Мильто А.А., Лагерев И.А. Универсальная методика динамического анализа гидравлических кранов-манипуляторов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2013. № 3 (39). С. 24-31.
7. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Оптимизация конструкции крана-манипулятора машины для сварки магистральных трубопроводов при модернизации // Подъемно-транспортное дело. 2013. № 1 (71). С. 4-7.
8. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Моделирование режимов работы гидроприводов с частотно-дрессельным регулированием мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №4. С. 462-480. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-462-480
9. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Работа гидроприводов с частотно-дрессельным регулированием мобильных канатных комплексов при последовательной установке дросселей // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №1. С. 73-92. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-01-73-92
10. Лагерев А.В. Проектирование насосных гидроприводов подъемно-транспортной техники. Брянск: БГТУ, 2006. 232 с.  
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1311892>
11. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Современная теория манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов. Моделирование рабочих процессов и проектирование элементов гидропривода. Брянск: РИСО БГУ, 2019. 201 с.  
DOI: <http://doi.org/10.5281/zenodo.3268490>
12. Навроцкий К.Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов. М.: Машиностроение, 1991. 384 с.
13. Галдин Н.С., Семенова И.А. Гидравлические схемы мобильных машин. Омск: ways with single rope. Device and operation]. Rostov-na-Donu, DGTU, 2016. 210 p. (In Russian)
4. Bazhin I.I., Berengard Yu.G., Gaytsgori M.M., Ermakov S.A., Klaptsova T.S., Kudinov A.V., Chkalov V.V. *Avtomatizirovannoe proektirovanie mashinostroitel'nogo gidroprivoda* [Computer-aided design of machinery hydraulic drive]. Moscow, Mashinostroenie, 1988. 312 p. (In Russian)
5. Lagerev I.A., Lagerev A.V. *Optimalnoe proektirovanie podyemno-transportnykh mashin* [Optimal design of lifting-transport machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskyy Universitet, 2013. 228 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1202230> (In Russian)
6. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Milto A.A. Universal technique for analysing hydraulic articulating crane dynamics. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, No.3, pp. 24-31. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302038> (In Russian)
7. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Trunk pipeline welding machine crane-manipulator optimization during its modernization. *Podyemno-transportnoe delo*, 2013, No.1, pp. 4-7. (In Russian)
8. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Modeling operation modes of hydraulic drives with frequency-throttle regulation of mobile transport and overloading ropes complexes. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.4, pp. 462-480. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-462-480 (In Russian)
9. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. The operation of hydraulic drives with frequency-throttle regulation for mobile rope complexes with the consistent installation of throttles. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.1, pp. 73-92. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-73-92 (In Russian)
10. Lagerev A.V. *Proektirovanie nasosnykh gidroprivodov podyemno-transportnykh mashin* [The design of pump hydraulic drives of lifting-transport machines].

СибАДИ, 2013. 203 с.

14. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения»: утв. Ростехнадзором России 12.11.2013 № 355.

15. Свешников В.К., Усов А.А. Станочные гидроприводы. М.: Машиностроение, 1988. 512 с.

16. ГОСТ 12445-80. Гидроприводы объемные, пневмоприводы и смазочные системы. Номинальные давления. М.: Издательство стандартов, 1985.

17. Васильченко В.А. Гидравлический привод строительных, дорожных, коммунальных и других мобильных машин (производства России и стран СНГ): каталог-справочник. М.: АО «Машмир» и ЗАО «Гидрокомплект», 1997. 271 с.

18. Свешников В.К. Гидрооборудование: Международный справочник: в 3 кн. М.: «Техинформ» МАИ, 2001.

19. Ногин В.Д. Принятие решения в многокритериальной среде: количественный подход. М.: Физматлит, 2002. 176 с.

20. Лагереv И.А., Таричко В.И., Лагереv А.В. Формирование стратегии восстановления канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса в процессе эксплуатации // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №2. С. 276-293. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-276-293

21. Самоходная концевая станция / А.В. Лагереv, В.И. Таричко, И.А. Лагереv. Патент РФ на полезную модель № 200827. Заявл. 12.05.20. Опубл. 12.11.20. Бюл. № 32.

22. Лагереv И.А., Лагереv А.В. Многокритериальная оптимизация основных конструктивных параметров гидравлических крано-манипуляторных установок мобильных машин // Вестник СибАДИ. 2017. № 3. С. 32-40.

23. Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. М.: Машиностроение, 1982. 423 с.

24. Попов Д.Н. Механика гидро- и пневмоприводов. М.: МГТУ им. Н.Э. Бау-

† Bryansk, Bryanskiy gosudarstvennyy  
† tekhniicheskiy universitet, 2006. 232 p.

† DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1311892>  
† (In Russian)

† 11. Lagerev A.V., Lagerev I.A.  
† *Sovremennaya teoriya manipulatsionnykh sistem mobilnykh mnogotselevykh transportno-tekhnologicheskikh mashin i kompleksov. Issledovanie rabochikh protsessov i proektirovanie elementov gidroprivoda* [Modern theory of manipulation systems of mobile multi-purpose transport and technological machines and complexes. Research of working processes and design of hydraulic drive elements]. Bryansk, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, 2019. 201 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3268490> (In Russian)

† 12. Navrotskiy K.L. *Teoriya i proektirovanie gidro- i pnevmoprivodov* [Theory and Design of Hydraulic and Pneumatic Drives]. Moscow, Mashinostroenie, 1991. 384 p. (In Russian)

† 13. Galdin N.S., Semenova I.A. *Gidravlicheskie sistemy mobilnykh mashyn* [Hydraulic circuits of mobile machines]. Omsk, SibADI, 2013. 203 p. (In Russian)

† 14. *Federalnye normy i pravila v oblasti promyshlennoy bezopasnosti "Pravila bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh obektov, na kotorykh ispolzuyutsya podemnyye sooruzheniya"* [Federal norms and rules in the field of industrial safety "Safety rules for hazardous production facilities using lifting structures"]. Moscow, Standartinform, 2013. (In Russian)

† 15. Sveshnikov V.K., Usov A.A. *Stanochnye gidroprivody* [Machine tool hydraulic drives]. Moscow, Mashinostroenie, 1988. 512 p. (In Russian)

† 16. GOST 12445-80. Hydraulic and pneumatic drives and lubricating systems. Standarts pressures. Moscow, Gosstandart: Izdatelstvo standartov, 1985. (In Russian)

† 17. Vasilchenko V.A. *Gidravlicheskiy privod stroitelnykh, dorozhnykh, kommunalnykh i drugikh mobilnykh mashin (proizvodstva Rossii i stran SNG): katalog-spravochnik* [Hydraulic drive of construction, road, municipal and other mobile machines]. Moscow, AO "Mashmir" i ZAO

мана, 2002. 320 с.

25. Лагереv И.А. Моделирование рабочих процессов манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов. Брянск: РИО БГУ, 2016. 371 с.

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1198980>.

26. Лагереv А.В., Лагереv И.А. Моделирование рабочих процессов в частотно-регулируемом гидроприводе манипуляционных систем мобильных машин при раздельном движении звеньев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №2. С. 187-209. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-02-187-209>

“Gidrokomplekt”, 1997. 271 p. (In Russian)

18. Sveshnikov V.K. *Gidrooborudovanie: Mezhdunarodnyy spravochnik: v 3 kn.* [Hydroequipment: International Directory]. Moscow, Tekhinform MAI, 2001. (In Russian)

19. Nogin V.D. *Prinyatie resheniya v mnogokriterialnoy srede: kolichestvennyy podkhod* [Decision making in a multi-criteria environment: a quantitative approach]. Moscow, Fizmatlit, 2002. 176 p. (In Russian)

20. Lagerev I.A., Tarichko V.I., Lagerev A.V. Formation of the strategy for restoring the rope system of the mobile transport and reloading rope complex during operation. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.2, pp. 276-293. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-276-293 (In Russian)

21. Patent RU 200827, B61B 7/06. *Samokhodnaya kontsevaya stantsiya* [Self-propelled end station]. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Declared 12.05.2020. Published 12.11.2020. (In Russian)

22. Lagerev I.A., Lagerev A.V. Multi-objective optimization of the main design parameters of the hydraulic crane-manipulator installations of mobile machines. *Vestnik SibADI*, 2017, No. 3, pp. 32-40. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-3\(55\)-32-40](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-3(55)-32-40) (In Russian)

23. Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B. *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody* [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives]. Moscow, Mashinostroenie, 1982. 424 p. (In Russian)

24. Popov D.N. *Mekhanika gidro- i pnevmoprivodov* [Mechanics of hydraulic and pneumatic drives]. Moscow, MGTU imeni N.E.Baumana, 2002. 320 p. (In Russian)

25. Lagerev I.A. *Modelirovanie rabochikh protsessov manipulyatsionnykh sistem mobilnykh mnogotselevykh transportno-tekhnologicheskikh mashin i kompleksov* [Modeling of work processes in manipulation systems for mobile multi-purpose transport and technological machines and complexes]. Bryansk, RIO BГУ, 2016. 371 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1198980> (In Russian)

26. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Modeling

‡ of working processes in the frequency-  
‡ adjustable hydraulic drive of manipulation sys-  
‡ tems with separate movement of links during  
‡ operation of mobile machines. *Nauchno-*  
‡ *tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo*  
‡ *gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.2,  
pp. 187-209. DOI:  
[https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-](https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-02-187-209)  
02-187-209 (In Russian)



УДК (UDC) 625.76.08

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОМЕНТА  
СОПРОТИВЛЕНИЯ НА РАБОЧЕМ ОРГАНЕ ДОРОЖНОЙ ФРЕЗЫMETHOD FOR CALCULATING THE SPECTRAL DENSITY OF THE MOMENT  
RESISTANCE ON THE WORKING BODY OF THE ROAD MILL MACHINE

Фомин К.В.

Fomin K.V.

Тверской государственный технический университет (Тверь, Россия)  
Tver State Technical University (Tver, Russian Federation)

**Аннотация.** Дорожные фрезы различных типов нашли широкое применение при строительстве и ремонте дорог. В процессе эксплуатации в элементах их привода и конструкции возникают значительные динамические нагрузки, что приводит к ухудшению показателей надежности и снижению их технико-экономических характеристик. Повышение надежности и эффективности работы фрезерующих агрегатов является актуальной проблемой, решение которой связано с возможностью прогнозирования характера и величины действующих нагрузок в элементах конструкции. Основным их источником является рабочий орган. При этом силы внешнего сопротивления носят резко переменный, случайный характер. В статье представлена методика расчета спектральной плотности и дисперсии момента на стадии проектирования. Она учитывает периодический характер взаимодействия резцов с дорожным покрытием, а так же случайные условия и режимы работы фрезерующего агрегата. Рассмотрено определение исходных данных необходимых для проведения расчета. Дан анализ полученных выражений, исследованы основные особенности нагрузок на рабочем органе. Полученные характеристики являются исходной информацией для выполнения динамического анализа элементов привода и конструкции дорожной фрезы, проведения прочностных расчетов и выбора их оптимальных параметров.

**Ключевые слова:** дорожная фреза, фрезерный барабан, методика расчета, момент сопротивления, спектральная плотность.

**Дата принятия к публикации:** 07.12.2020

**Дата публикации:** 25.12.2020

**Сведения об авторе:**

**Фомин Константин Владимирович** - доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Механизация природообустройства и ремонт машин», ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», e-mail: fomin\_tver@mail.ru.

ORCID:000-0002-8153-1115

**Abstract.** Milling units are widely used in the construction and repair of roads. They guarantee high quality of work, have high productivity and make it possible to provide comprehensive mechanization of technological operations. During operation, significant dynamic loads occur in the drive elements and the design of the units, which leads to a deterioration in reliability indicators and a decrease in the technical and economic characteristics of their operation. Improving the reliability and efficiency of milling units is an problem, the solution of which is associated with the opportunity to predict the character and magnitude of the operating loads in the structural elements. The main source of these loads is the working body. At the same time, the forces of external resistance that arise during operation are sharply variable, random in nature. The article presents a method for calculating the spectral density and moment dispersion at the design stage. It takes into consideration the periodic character of the interaction of the cutters with the road surface, as well as random conditions and modes of operation of the milling unit. The article focuses on determining the initial data required for the calculation. The obtained expressions are analyzed and the main characteristic features of the mill loads are considered. The considered characteristics are the initial data for the dynamic analysis of the drive elements and the unit structure, as well as for strength calculations.

**Keywords:** road mill machine, milling drum, method of calculation, moment of resistance, spectral density of moments.

**Date of acceptance for publication:** 07.12.2020

**Date of publication:** 25.12.2020

**Author's information:**

**Konstantin V. Fomin** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chair of Department «Mechanization of environmental and repair machines», Tver State Technical University, e-mail: fomin\_tver@mail.ru.

ORCID:0000-0002-8153-1115

## 1. Введение

При строительстве и ремонте дорог широкое применение нашли дорожные фрезы различных типов. Их используют для удаления дорожного полотна, локальных неровностей, создания шероховатых поверхностей, корректировки профиля дороги и при многих других технологических операциях [1, 2]. Фрезерующие агрегаты гарантируют высокое качество работ, большую производительность и дают возможность обеспечить их комплексную механизацию [3, 4].

При этом применяются различные типы рабочих органов [3-5]: грубые и стандартные, точные и сверхточные. Они отличаются конструкцией, шириной захвата, режимами работы, схемой расстановки ножей, их количеством [3-5]. Фрезы снабжены нивелирующими устройствами, обеспечивающими заданную глубину фрезерования и продольный уклон [3-5].

В процессе эксплуатации в элементах привода и конструкции агрегатов возникают значительные динамические нагрузки, что приводит к ухудшению показателей надежности и снижению их технико-экономических характеристик [6, 7]. Основным источником этих нагрузок является рабочий орган. При этом силы внешнего сопротивления, возникающие при работе, носят резко переменный, случайный характер. Он обусловлен периодическим взаимодействием ножей с дорожным полотном и случайными свойствами условий работы.

Существенное влияние на их формирование оказывают тип технологической операции, состояние дорожного полотна, ее профиль, структурная неоднородность обрабатываемого материала наличие дефектов, изменчивость глубины фрезерования, физико-механические свойства асфальтобетона и их вероятностные характеристики.

Характер нагружения зависит от конструкции фрезерного барабана его параметров и режимов работы, системы управления дорожной фрезой, износа ножей [5-7], а также колебаний, возбуждаемых силами резания и дисбалансом фрезы.

Повышение надежности и эффективности работы фрезерующих агрегатов является актуальной проблемой, решение которой связано с возможностью прогнозирования характера и величины действующих нагрузок на фрезу и в элементах конструкции на стадиях проектирования.

## 2. Постановка задачи

Целью статьи является разработка методики расчета вероятностных характеристик момента на рабочем органе дорожной фрезы. Она должна учитывать специфические особенности формирования нагрузки при взаимодействии с дорожным полотном, которые заключаются в периодическом характере взаимодействия резцов с обрабатываемым материалом, а так же случайные свойства его прочностных характеристик, глубины фрезерования и режимов работы.

## 3. Материалы и методы исследования

Рассмотрим рабочий орган дорожной фрезы, имеющий несколько участков, отличающихся числом плоскостей резания, радиусом расположения режущих элементов, числом ножей в плоскости резания и глубиной фрезерования. Разная глубина фрезерования для различных участков фрезы может быть связана с наклоном рабочего органа относительно горизонта. Наклон создается специальным нивелирующим устройством для обеспечения необходимого профиля дорожного полотна. В каждой плоскости резцы расположены равномерно.

При существующих режимах работы дорожных фрез можно считать, что число оборотов рабочего органа и скорость агрегата, физико-механические свойства дорожного полотна и глубина фрезерования, изменяются достаточно плавно на протяжении нескольких подач на нож, оставаясь примерно постоянными в пределах подачи.

Учитывая случайный характер формирования силовых факторов на режущих элементах фрезы для решения поставленной задачи необходимо использование методов теории вероятности и статистической динамики [8,

9]. В соответствии с ними при решении задач динамического анализа и определении показателей надежности механических систем необходимо знать вероятностные характеристики внешних воздействий, такие как дисперсия и спектральная плотность.

Спектральная плотность момента на фрезерном барабане при выполнении технологической операции с учетом моментов на отдельных участках равна [8, 10]:

$$\begin{aligned}
 S_i(\omega) = & \frac{2}{T_i} \left[ \frac{M_i}{2} \sum_{q=1}^Q \Psi_{1Mqi}(\omega) D_q - \frac{M_i}{2} \sum_{q=1}^Q \Psi_{2Mqi}(\omega) D_q + \right. \\
 & + \sum_{q < s} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{l=1}^{M_i} \Psi_{3Mqsiml}(\omega) K_{qsiml} + 2 \sum_{q < s} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{l=1}^{M_i} \sum_{p=1}^{\infty} \Psi_{4Mqsimlp}(\omega) K_{qsimlp} + \\
 & \left. + \sum_{r=-\infty}^{\infty} \left( F_{Mli} \left( \frac{2\pi r}{\varphi_{Ti}}; m_q \right) + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 F_{M2i} \left( \frac{2\pi r}{\varphi_{Ti}}; P_{qi} \right)}{\partial P_{qi}^2} \right] D_q \right) \times \right. \\
 & \left. \times \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{l=1}^{M_i} \exp \left( -j \frac{2\pi r}{\varphi_{Ti}} (\varphi_{im} - \varphi_{il}) \right) \frac{\omega \varphi_{Ti}}{2\pi r^2} W \left( \frac{\omega \varphi_{Ti}}{2\pi r} \right) \right]; \quad r \neq 0, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где  $T_i$  – период повторности импульсов, возникающих на резцах в одиночной плоскости резания  $i$ -го участка

$$T_i = \frac{\varphi_{Ti}}{\int_{-\infty}^{\infty} \omega_{\phi} W(\omega_{\phi}) d\omega_{\phi}};$$

$\varphi_{Ti}$  – угол между ножами в плоскости резания;  $\omega_{\phi}$  – угловая скорость вращения фрезы;  $W(\omega_{\phi})$  – плотность распределения угловой скорости фрезы;  $M_i$  – число плоскостей резания на  $i$ -м участке;  $Q$  – число параметров

$$S(\omega) = \sum_{i=1}^I S_i(\omega) + \sum_{i \neq k}^I \sum_k S_{ik}(\omega),$$

где  $I$  – число участков на рабочем органе;  $S_i(\omega)$ ,  $S_{ik}(\omega)$  – соответственно, спектральные и взаимные спектральные плотности моментов на участках фрезы.

Для  $S_i(\omega)$  момента при фрезеровании дорожного полотна можно записать [10]:

импульса;  $D_q$  – дисперсия параметров;  $K_{qsimlp}$ ,  $K_{qsiml}$  – коэффициенты корреляции и взаимной корреляции параметров в направлении движения дорожной фрезы и перпендикулярном ему;  $m_q$  – математическое ожидание параметров;  $P_{qi}$  –  $q$ -й параметр импульса для  $i$ -го участка;  $\varphi_{im}$  – углы между началом отсчета и резцами в  $m$ -й плоскости резания на  $i$ -м участке.

В выражении (1) введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned}
 \Psi_{1Mqi}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\partial^2 F_{M1i}(\omega; \omega_{\phi}; P_{qi})}{\partial P_{qi}^2} \right] W(\omega_{\phi}) d\omega_{\phi}; \\
 \Psi_{2Mqi}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\partial^2 F_{M2i}(\omega; \omega_{\phi}; P_{qi}; P_{si})}{\partial P_{q(s)i}^2} \right] W(\omega_{\phi}) d\omega_{\phi}; \\
 \Psi_{3Mqsiml}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\partial^2 F_{M2i}(\omega; \omega_{\phi}; P_{qi}; P_{si})}{\partial P_{qi} \partial P_{si}} \right] \exp \left( -j \frac{\omega}{\omega_{\phi}} (\varphi_{im} - \varphi_{il}) \right) W(\omega_{\phi}) d\omega_{\phi};
 \end{aligned}$$

$$\Psi_{4Mqsimlp}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\partial^2 F_{M2i}(\omega; \omega_\phi; P_{qi}; P_{si})}{\partial P_{qi} \partial P_{si}} \right]_m \exp\left(-j \frac{\omega}{\omega_\phi} (\varphi_{im} - \varphi_{il})\right) \cos\left(\frac{\omega}{\omega_\phi} P \varphi_{Ti}\right) W(\omega_\phi) d\omega_\phi,$$

где

$$F_{M1i}(\omega; \omega_\phi; P_{qi}) = |S_{0i}(j\omega; \omega_\phi; P_{qi})|^2;$$

$$F_{M2i}(\omega; \omega_\phi; P_{qi}; P_{si}) = S_{0i}(j\omega; \omega_\phi; P_{qi}) S_{0i}^*(j\omega; \omega_\phi; P_{si}).$$

Знак \* обозначает комплексно-сопряженную величину.

Спектр функции  $S_{0i}(j\omega; \omega_\phi; P_{qi})$  момента сопротивления в пределах угла контакта резца с обрабатываемым материалом:

$$S_{0i}(j\omega; \omega_\phi; P_{qi}) = \int_0^{\varphi_{ti}/\omega_\phi} M_{0i}(\omega_\phi t; P_{qi}) \exp(-j\omega t) dt,$$

где  $\varphi_{ti}$  – угол контакта ножа с дорожным полотном для  $i$ -го участка

$$\varphi_{ti} = \arccos \frac{R_{\phi i} - H_{\phi i}}{R_{\phi i}} + \arcsin \frac{c_i}{2R_{\phi i}}; \quad (2)$$

$R_{\phi i}$ ,  $H_{\phi i}$ ,  $c_i$  – радиус расположения режущих элементов, глубина фрезерования и подача на нож для  $i$ -го участка [7, 12]

$$c_i = W \frac{2\pi}{z_i \omega_\phi};$$

$z_i$  – число резцов в плоскости резания  $i$ -го участка;  $M_{0i}(t; P_{imn})$  – изменение момента на ноже.

Взаимные спектральные плотности моментов формируемых на  $i$ -ом и  $k$ -ом участках фрезы могут быть определены с помощью методики представленной в [11]:

$$S_{ik}(\omega) = \frac{2}{T} \left[ \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{l=1}^{M_k} \sum_{q<s} \Psi_{1ikml}(\omega) K_{qsikml} + \lim_{N \rightarrow \infty} 2 \sum_{p=1}^{2N} \left(1 - \frac{P}{2N+1}\right) \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{l=1}^{M_k} \sum_{q<s} \Psi_{2ikml}(\omega) K_{qsikml} + \sum_{r=-\infty}^{\infty} \left( G_{2ik}(r; m_q) + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 G_{2ik}(r; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q \right) \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{l=1}^{M_k} \exp[-jr(\varphi_{im} - \varphi_{kl})] \frac{\omega}{r^2} W\left(\frac{\omega}{r}\right) \right], \quad r \neq 0;$$

$$S_{ki}(\omega) = \frac{2}{T} \left[ \sum_{m=1}^{M_k} \sum_{l=1}^{M_i} \sum_{q<s} \Psi_{1kiml}(\omega) K_{qskiml} + \lim_{N \rightarrow \infty} 2 \sum_{p=1}^{2N} \left(1 - \frac{P}{2N+1}\right) \sum_{m=1}^{M_k} \sum_{l=1}^{M_i} \sum_{q<s} \Psi_{2kiml}(\omega) K_{qskiml} + \sum_{r=-\infty}^{\infty} \left( G_{2ki}(r; m_q) + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \left[ \frac{\partial^2 G_{2ki}(r; P)}{\partial P_q^2} \right]_m D_q \right) \sum_{m=1}^{M_k} \sum_{l=1}^{M_i} \exp[-jr(\varphi_{km} - \varphi_{il})] \frac{\omega}{r^2} W\left(\frac{\omega}{r}\right) \right], \quad r \neq 0, \quad (3)$$

где  $T$  – время соответствующее одному обороту фрезы

$$T = \frac{2\pi}{\int_{-\infty}^{\infty} \omega_\phi W(\omega_\phi) d\omega_\phi};$$

$M_k$  – число плоскостей резания на  $k$ -м участке;  $K_{qsikml}$ ,  $K_{qsikmlp}$ ,  $K_{qskiml}$ ,  $K_{qskimlp}$  – коэффициенты корреляции параметров для  $i$ -го и  $k$ -го участков на  $m$ -й и  $l$ -й плоскости резания;

$$\Psi_{1ikml}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\partial^2 G_{1ik}(\omega; \omega_\phi; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m \exp \left[ -j \frac{\omega}{\omega_\phi} (\varphi_{im} - \varphi_{kl}) \right] W(\omega_\phi) d\omega_\phi;$$

$$\Psi_{2ikmlp}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\partial^2 G_{2ikp}(\omega; \omega_\phi; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m \exp \left[ -j \frac{\omega}{\omega_\phi} (\varphi_{im} - \varphi_{kl}) \right] \cos \left( \frac{\omega}{\omega_\phi} 2\pi p \right) W(\omega_\phi) d\omega_\phi;$$

$$\Psi_{1kiml}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\partial^2 G_{1ki}(\omega; \omega_\phi; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m \exp \left[ -j \frac{\omega}{\omega_\phi} (\varphi_{km} - \varphi_{il}) \right] W(\omega_\phi) d\omega_\phi;$$

$$\Psi_{2kimlp}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\partial^2 G_{2kip}(\omega; \omega_\phi; P)}{\partial P_q \partial P_s} \right]_m \exp \left[ -j \frac{\omega}{\omega_\phi} (\varphi_{km} - \varphi_{il}) \right] \cos \left( \frac{\omega}{\omega_\phi} 2\pi p \right) W(\omega_\phi) d\omega_\phi,$$

где

$$G_{1ik}(j\omega; \omega_\phi; P) = S_{0i}(j\omega; \omega_\phi; P_{im}) S_{0k}^*(j\omega; \omega_\phi; P_{kl}) \sum_{\nu=0}^{L_i-1} \sum_{\mu=0}^{L_k-1} \exp \left[ -j \frac{\omega}{\omega_\phi} (\nu\varphi_{Ti} - \mu\varphi_{Tk}) \right];$$

$$G_{2ikp}(j\omega; \omega_\phi; P) = S_{0i}(j\omega; \omega_\phi; P_{im}) S_{0k}^*(j\omega; \omega_\phi; P_{kl;n-p}) \sum_{\nu=0}^{L_i-1} \sum_{\mu=0}^{L_k-1} \exp \left[ -j \frac{\omega}{\omega_\phi} (\nu\varphi_{Ti} - \mu\varphi_{Tk}) \right];$$

$$G_{1ki}(j\omega; \omega_\phi; P) = S_{0k}(j\omega; \omega_\phi; P_{km}) S_{0i}^*(j\omega; \omega_\phi; P_{il}) \sum_{\nu=0}^{L_k-1} \sum_{\mu=0}^{L_i-1} \exp \left[ -j \frac{\omega}{\omega_\phi} (\nu\varphi_{Tk} - \mu\varphi_{Ti}) \right];$$

$$G_{2kip}(j\omega; \omega_\phi; P) = S_{0k}(j\omega; \omega_\phi; P_{km}) S_{0i}^*(j\omega; \omega_\phi; P_{il;n-p}) \sum_{\nu=0}^{L_k-1} \sum_{\mu=0}^{L_i-1} \exp \left[ -j \frac{\omega}{\omega_\phi} (\nu\varphi_{Tk} - \mu\varphi_{Ti}) \right],$$

где  $S_{0k}(j\omega; \omega_\phi; P_{kmn})$ ,  $P_{kmn}$ ,  $\varphi_{Tk}$  – соответственно, спектр момента сопротивления при одиночном акте воздействия, параметры и угол между резцами в  $m$ -й плоскости резания  $k$ -го участка;  $\varphi_{km}$  – углы между началом координат и ножами в  $m$ -й плоскости для  $k$ -го участка;  $\varphi_{\tau k}$  – угол контакта резца с дорожным полотном для  $k$ -го участка;  $L_k$ ,  $L_i$  – соответственно, число резцов в плоскости резания для  $k$ -го и  $i$ -го участков.

Дисперсия момента равна [8]:

$$D = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega.$$

С учетом четности и при сохранении полной энергии сигнала в расчетной практике широкое применение нашло понятие одностороннего «физического» спектра [8, 9]

$$S^+(\omega) = 2S(\omega).$$

Выражения (1) и (3) отображают связь спектральной и взаимной спектральной

плотностей момента с вероятностными характеристиками параметров импульсов.

#### 4. Определение исходных данных для расчета

Спектральные и взаимные спектральные плотности в значительной степени определяется преобразованием Фурье функции, описывающей момент на резце в пределах дуги контакта в зависимости от угла поворота фрезы при взаимодействии с дорожным полотном.

Для его определения могут быть использованы понятия коэффициента резания или удельной энергии на фрезерование [12, 13].

При фрезеровании общие затраты энергии складываются из энергии идущей на деформацию и разрушение асфальтобетона и сообщение материалу скорости [12]. В этом случае для момента сопротивления на ноже можно записать:

$$M_{oi}(\varphi; P_{qi}) = R_{\phi_i} b_i \delta_i(\varphi) \left[ K_p + k_{om} \frac{\gamma V_{pi}^2}{2 \cdot 10^3} \right] \quad \text{при } \varphi \leq \varphi_{\tau i};$$

$$M_{oi}(\varphi; P_{qi}) = 0 \quad \text{при } \varphi > \varphi_{\tau i},$$

где  $b_i$  – средняя ширина слоя материала срезаемого ножом (может зависеть от угла поворота фрезы);  $\delta_i(\varphi)$  – функция изменения толщины стружки для резцов  $i$ -го участка;  $\varphi = \omega_{\phi} t$  – угол поворота фрезы;  $K_p$  – удельное сопротивление резанию, кПа;  $k_{om}$  – коэффициент отбрасывания ( $k_{om} \approx 0,75$ ) [12];  $\gamma$  – плотность асфальтобетона, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{pi}$  – скорость резания для рассматриваемого участка (при встречном фрезеровании) [7, 12]

$$V_{pi} = \sqrt{W^2 + 2WV_{oi} \cos(\omega_{\phi} t - \varphi_{oi}) + V_{oi}^2},$$

где  $W$  – скорость движения фрезерующего агрегата;  $V_{oi} = R_{\phi_i} \omega_{\phi}$  – окружная скорость режущего элемента на  $i$ -м участке фрезы;  $\varphi_{oi}$  – угол между вертикалью и линией, проведенной к вершине «гребешка»  $\varphi_{oi} = \arcsin(c_i/2R_{\phi_i})$ .

$$M_{oi}(t; P_{qi}) = R_{\phi_i} b_i c_i \left[ C_{cu} k_{mp} + k_{om} \frac{\gamma V_{pi}^2}{2 \cdot 10^3} \right] \sin \omega_{\phi} t \quad \text{при } \varphi \leq \varphi_{\tau i}; \quad (4)$$

$$M_{oi}(t; P_{qi}) = 0 \quad \text{при } \varphi > \varphi_{\tau i}.$$

Преобразование Фурье выражения (4) имеет вид:

$$S_{oi}(j\omega; \omega_{\phi}; P_{qi}) = \frac{1}{2j} R_{\phi_i} b_i c_i \left[ C_{cu} k_{mp} + k_{om} \frac{\gamma V_{pi}^2}{2 \cdot 10^3} \right] \left[ U(\omega - \omega_{\phi}; \omega_{\phi}) - U(\omega + \omega_{\phi}; \omega_{\phi}) \right],$$

где

$$U(\omega; \omega_{\phi}) = \frac{2}{\omega} \sin \frac{\omega \varphi_{\tau i}}{2\omega_{\phi}} \exp\left(-j \frac{\omega \varphi_{\tau i}}{2\omega_{\phi}}\right).$$

Из выражений (2) и (4) видно, что кроме режимов работы и конструктивных параметров фрезерующего агрегата на формирование момента сопротивления оказывают влияние сцепление  $C_{cu}$ , плотность  $\gamma$  фрезеруемого материала и глубина фрезерования  $H_{\phi_i}$ . Эти три параметра импульсов являются случайными. Структурное сцепление, плотность и их вероятностные характеристики зависят от физико-механических свойств дорожного полотна его структуры, износа, на-

Для встречного фрезерования при  $V_{oi} \ll W$  форма траектории ножа в пределах дуги контакта с дорожным полотном мало отличается от окружности радиусом  $R_{\phi_i}$ . В этом случае для изменения толщины стружки в любой точке контакта можно записать [12]  $\delta_i(t) = c_i \sin \omega_{\phi} t$ .

Учитывая связь удельного сопротивления резанию со структурным сцеплением фрезеруемого материала  $C_{cu}$ , кПа [13]

$$K_p = C_{cu} k_{mp},$$

где  $k_{mp}$  – коэффициент, зависящий от внутреннего трения и конструкции режущего элемента [13], для  $M_{oi}(t; P_{imn})$  получим:

личия дефектов и других факторов. Изменчивость глубины фрезерования определяется состоянием дорожного полотна, ее профилем, наличием дефектов, схемой подвески рабочего органа, конструкцией фрезерного барабана, его параметрами и режимами работы, параметрами и типом автоматической системы управления глубиной фрезерования дорожной фрезы [3-5].

Значения этих параметров можно представить как функцию двух переменных:

$$P_{qi} = P_{qi}(x, y),$$

где  $P_{qi} = \{C_{cu}, \gamma, H_{\phi}\}$ ;  $x$  и  $y$  – координаты точки для соответствующих параметров.

В случае однородности и большого числа статистически независимых условий, формирующих изменчивость физико-механических

$$K_{P_{qxy}}(\Delta x; \Delta y) = m_1 \left\{ \left[ P_{qi}(x, y) - m_{qi} \right] \left[ P_{qi}(x + \Delta x, y + \Delta y) - m_{qi} \right] \right\},$$

где  $m_1 \{ \}$  – знак усреднения;  $m_{qi}$  – математическое ожидание  $q$ -го параметра. Аналогично можно ввести двумерные корреляци-

$$K_{P_{qxy}}(\Delta x; \Delta y) = m_1 \left\{ \left[ P_{qi}(x, y) - m_{qi} \right] \left[ P_{si}(x + \Delta x, y + \Delta y) - m_{si} \right] \right\},$$

где  $P_{qi}(x, y)$ ,  $P_{si}(x, y)$  – величины соответствующие  $q$ -му и  $s$ -му параметрам;  $m_{qi}$ ,  $m_{si}$  – математические ожидания  $q$ -го и  $s$ -го параметров.

С учетом стационарных свойств случайных параметров, значения коэффициентов корреляции  $K_{qsiml}$  в направлении перпендикулярном движению агрегата определяются величинами корреляционных функций условий работы (изменчивость прочностных свойств материала, его плотности и глубины фрезерования) в периодические моменты взаимодействия режущих элементов  $i$ -го участка с дорожным полотном. С учетом плавности изменения параметров в пределах нескольких подач они могут быть записаны следующим образом:

$$K_{qsiml} = K_{P_{qsiy}}[(m-l)h],$$

где  $m, l$  – номера соответствующих плоскостей резания  $i$ -го участка фрезы;  $K_{P_{qsiy}}(y)$  – корреляционные и взаимно корреляционные функции случайных параметров в направлении перпендикулярном движению дорожной фрезы;  $h$  – расстояние между плоскостями резания.

Для коэффициентов корреляции параметров с учетом их изменения в направлении движения дорожной фрезы и перпендикулярно ему имеем:

$$K_{qsimlp} = K_{P_{qsiy}}[c_i p; (m-l)h].$$

ких свойств дорожного полотна, глубины фрезерования и независимости их вероятностных характеристик от выбора начала координат, эту функцию можно рассматривать как случайную, стационарную, эргодическую с двумерной корреляционной функцией:

онные функции для разнородных параметров (например, между структурным сцеплением и плотностью):

В случае если возможно разделение коэффициентов корреляции, для  $C_{cu}, \gamma$  и  $H_{\phi}$  в направлении движения дорожной фрезы и перпендикулярном ему, можно записать:

$$K_{qsimlp} = K_{P_{qsix}}(c_i p) K_{P_{qsiy}}[(m-l)h],$$

где  $K_{P_{qsix}}(c_i p)$  – корреляционные и взаимно корреляционные функции случайных параметров в направлении в направлении движения агрегата.

## 5. Результаты и их анализ

В качестве примера расчета рассмотрим рабочий орган, имеющий один участок. Его ширина составляет 0,5 м. Диаметр фрезы равен 0,7 м. Средняя глубина фрезерования принята 0,1 м. Число плоскостей резания – 34. В плоскости резания находится два резца. Шаг установки ножей – 15 мм. На рис.1 показана схема расположения ножей.

Скорость передвижения дорожной фрезы 0,4 м/с. Фрезерный барабан имеет угловую скорость 12 с<sup>-1</sup>. Плотность распределения угловой скорости принята нормальной с коэффициентом вариации 3%.

Коэффициенты вариации структурного сцепления, плотности асфальта и глубины фрезерования приняты равными 6%. Средние значения сцепления  $C_{cu} = 0,9$  МПа [14, 15] и плотности  $\gamma = 2470$  кг/м<sup>3</sup> [14, 15].

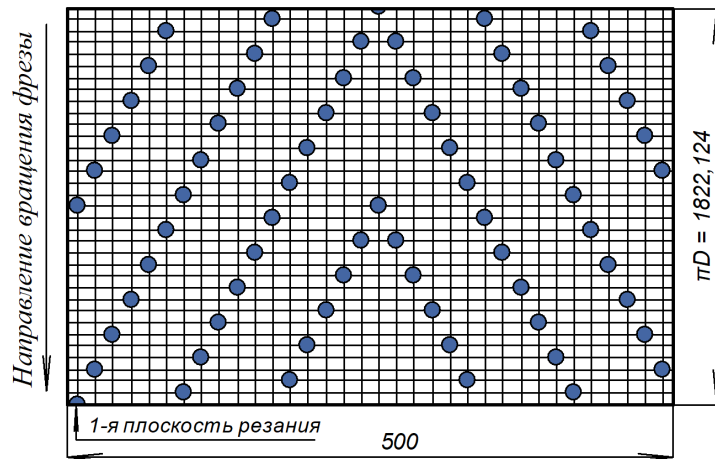


Рис.1. Схема развертки корпуса фрезы

В результате расчета получены значения математического ожидания момента 6,01 кНм и среднеквадратического отклонения 0,655 кНм (коэффициент вариации – 10,8%). Нормированная спектральная плотность момента сопротивления представлена на рис. 2.

Выражения (1 и 3) позволяют выделить некоторые свойства момента на рабочем органе.

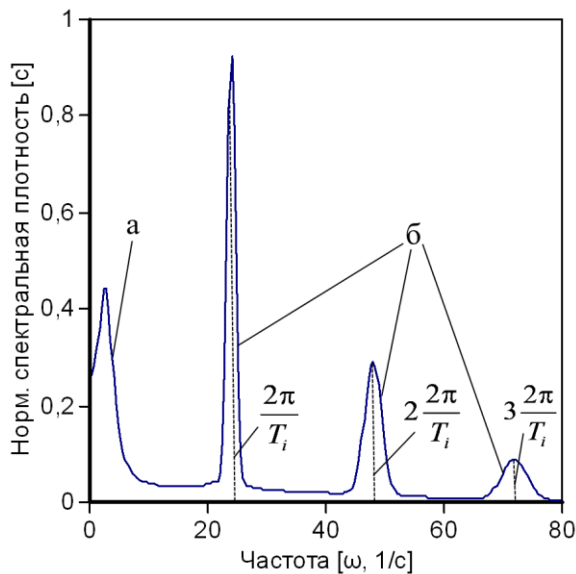


Рис.2. Нормированная спектральная плотность момента на фрезе

Частотный состав нагрузки имеет сложную структуру и зависит от вида как спектральных, так и взаимных спектральных плотностей моментов. В выражении (1) можно выделить три части.

Первая часть, включающая слагаемые пропорциональные дисперсиям параметров,

зависит от квадрата модуля спектра момента на одиночном резце при взаимодействии с дорожным полотном. Диапазон частот  $\Delta f$ , занимаемый этой частью можно оценить из выражения [8, 9]:

$$\Delta f \tau = const,$$

где  $\tau$  – длительность импульса, с.

Таким образом, при учете 90% мощности, сосредоточенной в интервале частот  $\Delta f$ , имеем  $\Delta f \approx 1/\tau$ .

Соответственно, ширина этой части спектра будет обратно пропорциональна длительности импульсов.

Для «времени корреляции» [8, 9]:

$$\tau_k = \int_0^{\infty} |\rho_{\varepsilon}(\tau)| d\tau,$$

где  $\rho_{\varepsilon}(\tau)$  – нормированная корреляционная функция процесса, может быть получено аналогичное соотношение:

$$\tau_k \approx 1/4\Delta f.$$

Вторая часть состоит из слагаемых, пропорциональных корреляционным функциям как разнородных, так и однородных параметров. Частотный состав определяется спектром момента на резце при взаимодействии с дорожным полотном  $S_{0i}(j\omega; \omega_{\phi}; P_{qi})$ , спектральными плотностями параметров импульсов и функцией:

$$Z_i(\omega) = \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{l=1}^{M_l} \exp \left[ -j \frac{\omega}{\omega_{\phi}} (\varphi_{im} - \varphi_{il}) \right], \quad (5)$$

которая зависит от расстановки ножей. Частоты этой части сосредоточены в низкочас-



тотной зоне (рис.2, позиция «а»). Это связано с плавным характером изменения параметров импульсов нагрузки на фрезе при взаимодействии с дорожным полотном и небольшой скоростью передвижения агрегата.

Третья часть спектральной плотности обусловлена периодичностью взаимодействия резцов с обрабатываемым материалом. Величина ее пропорциональна квадратам средних значений параметров импульсов и представляет собой последовательность пиков, лежащих на частотах  $\omega_{ki} = 2\pi k / T_i$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$  (рис. 2). Их форма определяется функцией, описывающей плотность распределения угловой скорости фрезы. Вид ее так же зависит от спектра момента  $S_{oi}(j\omega; \omega_{\phi}; P_{qi})$  и от схемы расположения режущих элементов, влияние которой определяется выражением (5). На рис.2 она обозначена как «б».

Выражения для взаимных спектральных плотностей (3) имеют две основных части.

Первая часть пропорциональна корреляционным и взаимным корреляционным функциям параметров импульсов нагружения, как в направлении движения агрегата, так и перпендикулярно ему. Вид определяется спектром момента сопротивления на ножах и схемой их расстановки на фрезе.

Вторая часть пропорциональна средним параметрам импульсов. Вид определяется функцией плотности распределения угловой скорости рабочего органа, спектром момента сопротивления на резцах и зависит от их расстановки на фрезе.

Известно, что для линейных систем результат внешнего случайного воздействия зависит от передаточной функции системы [8, 9]:

$$S_H(\omega) = |W(\omega)|^2 S_M(\omega),$$

где  $|W(\omega)|^2$  – квадрат модуля передаточной функции функции системы;  $S_M(\omega)$  – спектральная плотность внешнего воздействия.

При слабом демпфировании квадрат модуля передаточной функции содержит несколько пиков, соответствующих значениям собственных частот системы [9]. При попадании их в интервал частот, занимаемый

спектральной плотностью нагрузки, произойдет увеличение нагруженности в элементах динамической системы. Это связано с возбуждением колебаний с собственными частотами.

В частности, при совпадении частот  $\omega_{ki} = 2\pi k / T_i$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$  с собственными будет оказываться наибольшее воздействие на динамическую систему.

Анализ частотных свойств момента сопротивления позволяет не только объяснить особенности формирования динамических нагрузок в элементах конструкции дорожных фрез, но и наметить пути выбора их рациональных параметров и режимов работы, с целью повышения надежности фрезерующих агрегатов.

## 6. Заключение

В статье представлена методика расчета спектральной плотности момента на фрезерном барабане на стадии проектирования. Она учитывает периодический характер взаимодействия резцов с дорожным покрытием, а так же случайные условия и режимы работы фрезерующего агрегата.

Рассмотрено определение исходных данных необходимых для проведения расчета. Дан анализ полученных выражений, рассмотрены основные характерные особенности нагрузок на рабочем органе.

Для использования разработанной методики расчета спектральной плотности в дальнейшем предполагается рассмотреть ряд вопросов, связанных с анализом условий формирования нагрузок на фрезерном барабане:

- определение вероятностных характеристик физико-механических свойств дорожного полотна с учетом деградации его свойств, процессов старения и износа при эксплуатации;

- определение вероятностных характеристик глубины фрезерования с учетом профиля поверхности дорожного полотна, наличия дефектов, таких как колеиность, просадки, проломы и выбоины, конструкции подвески рабочего органа и системы регулирования;

- уточнение механизма формирования момента сопротивления с учетом неодно-

родной структуры асфальтобетона, связанной с наличием щебня разной фракции в его составе и дефектов в обрабатываемом объеме материала;

- определение параметров импульсов (форма, длительность и амплитуда) и их вероятностных характеристик, возникающих на режущем элементе с учетом кинематики его движения, физико-механических свойств обрабатываемого материала;

- разработка методики учета влияния динамических свойств двигателя на формирование момента на рабочем органе и расчета

плотности распределения угловой скорости фрезы;

- разработка методики учета влияния внешней динамики дорожной фрезы на формирование нагрузок.

Предложенная в статье методика позволяет на стадии проектирования провести исследование динамической нагруженности элементов конструкции дорожной фрезы, осуществить расчет показателей надежности и является основой разработки методов выбора ее оптимальных параметров и режимов работы.

### Список литературы

1. Баловнев В.И., Беляев М.А. Машины для содержания и ремонта городских и автомобильных дорог. Омск: ОАО «Омский дом печати», 2005. 768 с.

2. Баловнев В.И. Оценка инновационных предложений в дорожной и строительной технике. М.: МАДИ (ГТУ), 2008. 100 с.

3. WIRTGEN. Cold Recycling Technology, 1 st. edition. Wirtgen GmbH, 2012. 370 p.

4. WIRTGEN. Cold milling manual. Technology and application. Wirtgen GmbH, 2013. 244 p.

5. Баловнев В.И. Машины для безотходной технологии ремонта и восстановления автодорог. Конструкция. Расчет. Потребительские свойства. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2020. 183 с.

6. Ma Peng-yu, Hu Yong-biao, Zhang Zhong-hai. The dynamical model of a cold milling machine and its adaptive power control simulation // *Simulation*. 2011. Vol. 87 (9). P. 809-817.

DOI: <https://doi.org/10.1177/0037549710371385>

7. Peng-yu Ma, Yong-biao Hu, Xin-rong Zhang. Selection of Adaptive Power Control Parameters for a Cold Milling Machine and its Simulation // *Simulation*. Vol. 83(12). P. 843-850.

DOI: <https://doi.org/10.1177/0037549708089111>

8. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.

9. Светлицкий В.А. Статистическая ме-

### References

1. Balovnev V.I., Belyaev M.A. *Mashiny dlya sodержaniya i remonta gorodskikh i avtomobilnykh dorog* [Machines for maintenance and repair of urban and motor roads]. Omsk, ОАО «Omskiy dom pechati», 2005. 768 p. (In Russian)

2. Balovnev V.I. *Otsenka innovatsionnykh predlozheniy v dorozhnoy i stroitelnoy tekhnike* [Evaluation of innovative proposals in road and construction equipment]. MADI (GTU), Moscow, 2008. 100 p. (In Russian)

3. WIRTGEN. Cold Recycling Technology, 1 st. edition. Wirtgen GmbH, 2012. 370 p.

4. WIRTGEN. Cold milling manual. Technology and application. Wirtgen GmbH, 2013. 244 p.

5. Balovnev V.I., Ivanchenko S.N. *Mashiny dlya bezotkhodnoy tekhnologii remonta i vosstanovleniya avtodorog. Konstruktsiya. Raschet. Potrebitelskie svoystva* [Machines for waste-free technology of road repair and restoration. Design. Calculation. Consumer properties]. Habarovsk, Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2020. 183 p. (In Russian)

6. Ma Peng-yu, Hu Yong-biao, Zhang Zhong-hai. The dynamical model of a cold milling machine and its adaptive power control simulation. *Simulation*, 2011, vol. 87 (9), pp. 809-817.

DOI: <https://doi.org/10.1177/0037549710371385>

7. Peng-yu Ma, Yong-biao Hu, Xin-rong Zhang. Selection of Adaptive Power Control Parameters for a Cold Milling Machine and its Simulation. *Simulation*, vol. 83(12), pp. 843-850. DOI: <https://doi.org/10.1177/0037549708089111>

ханика и теория надежности. М.: Издательство МГТУ им Баумана, 2002. 504 с.

10. Фомин К.В. Моделирование и расчет вероятностных характеристик момента сопротивления на рабочем органе дорожной фрезы // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 3. С.407-417. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-03-407-417>.

11. Фомин К.В. К оценке спектральной плотности момента сопротивления на рабочем органе дорожной фрезы на стадии проектирования / /Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. № 1. С. 144-152. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2020-06-01-144-152>.

12. Бородачев И.П. Справочник конструктора дорожных машин. М.: Машиностроение, 1965. 725 с.

13. Селиверстов Н.Д. Определение оптимального количества режущих элементов для фрезерования слоев асфальтобетонных и грунтовых покрытий//Вестник МАДИ. №2 (41). 2015. С. 40-44.

14. Строительство и реконструкция автомобильных дорог. Справочная энциклопедия дорожника. Т. I / под редакцией А.П. Васильева. М.: Информавтодор, 2005. 791 с.

15. Котлярский Э.В. Строительно-технические свойства дорожного асфальтового бетона. М.: Издательство МАДИ (ГТУ), 2004. 193 с.

8. Levin B.R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki* [Theoretical bases of statistical radio engineering]. Moscow, Radio i svyaz, 1989. 656 p. (In Russian)

9. Svetlickij V.A. *Statisticheskaya mekhanika i teoriya nadezhnosti* [Statistical mechanics and reliability theory]. Moscow, Izdatelstvo MGTU im Baumana, 2002. 504 p. (In Russian)

10. Fomin K.V. Modeling and calculation of probabilistic characteristics resistance moment on the working body of the road mill. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.3, pp. 407-417. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-03-407-417>. (In Russian)

11. Fomin K.V. To estimate the power spectral density of the moment on the milling drum of the road mill at the design stage. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.1, pp.144-152. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2020-06-01-144-152> (In Russian)

12. Borodachev I.P. *Spravochnik konstruktora dorozhnyh mashin* [Road machine designer handbook]. Moscow, Mashinostroenie, 1965. 725 pp. (In Russian)

13. Seliverstov N.D. Determination of the optimal number of cutting elements for milling layers of asphalt concrete and ground surfaces. *Vestnik MADI*, vol. 2 (41), 2015, pp. 40-44. (In Russian)

14. Vasilev A.P. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya avtomobilnykh dorog. Spravochnaya entsiklopediya dorozhnika. Tom I*. [Construction and reconstruction of roads. Reference encyclopedia of the road. Volum]. Moscow, Informavtodor, 2005. 791 p. (In Russian)

15. Kotlyarskij E.V. *Stroitelno-tekhnicheskie svoystva dorozhnogo asfaltovogo betona* [Construction and technical properties of road asphalt concrete]. Moscow, Izdatelstvo MADI (GTU), 2004. 193 p. (In Russian)

УДК (UDC) 621.86

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА РАБОТЫ  
МОТОР-БАРАБАНА КОРОТКОГО ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРАEXPERIMENTAL STUDY OF OPERATION HEAT MODE  
OF THE MOTOR DRUM OF A SHORT BELT CONVEYORГончаров К.А., Гришин А.В.  
Goncharov K.A., Grishin A.V.Брянский государственный технический университет (Брянск, Россия)  
Bryansk State Technical University (Bryansk, Russian Federation)

**Аннотация.** В статье представлены результаты экспериментального исследования температурного режима работы мотор-барабана короткого ленточного конвейера. Представлено описание экспериментального стенда, а также применяемого оборудования. Изложена методика проведения испытаний, описаны начальные условия проведения испытаний на каждом этапе, подразумевающие характер изменения первоначального натяжения ленты, уровень нагруженности конвейера, особенности конструкции мотор-барабана, в частности, применение футеровки или использование при проведении испытаний гладкой стальной обечайки. Полученные первичные результаты представлены в виде расшифрованных термограмм рабочей зоны мотор-барабана. Обобщенные обработанные результаты проведенных экспериментальных исследований систематизированы в виде графических зависимостей, объединенных по объектам исследований – мотор-барабан, сбегающая ветвь ленты, набегающая ветвь ленты. На основе полученных результатов сделаны соответствующие выводы, представляющие собой описание закономерностей теплового режима работы применительно к мотор-барабану, а также контактирующим с ним ветвям ленты.

**Ключевые слова:** экспериментальное исследование, тепловой контроль, короткий ленточный конвейер, привод, мотор-барабан, футеровка.

**Дата принятия к публикации:** 30.06.2020  
**Дата публикации:** 25.12.2020

**Сведения об авторах:**

**Гончаров Кирилл Александрович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Подъемно-транспортные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», e-mail: ptm\_bstu@mail.ru.  
ORCID: 0000-0002-5895-1162

**Гришин Александр Валентинович** – ассистент кафедры «Подъемно-транспортные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», e-mail: sasha9332@mail.ru

**Abstract.** The article presents the results of the experimental study of the motor drum temperature regime of a short belt conveyor. A description of the experimental stand, as well as the equipment used, is presented. The paper describes the test procedure, the initial conditions for testing at each stage. These conditions imply the nature of the change in the initial tension of the belt, the level of conveyor load, design features of the motor drum, in particular the use of a lining or the use of smooth steel shell during testing. The primary results obtained are presented in the form of decoded thermograms of the working area of the motor drum. The generalized processed results of the experimental studies are systematized in the form of graphical dependencies, which are united according to the objects of study: a motor drum, a leaving belt branch, and an entering belt branch. On the basis of the results obtained, the corresponding conclusions are made, which are the law descriptions of the thermal mode of operation with regard to the motor drum, as well as the belt branches in contact with it.

**Keywords:** experimental study, heat control, short belt conveyor, drive, motor drum, lining.

**Date of acceptance for publication:** 30.06.2020  
**Date of publication:** 25.12.2020

**Authors' information:**

**Kirill A. Goncharov** – PhD in Technical Sciences, associate Professor, head of the Department "Handling machinery and equipment" at Bryansk State Technical University, e-mail: ptm\_bstu@mail.ru.  
ORCID: 0000-0002-5895-1162

**Alexander V. Grishin** – assistant of the Department "Handling machinery and equipment" at Bryansk State Technical University, e-mail: sasha9332@mail.ru

*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-докторов наук №МД-422.2020.8*

## 1. Введение

Короткие ленточные конвейеры нашли широкое применение в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства как в качестве самостоятельных перегрузочных машин, так и в виде составных частей сложных дорожно-строительных комплексов, комбинированных сельскохозяйственных установок и т.д. В структуре таких комплексов короткие ленточные конвейеры выполняют функцию отвалных конвейеров, перемещая груз в заданную локацию вне комплекса, либо загрузочных, подавая груз в его технологическую зону [1, 2].

Одним из основных конструктивных узлов подобных конвейеров является привод, к которому предъявляется ряд дополнительных требований по сравнению со стационарными конвейерами, а именно:

- минимальная масса консольно расположенных элементов привода в случае его размещения в головной части конвейера (что привело к широкому применению безредукторного гидропривода, мотор-барабанов, приводов-надстроек с гибкими промежуточными передачами);

- минимально возможные вылеты центров масс элементов привода по отношению к продольной оси конвейера (что привело к применению преимущественно угловых схем компоновок приводов);

- минимально возможная степень неравномерности вращения приводного барабана с целью снижения сопутствующих динамических и вибрационных нагрузок.

Выбор конкретного типа компоновки привода зависит от экономических и эксплуатационных факторов. Последние наиболее актуальны при работе приводов в агрессивных средах, что сказывается на степени защищенности их исполнения. В таких случаях рациональным решением является применение полностью закрытых мотор-барабанов, имеющих в отличие от других вариантов приводов всего два основных подшипниковых узла трения, подверженных воздействию внешней среды.

При этом продолжительная работа мотор-барабанов сопровождается специфическими температурными особенностями отвода тепла при нагреве. Если при правильном исполне-

нии привода с внешней компоновочной схемой (двигатель располагается вне барабана) выделяемая тепловая энергия отводится в окружающую среду, минуя другие элементы конвейера, то тепловая энергия двигателя, находящегося внутри мотор-барабана, передается последовательно обечайке барабана и ленте, нагревая указанные элементы в определенных диапазонах.

Наличие описанного эффекта позволяет предположить возможность корректировки рекомендаций по выбору тех или иных элементов конвейера, особенностей его расчета в зависимости от температурного режима работы мотор-барабана.

Целью настоящего исследования является экспериментальное изучение температурного режима работы мотор-барабана короткого ленточного конвейера с применением и без применения футеровочного покрытия при продолжительном включении, а также изучение влияния указанного теплового эффекта на элементы конвейера, контактирующие с мотор-барабаном.

## 2. Методика проведения исследований

Экспериментальное исследование проводилось на специализированном стенде (рис. 1), подробное описание которого представлено в работах [3, 4].

В данном случае применение верхнего контура стенда имитировало дополнительную полезную нагрузку при изучении тепловой картины работы мотор-барабана нижнего контура. Исследование проводилось при взаимном контакте контуров, а также при их раздвижении посредством вертикальных регулировочных винтов. Изменение натяжения ленты нижнего контура осуществлялось с помощью винтового натяжного устройства.

При проведении первого этапа испытаний мотор-барабан не имел футеровки и был окрашен черной эмалью. На втором этапе мотор-барабан был футерован продольными полосами резины черного цвета толщиной 4 мм. Тепловая картина работы мотор-барабана была исследована с помощью тепловизора Fluke Ti40. Исследование проводилось с учетом рекомендаций [5].



Рис. 1. Экспериментальный стенд [3, 4]

На основе рекомендаций [5] были соблюдены условия теплового контроля, аналогичные условиям, описанным в работе [6].

1. Тепловой контроль проводился для наружных поверхностей двух элементов экспериментального стенда (ленты нижнего контура и мотор-барабана) с учетом их выдержки в теневой части (без воздействия прямых солнечных лучей) неотапливаемого помещения лаборатории в летнее время при начальной температуре окружающей среды 20...24°C более 12 часов.

2. Поверхность футерованного мотор-барабана представляет собой резиновое покрытие черного цвета с коэффициентом излучения поверхности 0,94. Поверхность ленты нижнего контура с учетом частичного износа представляет собой хлопковую ткань (верхняя прокладка тягового каркаса) с коэффициентом излучения поверхности 0,77. Поверхность нефутерованного мотор-барабана представляет собой сталь, окрашенную черной краской, с коэффициентом излучения поверхности 0,96.

3. При проведении теплового контроля проводился сравнительный анализ собственных температурных значений отдельно для каждого объекта контроля, аналогично [6], в связи с чем, в качестве реперных зон были выбраны непосредственно лента нижнего контура в области её сбегания с мотор-барабана и поверхность мотор-барабана. В начале проведения контроля температура реперных зон соответствовала температуре

окружающей среды и была определена бесконтактным методом в соответствии с [5]. Проводимый сравнительный анализ объектов исследования исключал необходимость сравнения их абсолютных температурных показателей друг с другом, аналогично [6], вследствие чего при представлении результатов обработки данных не производилось приведение температур с использованием коэффициентов излучения поверхностей.

Экспериментальное исследование представляло собой тепловую съемку зоны мотор-барабана при непрерывной работе стенда (скорость движения ленты 2 м/с, без буксования, взаимного проскальзывания и бокового схода) с интервалом выполнения снимков 5 мин в течение 1 ч для каждого этапа испытаний.

Этапы исследования представляли собой обособленные периоды работы стенда, характеризующиеся специфическими условиями работы:

1 этап – работа стенда со средним значением натяжения ленты с нагрузкой и без нагрузки (мотор-барабан без футеровки);

2 этап – работа стенда с пониженным значением натяжения ленты с нагрузкой и без нагрузки (мотор-барабан без футеровки);

3 этап – работа стенда с нагрузкой при минимально возможном значении натяжения ленты на грани её проскальзывания по поверхности мотор-барабана (мотор-барабан без футеровки);

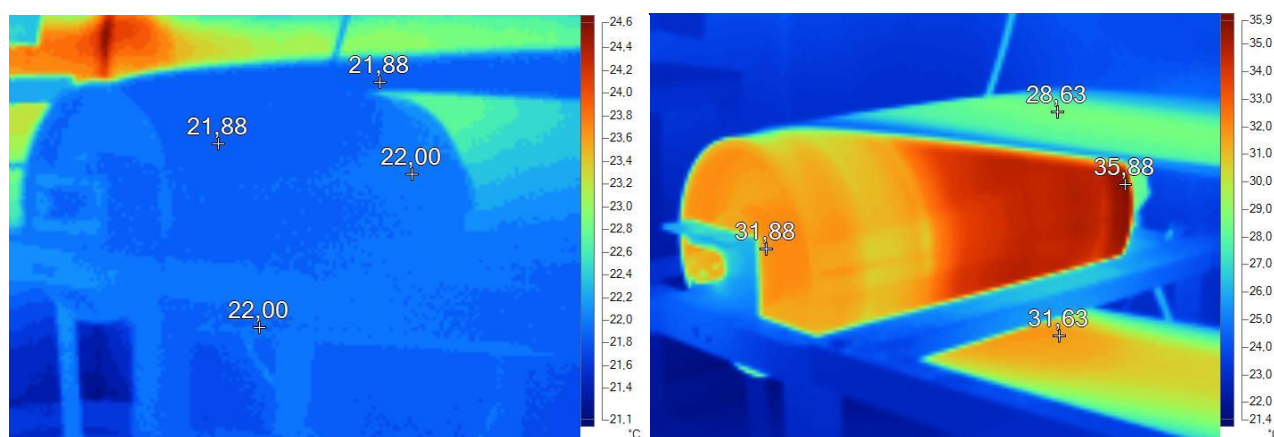
4 этап – работа станда без нагрузки при максимально возможном натяжении ленты (мотор-барабан без футеровки);

5 этап – работа станда без нагрузки при максимально возможном натяжении ленты (мотор-барабан футерован).

Каждый из этапов проводился с интервалом в одни сутки. Первый и второй этапы были разбиты на два подэтапа каждый и также проведены с интервалом в одни сутки. Указанная временная разбивка исследования обусловлена необходимостью синхронизации начальных температурных параметров станда с температурными условиями внешней среды перед каждым часовым периодом его непрерывной работы.

### 3. Результаты и их анализ

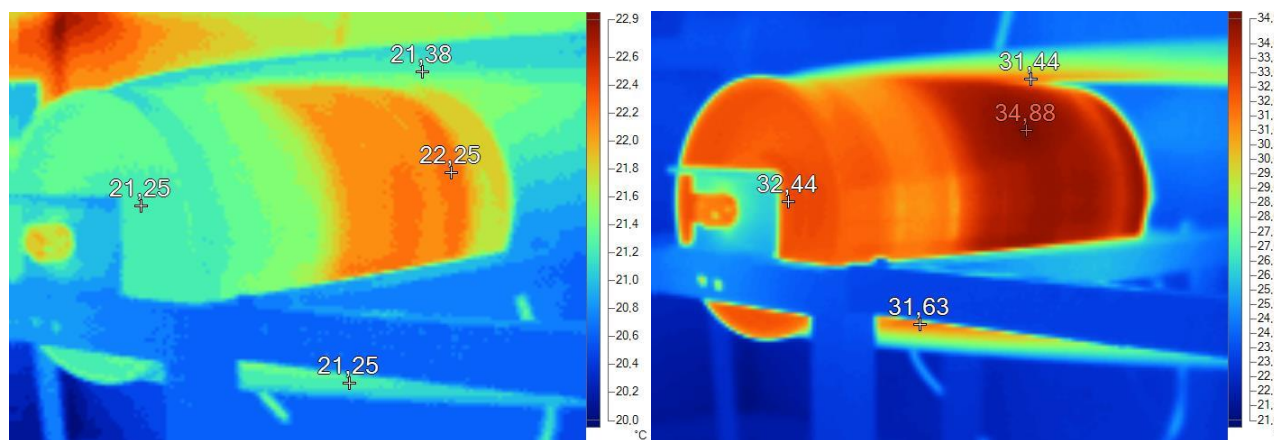
В результате проведенного экспериментального исследования была получена 91 термограмма состояния зоны мотор-барабана в различные периоды времени работы станда (26 термограмм на первом этапе, 26 – на втором, по 13 – на третьем, четвертом и пятом). Часть термограмм, описывающих граничные результаты проведения эксперимента (начало и конец каждого часового периода работы станда в соответствии с этапом проведения экспериментального исследования), представлена на рис. 2 – 8.



а)

б)

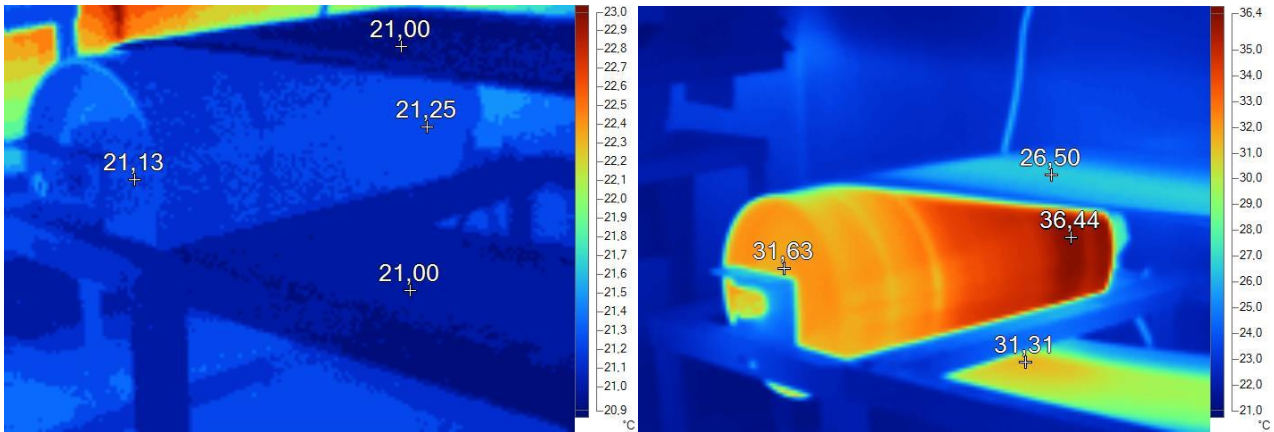
Рис. 2. Термограммы объектов исследования (первый этап, без нагрузки):  
 а – начало этапа; б – конец этапа



а)

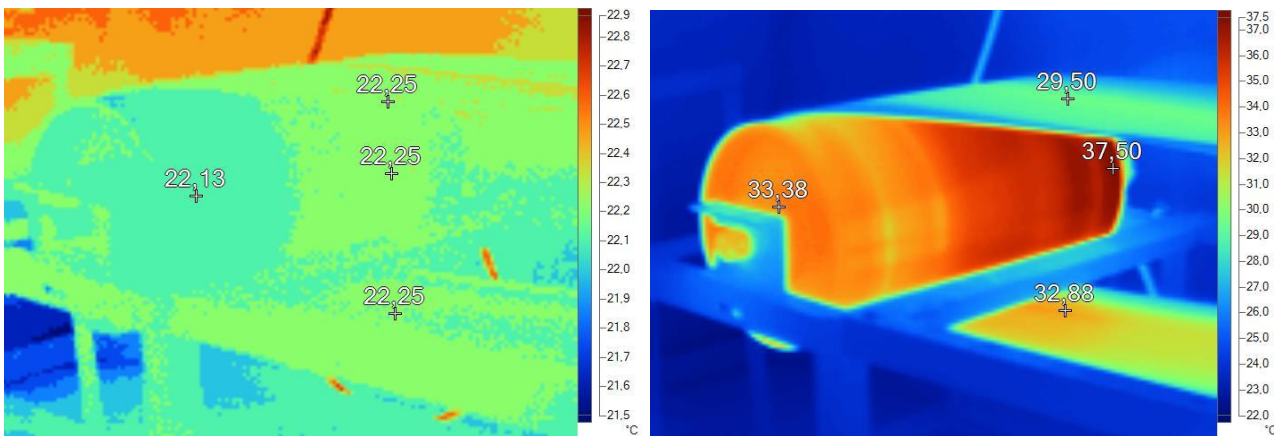
б)

Рис. 3. Термограммы объектов исследования (первый этап, с нагрузкой):  
 а – начало этапа; б – конец этапа



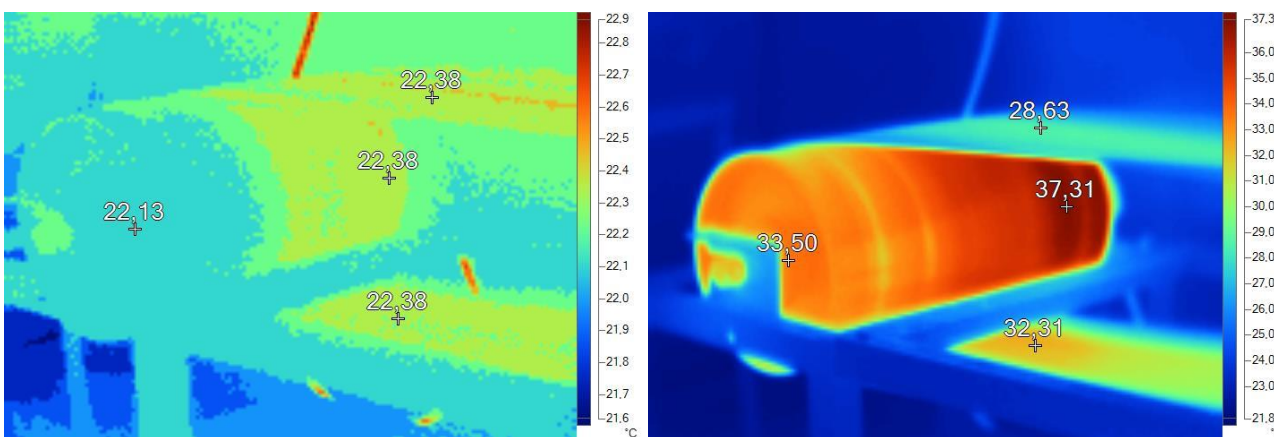
а) б)

Рис. 4. Термограммы объектов исследования (второй этап, без нагрузки):  
 а – начало этапа; б – конец этапа



а) б)

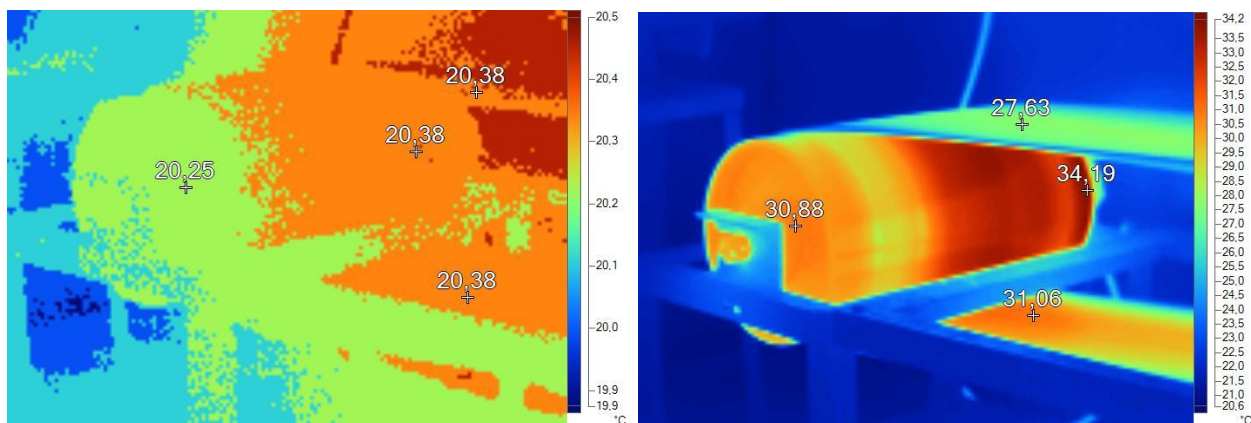
Рис. 5. Термограммы объектов исследования (второй этап, с нагрузкой):  
 а – начало этапа; б – конец этапа



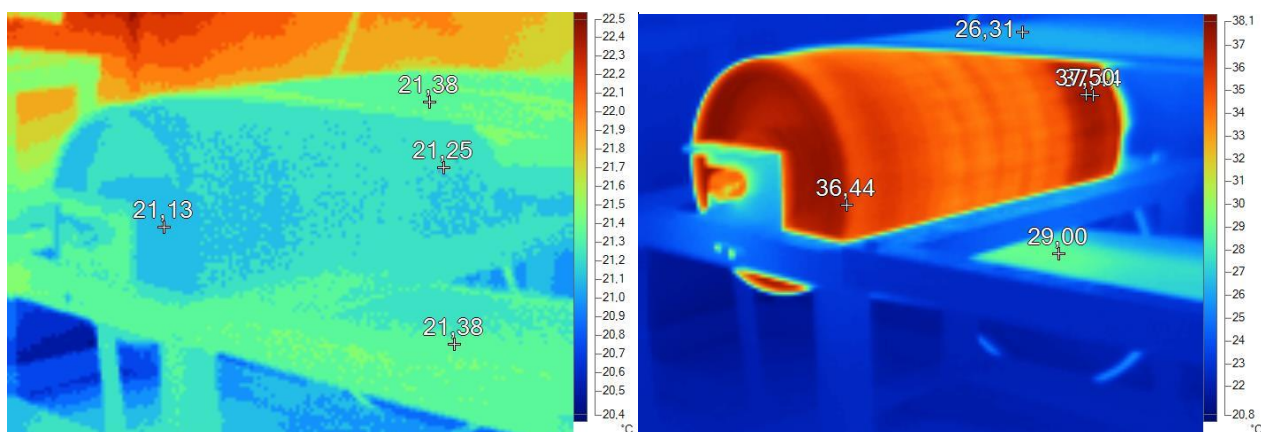
а) б)

Рис. 6. Термограммы объектов исследования (третий этап):  
 а – начало этапа; б – конец этапа





а) б)  
 Рис. 7. Термограммы объектов исследования (четвертый этап):  
 а – начало этапа; б – конец этапа



а) б)  
 Рис. 8. Термограммы объектов исследования (пятый этап):  
 а – начало этапа; б – конец этапа

Совокупность полученных данных замеров температур можно представить в виде графиков, сгруппированных по объектам исследования (рис. 9 – 10).

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы.

1. Разность температур набегающей на мотор-барабан и сбегаящей с него ветвей ленты в каждый определенный момент времени составляет 3...4°C как при работе с нагрузкой, так и без неё. В данном случае важным является то обстоятельство, что съемка сбегаящей ветви производилась с внутренней стороны ленты, непосредственно контактирующей с мотор-барабаном, а съемка набегающей ветви – с наружной стороны ленты. С учетом одинакового качества поверхности обеих ветвей ленты с каждой стороны с одинаковым коэф-

фициентом отражения можно утверждать, что разность указанных температур является следствием неравномерного прогрева ленты по её толщине. Указанная величина разности температур слишком велика для того, чтобы соответствовать объему тепловой энергии, которую мотор-барабан может мгновенно передать участку ленты длиной, соответствующей половине дуги окружности мотор-барабана. Также необходимо отметить стабильность интервала температуры в процессе всего эксперимента на всех этапах. На основании данного обстоятельства можно сделать вывод, что внутренняя сторона ленты короткого конвейера всегда работает в зоне повышенных температур по отношению к наружной стороне в тех случаях, когда конвейер не транспортирует горячие грузы.

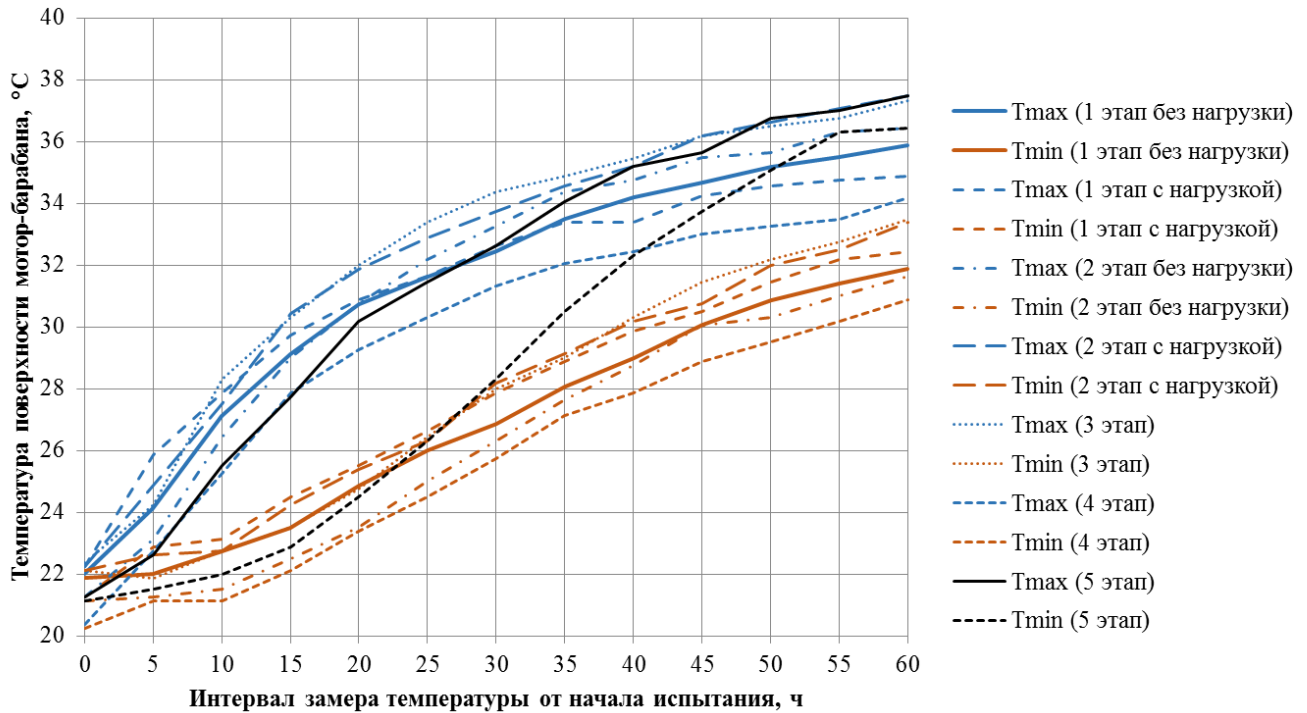


Рис. 9. Температура поверхности мотор-барабана на разных стадиях испытаний

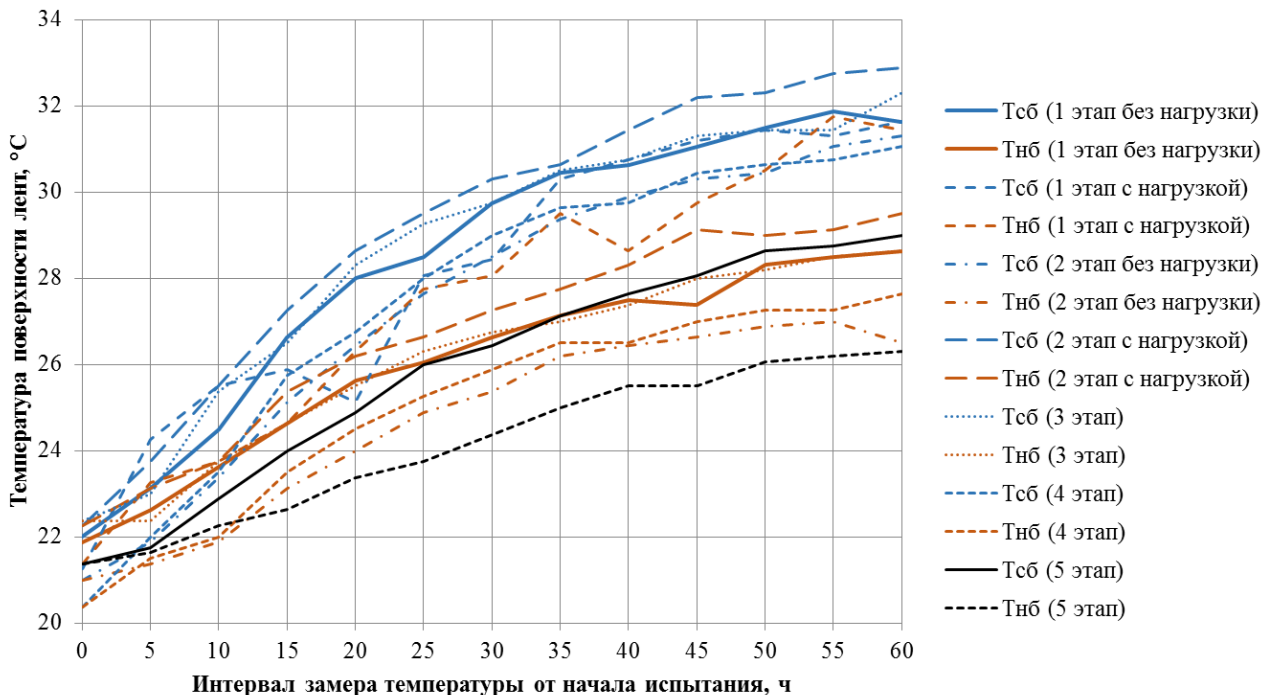


Рис. 10. Температура поверхности ветвей лент на разных стадиях испытаний

2. Температура нагрева поверхности мотор-барабана с учетом данных всех этапов экспериментальных исследований в среднем изменяется от 20...22,5°C до 32...38°C. Минимальный интервал нагрева на одном конкретно взятом этапе испытаний составляет

10°C, максимальный – 16,25°C. В целом можно отметить, что мотор-барабан к концу каждого из этапов испытаний приближается к выходу на стабильное значение рабочей температуры (температурные кривые становятся более пологими). При этом полное время выхода на

рабочую температуру существенно зависит от уровня нагрузки на конвейер, в том числе от величины предварительного натяжения ленты, значительно влияющего на общее сопротивление движению.

3. Футеровка благоприятно сказывается не только на повышении коэффициента сцепления ленты с барабаном, но и на температурном режиме работы самой ленты. На основании полученных данных можно отметить, что температуры сбегавшей и набегающей ветвей ленты при применении на мотор-барабане футеровки в среднем на 2...3°C ниже соответствующих температур ветвей в случае применения нефутерованного мотор-барабана. Данное обстоятельство является дополнительным преимуществом применения футерованных приводных барабанов на коротких конвейерах, особенно в контексте транспортирования горячих грузов (отвалы конвейеры дорожных фрез). Стоит отметить, что температура по-

верхности футерованного мотор-барабана соизмерима температуре поверхности нефутерованного мотор-барабана при общем снижении температур набегающей и сбегавшей ветвей ленты и сопоставимых коэффициентах излучения поверхностей.

4. Максимальная разность распределения температур по поверхности мотор-барабана достигает 7,25°C и характеризуется ярко выраженным пиковым значением в конце первой трети временного интервала процесса испытания на всех этапах (рис. 11). Наименьшие колебания температуры поверхности характерны для футерованных мотор-барабанов, что при одностороннем позиционировании ленты (боковом сходе) является их дополнительным преимуществом. При этом футерованные мотор-барабаны также подвержены неравномерному распределению температуры по поверхности обечайки в начальные периоды работы конвейера.

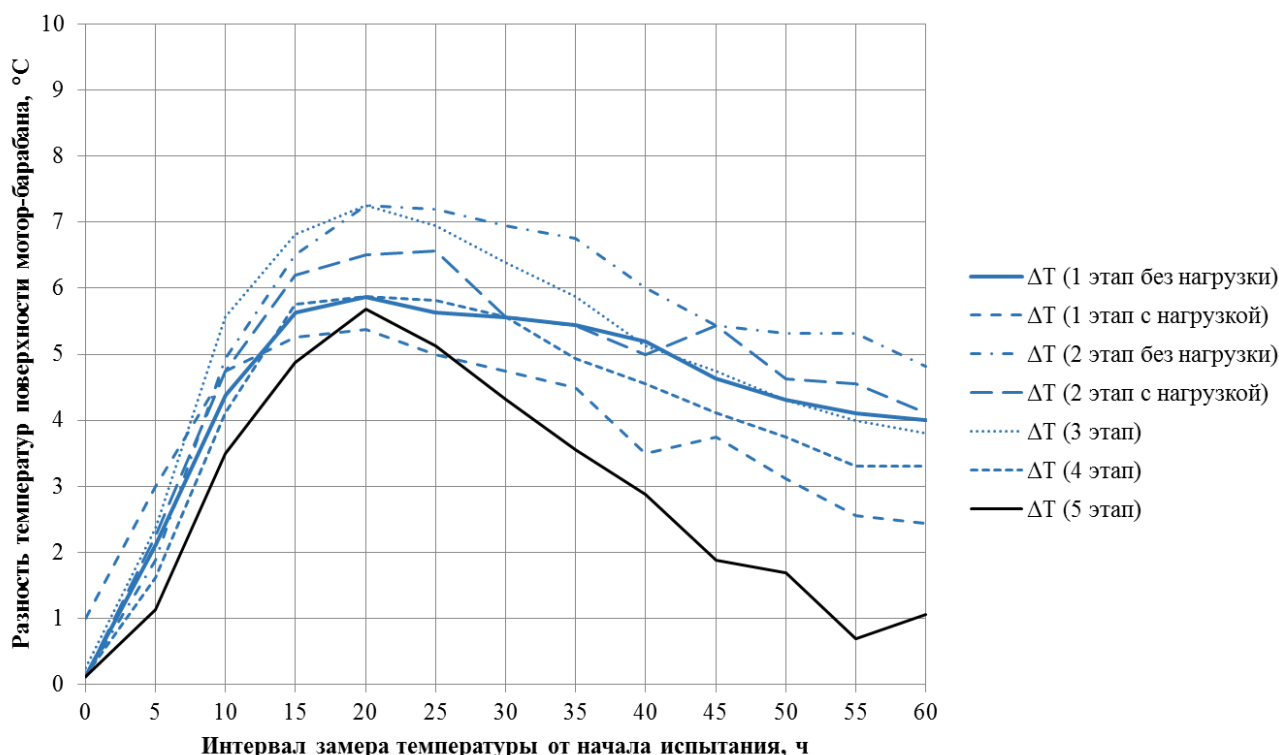


Рис. 11. Величины разностей температур поверхности мотор-барабана на разных стадиях испытаний

#### 4. Заключение

Приведенные в настоящей работе результаты экспериментальных исследований теп-

ловых режимов работы мотор-барабанов в структуре коротких ленточных конвейеров позволяют оценить возможности применения мотор-барабанов в качестве приводных

устройств на этапе проектирования. В частности, увеличение температуры рабочего режима элементов конвейера при стабильных температурных условиях окружающей среды на 10...15°C может приводить к необходимости изменения выбора составляющих конвейера определенного климатического исполнения по отношению к предварительно запланированным.

### Список литературы

1. Гончаров К.А., Гришин А.В. Математическая модель работы отвальных ленточных конвейеров мобильных строительных и дорожных машин при следящем управлении натяжением лент // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2020. №3. С. 365–376. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-03-365-376

2. Лагереv А.В., Толкачев Е.Н., Бословяк П.В. Проектирование и исследование конвейеров с подвесной грузонесущей лентой. Брянск: РИО БГУ, 2016. 303 с. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1197308>

3. Лагереv А.В., Толкачев Е.Н., Гончаров К.А. Моделирование рабочих процессов и проектирование многоприводных ленточных конвейеров. Брянск: РИО БГУ, 2017. 384 с. DOI: 10.5281/zenodo.1196612

4. Гончаров К.А., Гришин А.В. Экспериментальный стенд для исследования влияния конструкции промежуточного ленточного привода ленточного конвейера на его рабочие процессы // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2017. №1. С.52–59. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-01-52-59

5. Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах (РД-13-04-2006). Серия 28. Выпуск 11. М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2010. 32 с.

6. Гончаров К.А. Анализ взаимодействия грузонесущей и тяговой лент между-

Полученные закономерности теплового режима работы поверхности обечайки футерованных и нефутерованных мотор-барабанов, сбегавшей и набегающей ветвей ленты в зоне мотор-барабана наиболее актуальны в процессе проектирования коротких отвальных ленточных конвейеров мобильных строительных и дорожных машин, работающих в постоянно изменяющихся климатических условиях окружающей среды.

### References

1. Goncharov K.A., Grishin A.V. Mathematical model of operation of stacker belt conveyors of mobile road-building machines with tracing control of belt tension. *Nauchno-tehnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.3, pp. 365-376. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-03-365-376 (In Russian)

2. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Boslovyak P.V. *Proektirovanie i issledovaniya konveyerov s podvesnoy gruzonesushchey lentoy* [Design and research of the conveyor with hanging ribbon]. Bryansk, RIO BGU, 2016. 303 p. DOI: 10.5281/zenodo.1197308 (In Russian)

3. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Goncharov K.A. *Modelirovanie rabochikh protsessov i proektirovanie mnogoprivodnykh lentochnykh konveyerov* [Modeling of work processes and the design of multi-drive belt conveyor]. Bryansk, RIO BGU, 2017. 384 p. DOI: 10.5281/zenodo.1196612 (In Russian)

4. Goncharov K.A., Grishin A.V. Experimental test bench for the study of impact of intermediate belt drive construction of belt conveyor on its operation. *Nauchno-tehnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No.1, pp. 52-59. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-01-52-59 (In Russian)

5. Metodicheskie rekomendatsii o poryadke provedeniya teplovogo kontrolya tekhnicheskikh ustroystv i sooruzheniy, primenyaemykh i expluatiruemykh na opasnykh proizvodstvennykh obyektakh (RD-13-04-2006). Seiryu 28. Vypusk 11. Moscow, ZAO «Nauchno-tehnicheskiiy Tsentr issledovaniy problem promyshlennoy bezopasnosti», 2010.

точного привода ленточного конвейера //  
Научно-технический вестник Брянского  
государственного университета, 2019. №4.  
С.426–432. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-  
05-04-426-432

‡ 32 p. (In Russian)  
‡  
‡ 6. Goncharov K.A. Analysis of tractive and  
‡ carrying belts interaction of intermediate drive  
‡ of belt conveyor. *Nauchno-tekhnicheskiy*  
‡ *vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo*  
‡ *universiteta*, 2019, No.4, pp. 426-432. DOI:  
‡ 10.22281/2413-9920-2019-05-04-426-432 (In  
‡ Russian)

УДК (UDC) УДК 627.8

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ  
К ВОЗДЕЙСТВИЮ ПОРАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ ОПАСНЫХ  
ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙASSESSING THE STABILITY OF HYDRAULIC STRUCTURES TO THE IMPACT  
OF HAZARDOUS FACTORS OF HAZARDOUS NATURAL PHENOMENAРыбаков А.В.<sup>1</sup>, Иванов Е.В.<sup>1</sup>, Сибгатулина Д.Ш.<sup>2</sup>, Алёшкин Г.С.<sup>1</sup>  
Rybakov A.V.<sup>1</sup>, Ivanov E.V.<sup>1</sup>, Sibgatulina D.S.<sup>2</sup>, Alyoshkin G.S.<sup>1</sup><sup>1</sup> – Академии гражданской защиты МЧС России (Химки, Россия)<sup>2</sup> – Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ<sup>1</sup> – Academy of Civil Protection EMERCOM of Russia (Khimki, Russian Federation)<sup>2</sup> – Kazan National Research Technical University A. N. Tupolev – KAI (Kazan, Russian Federation)

**Аннотация.** В статье показан порядок определения значений показателя устойчивости гидротехнических сооружений (грунтовых плотин). Представлен подход к созданию инженерной методики для проведения оперативных расчетов прогнозирования состояния грунтовой плотины при воздействии известных характеристик поражающих факторов быстроразвивающихся опасных природных явлений и техногенных процессов. Показано одно из направлений применения предлагаемого подхода - определение рациональных параметров защиты гидротехнических сооружений и выработка плана мероприятий по их достижению.

**Ключевые слова:** гидротехническое сооружение, грунтовая дамба, поражающие факторы, GeoStudio, численный эксперимент, степень разрушения, показатель устойчивости.

**Дата принятия к публикации:** 08.12.2020  
**Дата публикации:** 25.12.2020

**Сведения об авторах:**

**Рыбаков Анатолий Валерьевич** – доктор технических наук, профессор, начальник НИЦ Академии гражданской защиты МЧС России, e-mail: anatoll\_rubakov@mail.ru  
ORCID: 0000-0002-4037-1231

**Иванов Евгений Вячеславович** – кандидат технических наук, начальник НИО (по проблемам ГО и ЧС) НИЦ Академии гражданской защиты МЧС России, e-mail: linia-zhizni@yandex.ru  
ORCID: 0000-0002-9093-1559

**Сибгатулина Дина Шамилевна** – старший преподаватель ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», e-mail: dinart@list.ru

**Abstract.** The article shows the procedure for determining the values of the stability index of hydraulic structures (earth dams). An approach to the creation of an engineering methodology for carrying out operational calculations for predicting the state of an earth dam under the influence of known characteristics of damaging factors of rapidly developing dangerous natural phenomena and man-made processes is presented. One of the directions of application of the proposed approach is shown - the definition of rational parameters for the protection of hydraulic structures and the development of a plan of measures to achieve them.

**Keywords:** hydraulic engineering structure, earth dam, damaging factors, GeoStudio, numerical experiment, degree of destruction, stability index.

**Date of acceptance for publication:** 08.12.2020  
**Date of publication:** 25.12.2020

**Authors' information:**

**Anatoly V. Rybakov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Research Center at Academy of Civil Protection EMERCOM of Russia, e-mail: anatoll\_rubakov@mail.ru  
ORCID: 0000-0002-4037-1231

**Evgeny V. Ivanov** – Candidate of Technical Sciences, Head of Research and Development Organization (for Civil Defense and Emergencies) of the Research Center at Academy of Civil Protection EMERCOM of Russia, e-mail: linia-zhizni@yandex.ru  
ORCID: 0000-0002-9093-1559

**Dina Sh. Sibgatulina** – Senior Lecturer of the Department, Kazan National Research Technical University A.N. Tupolev - KAI, e-mail: dinart@list.ru

Алёшкин Георгий Сергеевич – оператор НИО  
(по проблемам ГО и ЧС) НИЦ Академия граждан-  
ской защиты МЧС России,  
e-mail: georgealeshkin@outlook.com  
ORCID: 0000-0002-9465-1191

† Georgy S. Alyoshkin – operator of the Research  
† and Development Organization (for Civil Defense and  
† Emergencies) of the Research Center at Academy of  
† Civil Protection EMERCOM of Russia,  
† e-mail: georgealeshkin@outlook.com  
† ORCID: 0000-0002-9465-1191

## 1. Введение

При реализации быстроразвивающихся опасных природных явлений и техногенных процессов успех проведения мероприятий защиты населения и территорий от поражающих факторов чрезвычайных ситуаций во многом зависит от правильности выбора мероприятий защиты и своевременности их выполнения.

В свою очередь, выбор мероприятий защиты зависит от оперативности и точности представляемых прогнозов развития обстановки поскольку, с одной стороны, оперативный прогноз позволит создать запас времени для реализации мероприятий защиты, с другой стороны, если прогноз достаточно оперативен, но недостаточно точен, проводимые мероприятия могут и не привести к достижению необходимого уровня защиты.

В полной мере данное утверждение касается и гидротехнических сооружений как источников потенциальной опасности. С наибольшими сложностями приходится сталкиваться в случае малых гидротехнических сооружений, в число которых относятся шламонакопителей. Из-за отсутствия тотального контроля и сравнительной многочисленности они представляют собой наибольшую опасность для населения. В частности, можно привести пример аварии на гидротехническом сооружении технологического водоема золотодобывающей артели в Красноярском крае в 2019 г. [1]. Одной из наиболее частых причин разрушения гидротехнических сооружений является воздействие поражающих факторов чрезвычайных ситуаций (в частности, при возникновении опасных метеорологических явлений и процессов).

Большинство малых гидротехнических сооружений в настоящее время относится к грунтовым плотинам. Основное и существенное преимущество грунтовых плотин состоит в том, что для их возведения используется

местный строительный материал - грунт. В связи с тем, что непосредственно материал для их возведения относительно легкодоступен, фактически стоимость работ определяется только разработкой карьеров, транспортными издержками и непосредственно работами по возведению плотины. Грунтовые плотины, как правило, возводятся в виде насыпи, имеющей поперечное сечение в виде трапеции. Однако желание сэкономить зачастую может привести и приводит к аварийным ситуациям. При этом ошибки проектирования или эксплуатации могли бы быть устранены в случае правильной оценки текущего состояния гидротехнического сооружения и его устойчивости к действию поражающих факторов чрезвычайных ситуаций.

В существующих методиках [2-5] при оценке последствий воздействия толщи воды на стенки гидротехнического сооружения (грунтовой плотины) учитывается только фактор воздействия давления на тело плотины. Существующие численные методы решения задач прогноза состояния гидротехнических сооружений [6, 7] сложны, так как требуют применения специализированных программных комплексов и не могут быть применены при проведении оперативных расчетов.

Сами по себе проведенные расчеты, как правило, позволяют осуществить только оценку состояния гидротехнического сооружения при отсутствии практических рекомендаций по перечню инженерно-технических мероприятий повышения устойчивости сооружений.

Целью настоящей статьи является построение математической модели и проведение с ее помощью численного эксперимента, позволяющего получить статистические данные, необходимые для формирования подхода к обоснованию рациональных параметров системы защиты гидротехнического сооружения в условиях воздействия пора-

жающих факторов опасных метеорологических явлений.

## 2. Модель

Проведение численного эксперимента будет заключаться в моделировании воздействия разных по величине значений поражающего фактора при множестве различных сочетаний конструктивных параметров гидротехнического сооружения и свойств материалов его составляющих.

Конечным итогом моделирования станет определение значений показателя устойчивости для каждого конкретного случая моделируемого воздействия, который определяется, как соотношение сумм удерживающих сил к сдвигающим силам [8]:

$$K_{уст} = \frac{S_{уд}}{S_{сдв}} \quad (1)$$

где:  $S_{уд}$  – сумма удерживающих сил (зависит от составляющих сил тяжести, стремящихся удержать породы в равновесии, расчетного сцепления пород, длины поверхности скольжения);  $S_{сдв}$  – сумма сдвигающих сил (зависит от силы тяжести, веса пород).

Идея дальнейшего применения полученных с помощью численного эксперимента статистических данных состоит в выявлении аналитического вида зависимости значений коэффициента устойчивости от конструктивных параметров гидротехнического сооружения, свойств материалов его составляющих и величин воздействующего на объект поражающего фактора.

Для нахождения значений коэффициента устойчивости зачастую применяются программные комплексы (в частности, Geostudio), реализующие численные методы решения.

В качестве граничной точки, определяющей состояние гидротехнического сооружения «разрушен»–«не разрушен» принимается значение коэффициента устойчивости 2,5 [9]. Устойчивость плотины определяется устойчивостью низовой упорной призмы, разрушение откоса которой происходит по классической кругло-цилиндрической поверхности.

В качестве параметров, на которые можно непосредственно оказывать влияние в построенной модели выступают:

- $e$  – пористость материала;
- $\gamma$  – плотность материала ( $\text{кН/м}^3$ );
- $v$  – максимальная скорость фильтрации ( $\text{м/с}$ );
- $K_x$  – коэффициент водопроницаемости ( $\text{м/сут}$ );
- $E_i$  – стандартная сила между блоками, составляющими тело плотины (Н);
- $K_i$  – сдвиговая сила между блоками, составляющими тело плотины (Н);
- $W_i$  – вес отдельных блоков, составляющих тело плотины (Н);
- $R_w$  – влажность грунта ( $\text{кг/м}^3$ );
- $E$  – прочность грунта на сжатие (МПа);
- $P$  – величина воздействующей массы воды (определяется как отметка уровня воды в верхнем бьефе) (Н).

Проведение численного эксперимента предполагает, что при заблаговременных расчетах удастся определить множество таких состояний гидротехнического сооружения, которые соответствуют его не разрушению.

При изменении параметров материалов, составляющих грунтовую плотину, и ее геометрических параметров планируется построить простейшую аналитическую зависимость вида (2):

$$K_{уст} = f(e, \gamma, v, K_x, E_i, K_i, W_i, R_w, E, P). \quad (2)$$

Построенная зависимость позволит повысить оперативность прогноза состояния плотин и определить (за счет решения оптимизационной задачи) оптимальные значения параметров, на которые можно повлиять путем реализации инженерно-технических мероприятий защиты.

## 3. Результаты

При проведении численных экспериментов (для построения регрессионной зависимости) применялся программный комплекс GeoStudio с использованием программного модуля SLOPE/W, который позволяет вычислять коэффициент запаса устойчивости и строит критическую поверхность скольжения (призму обрушения) по следующим методикам: методу Бишопа, методу Джанбу,



методу Спенсера и методу Моргенстен-Прайса. Все методы предельного равновесия допускают, что массив грунта над поверхностью скольжения делится на блоки (разделяющие плоскости между блоками всегда вертикальны). Поверхность скольжения рассматривается круглоцилиндрической формы. На отдельные блоки действуют силы, представленные на рис. 1.

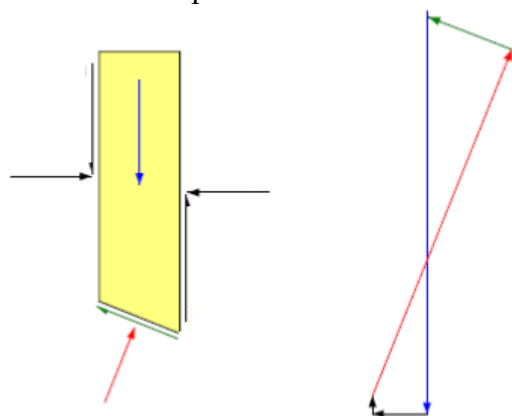


Рис.1. Система сил, действующих на произвольный отсек призмы обрушения

В ходе проведения эксперимента считается, что устойчивость откоса обеспечена, если  $K_i \geq 1,1 \dots 1,5$ . При данных параметрах откос является устойчивым и не требует усиления [10].

Модуль SEEP/W в программном комплексе GeoStudio имитирует движение жидкой воды или водяного пара через насыщенную или ненасыщенную пористую среду. Это позволяет моделировать постоянный или кратковременный поток грунтовых вод в естественных условиях с учетом климатических граничных условий [11].

Закон сохранения массы:

$$\dot{M}_{st} = \frac{dM_{st}}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} + \dot{M}_s \quad (3)$$

где  $M_{st}$  – запасенная масса;  $m_{in}$  – масса притока воды;  $m_{out}$  – масса оттока воды;  $M_s$  – источник массы или сток в рассматриваемом элементарном объеме.

Формулировка общего предельного равновесия (значение устойчивости гидротехнического сооружения) основана на уравнении с двумя факторами безопасности. В программном комплексе GeoStudio это реализуется модулем SLOPE/W. Одно уравнение да-

ет запас прочности по моменту равновесия  $k_m$ , другое уравнение определяет коэффициент безопасности по отношению к равновесию горизонтальных сил  $k_f$  [12].

Коэффициент запаса прочности относительно моментного равновесия составляет

$$k_m = \frac{\sum(c' \cdot \beta \cdot R + (N - u \cdot \beta) \cdot R \cdot \tan(\varphi'))}{\sum W \cdot x - \sum N \cdot f - \sum D \cdot d} \quad (4)$$

Коэффициент запаса прочности по отношению к равновесию горизонтальных сил составляет

$$k_f = \frac{\sum(c' \cdot \beta \cdot R + (N - u \cdot \beta) \cdot R \cdot \tan(\varphi'))}{\sum N \cdot \sin(\alpha) - \sum D \cdot \cos(\omega)} \quad (5)$$

где  $c'$  – сцепление материала;  $\varphi'$  – угол трения материала;  $u$  – поровое давление воды;  $N$  – нормальная сила основания среза;  $D$  – сосредоточенная точечная нагрузка;  $\beta, R, x, f, d, \omega$  – геометрические параметры;  $\alpha$  – угол наклона основания;  $W$  – вес среза.

Для проведения численного эксперимента рассмотрим грунтовую плотину со следующими характеристиками:

- ширина по гребню – 8 м;
- длина дамбы – 700 м;
- заложения откосов: верхового – 1:3, низового – 1:2,5;
- материал плотины – земляная;
- геология – суглинки и глины.

Результаты статического расчета откоса плотины частично приведены на рис. 2.

Результаты одного из экспериментов, реализуемых в программном комплексе GeoStudio визуально представлены на рис. 3.

Следует отметить, что формирование оползневых процессов может спровоцировать воздействие внешних факторов: землетрясение, антропогенное воздействие на склоны (его подрезка, увеличение нагрузки за счёт построек и пр.) и гидротехнические мероприятия, приводящие к изменению уровня подземных вод. Часто активизация оползневых процессов происходит после паводков и половодий: при подъёме уровня вод в водоеме, происходит и подъём уровня подземных вод, а после окончания половодий и паводков некоторое время сохраняется повы-

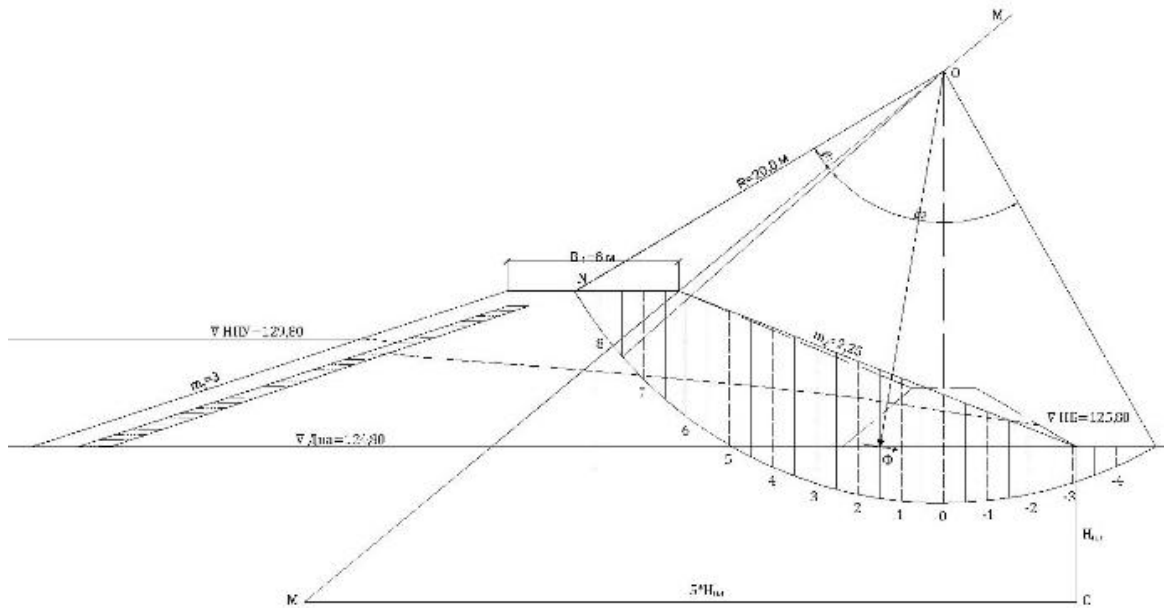


Рис. 2. Расчётная схема к статическому расчёту низового откоса плотины

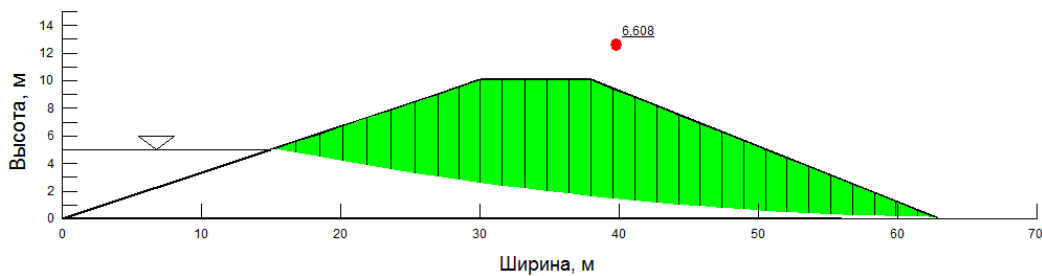


Рис.3. Определение показателя устойчивости плотины при высоте подъема воды 5 м (50% от максимальных значений)

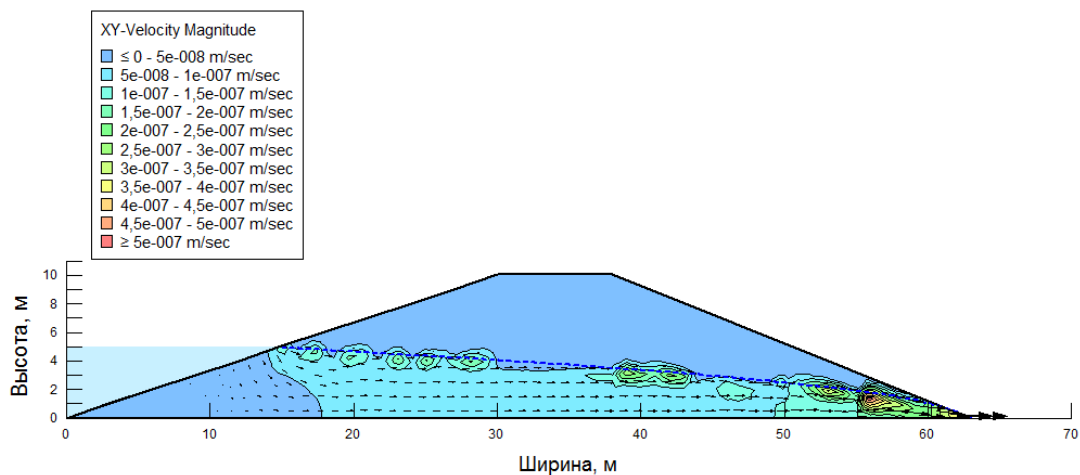


Рис. 4. Скорость фильтрации при высоте подъема воды 5 м (50% от максимальных значений)

шенное гидродинамическое давление подземных вод при их выходе на поверхность склона. Вследствие этого происходит выдавливание присклоновой части водоносного

слоя, провоцирующее оползание расположенной выше части склона [13].

Процессы фильтрации также могут быть смоделированы в программном комплексе GeoStudio (рис. 4).

Данное обстоятельство также стоит учитывать при проведении расчетов. Так, по результатам проведенных численных экспериментов, для максимального подъема уровня воды (до момента перетекания) Под действием оползневых процессов уклон изменился с  $m_1 = 2,5$  до приведенного значения уклона  $m_2 = 1,5$ . Соответственно изменился ко-

эффициент устойчивости с 2,975 до 2,219 (т.е. на 26%). Данное обстоятельство необходимо учитывать при построении регрессионной модели.

В рассматриваемом примере (для упрощения часть параметров принята за постоянные) результаты численных экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Результаты численного эксперимента

| Отметки уровня жидкости   |                          | Максимальная скорость фильтрации (среднее значение), $\frac{м}{с}$ | Материал (характеристики)                               |  | Метод оценки | Коэффициент устойчивости |       |
|---------------------------|--------------------------|--|---|--|--------------|--------------------------|-------|
| Отметка верхнего бьефа, м | Отметка нижнего бьефа, м |  | Название  | Коэффициент водопроницаемости, $\frac{м}{с}$ (Saturated Kx)<br>Влажность, $\frac{м^3}{м^3}$ (residual water content) |              |                          |       |
| 1                         | 0,2                      | $3,2 \cdot 10^{-7}$<br>( $1,6 \cdot 10^{-7}$ )                     | Глина<br>( $e = 0,8; \gamma_{гр} = 18 \frac{кН}{м^3}$ ) | 0,000001   | 0,5          | Моргенштерн-Прайс        | 107,3 |
| 2                         | 0,3                      | $4,5 \cdot 10^{-7}$<br>( $2,5 \cdot 10^{-7}$ )                     |   |  |              |                          | 26,6  |
| 3                         | 0,4                      | $3,5 \cdot 10^{-7}$<br>( $2 \cdot 10^{-7}$ )                       |   |  |              |                          | 12,3  |
| 4                         | 0,4                      | $4 \cdot 10^{-7}$<br>( $2 \cdot 10^{-7}$ )                         |   |  |              |                          | 8,4   |
| 5                         | 0,8                      | $5 \cdot 10^{-7}$<br>( $2,5 \cdot 10^{-7}$ )                       |   |  |              |                          | 6,6   |
| 6                         | 1,2                      | $4 \cdot 10^{-7}$<br>( $2 \cdot 10^{-7}$ )                         |   |  |              |                          | 5,4   |
| 7                         | 1,9                      | $5,5 \cdot 10^{-7}$<br>( $3 \cdot 10^{-7}$ )                       |   |  |              |                          | 4,6   |
| 8                         | 2,6                      | $7,5 \cdot 10^{-7}$<br>( $3,5 \cdot 10^{-7}$ )                     |   |  |              |                          | 3,5   |
| 9                         | 3,5                      | $8 \cdot 10^{-7}$<br>( $4 \cdot 10^{-7}$ )                         |   |  |              |                          | 3,0   |
| 10                        | 5                        | $8,5 \cdot 10^{-7}$<br>( $4,5 \cdot 10^{-7}$ )                     |   |  |              |                          | 2,9   |
| >10                       | Перелив                  | $8 \cdot 10^{-7}$<br>( $4 \cdot 10^{-7}$ )                         | -   |  |              |                          |       |

#### 4. Заключение

Формирование на основе полученных в ходе проведения численного эксперимента аналитической зависимости вида (2) позволит решить три задачи:

1) повысить оперативность (при удовлетворительной точности) прогноза состояния гидротехнических сооружений в случае угрозы влияния поражающих факторов быстроразвивающихся опасных природных явлений и техногенных процессов;

2) сформулировать оптимизационную задачу по приведению к максимальным значениям показателя устойчивости  $K_{уст}$  при ограниченных значениях факторов, на которые можно оказывать непосредственное влияние;

3) на основе решенной оптимизационной задачи определить рациональные параметры системы защиты (изменяемых параметров) и сформировать перечень мероприятий по их достижению.

#### Список литературы

1. Отчет Енисейского управления Ростехнадзора об аварии насыпи в Курагинском районе Красноярского края [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://enis.gosnadzor.ru/news/65/1044/> (дата обращения: 10.10.2020).

2. Низаметдинов Ф.К., Бесимбаева О.Г., Ожигин С.Г., Родина Е.М. Инструментальные наблюдения за состоянием насыпных ограждающих дамб // Труды Карагандинского государственного технического университета. 2002. №1. С.35-38.

3. Юзбеков Н.С. Проблемы оценки состояния грунтовых плотин // Технологии гражданской безопасности. 2004. №1. С.62-65.

4. П-842-86 (Гидропроект). Рекомендации по оценке надежности гидротехнических сооружений <https://library-full.nadzor-info.ru/doc/60936> (дата обращения 10.10.2020)

5. Panulinova E., Kharabinova S. Methods for Analyzing the Stability of an Earthen Dam Slope // *Advanced Materials Research*. 2014, Vol. 969. P. 245-248.

6. Karimi H., Hasani H., Mamizadeh J. Stability of Slope and Seepage Analysis in Earth Fills Dams Using Numerical Models (Case Study: Ilam DAM-Iran) // *World Applied Sciences Journal*. 2013. Vol.21(9). P. 1398-1402.

7. Tatevar S.P., Laxman N., Pawade. Stability Analysis of Earth Dam by Geostudio // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2012. Vol. 3. Issue 2. P. 437-446.

8. Шакарна С. Оценка надежности гидротехнических сооружений на основе системного подхода с учетом сейсмических условий: диссертация кандидата технических наук:

#### References

1. Report of the Yenisei Department of Rostekhnadzor About the accident of the embankment in the Kuraginsky district of the Krasnoyarsk Territory [Electronic resource]. Access mode: <http://enis.gosnadzor.ru/news/65/1044/> (date of access: 10.10.2020). (In Russian)

2. Nizametdinov F.K, Besimbaeva O.G, Ozhigin S.G, Rodina E.M. Instrumental observations of the state of bulk enclosing dams. *Proceedings of the Karaganda State Technical University*, 2002, No. 1, pp. 35-38. (In Russian)

3. Yuzbekov N.S. Problems of assessing the state of soil dams. *Civil security technologies*, 2004, No. 1, pp. 62-65. (In Russian)

4. P-842-86 (Hydroproject) Recommendation for assessing the reliability of hydraulic structures. <https://library-full.nadzor-info.ru/doc/60936> (date of access: 10.10.2020). (In Russian)

5. Panulinova E., Kharabinova S. Methods for analyzing the stability of the slope of an earthen dam. *Perspective studies of materials*, 2014, Vol. 969, pp. 245-248.

6. Karimi H., Hasani H., Mamizadeh J. Stability of Slope and Seepage Analysis in Earth Fills Dams Using Numerical Models (Case Study: Ilam DAM-Iran). *World Applied Sciences Journal*, 2013, Vol.21(9), pp. 1398-1402.

7. Tatevar S.P, Laxman N., Pawade. Analysis of the stability of an earth dam using Geostudio // *International Journal of Civil Engineering and Technologies*, 2012, Vol. 3, No. 2, pp. 437-446.

8. Shakarna S. Assessment of the reliability of hydraulic engineering structures on the basis of the system approach taking into account seismic conditions: dissertation of a candidate

- 05.23.07 / Шакарна Салех. М., 2012. 158 с. † of technical sciences: 05.23.07 / Shakarna Saleh. - Moscow, 2012 . 158 p. (In Russian)
9. Орехов В.В. Устойчивость грунтовой †  
плотины с вертикальной диафрагмой // Вест- †  
ник МГСУ. 2016. №1. С.143-149. †  
9. Orekhov V.V. Stability of a soil dam with †  
a vertical diaphragm. *Vestnik MGSU*, 2016, No. †  
1, pp. 143-149. (In Russian) †
10. Оника С.Г. Устойчивость бортов †  
карьеров. Минск: БНТУ, 2016. 43 с. †  
10. Onika S.G. Stability of the sides of open †  
pits. Minsk, BNTU, 2016 . 43 p. (In Russian) †
11. GeoSlope International Ltd, 2018. 80 p. †  
11. GeoSlope International Ltd, 2018.80 p. †
12. GeoSlope International Ltd, 2017. 250 p. †  
12. GeoSlope International Ltd, 2017.250 p. †
13. Попов Ю.В., Пустовит О.Е. Курс †  
«Общая геология». Учебное пособие к раз- †  
делу «Континентальные склоновые процес- †  
сы и отложения». Москва-Берлин: Директ- †  
Медиа, 2016. 48 с. †  
13. Popov Yu.V., Pustovit O.E. Course †  
"General Geology". Textbook for the section †  
"Continental slope processes and sediments". †  
Moscow-Berlin, Direct-Media, 2016. 48 p. (In †  
Russian) †

УДК (УДК) 552.32.3: 553.41:553.493 (575.1)

**МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКАЯ СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ СИЕНИТОИДНЫХ МАЛЫХ ИНТРУЗИЙ И ДАЕК КУМБЕЛЬ-УГАМСКОЙ ЗОНЫ ГЛУБИННЫХ РАЗЛОМОВ (ЧАТКАЛО-КУРАМИНСКИЙ РЕГИОН, СРЕДИННЫЙ ТЯНЬ-ШАНЬ)****METALLOGENIC SPECIALIZATION OF SIENITOID SMALL INTRUSIONS AND DIKES OF THE KUMBEL-UGAM ZONE OF DEPTH FAULTS (CHATKAL-KURAMA REGION, MIDDLE TIAN SHAN)**Мамарозиков У.Д., Суюндикова Г.М., Кирезиди С.В.  
Mamarozikov U.D., Suyundikova G.M., Kirezidi S.V.Институт геологии и геофизики имени Х.М. Абдуллаева (Ташкент, Узбекистан)  
Institute of geology and geophysics named after H.M. Abdullaev (Tashkent, Uzbekistan)

**Аннотация.** Приведены геологические, петрографические, минералогические и геохимические сведения, подтверждающие комагматичность сиенитоидных малых интрузий и даек Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов. Специализация сиенитоидов на благородные и редкие металлы изложена на основе результатов микрозондовых исследований форм нахождения, вещественных составов минералов, рудоносных кремнещелочных флюидных микробособлений и нанокристаллитов в них. Результаты масс-спектрометрического изучения сиенитоидов подтверждают их металлогеническую специализацию на благородные, редкие и редкоземельные металлы.

**Ключевые слова:** сиениты, кварцевые сиениты, граносиениты, минералы-концентраторы, минералы-носители, рудные элементы, металлогеническая специализация.

**Дата принятия к публикации:** 04.08.2020  
**Дата публикации:** 25.12.2020

**Сведения об авторах:**

**Мамарозиков Усмонжон Довронович** – доктор геолого-минералогических наук, заведующий отделом «Изучение рудообразующих процессов» Института геологии и геофизики имени Х.М. Абдуллаева, Государственный комитет по геологии и минеральным ресурсам Республики Узбекистан, e-mail: udmamarozikov@rambler.ru.

**Суюндикова Гулчехра Махкамбаевна** – научный сотрудник отдела «Изучение рудообразующих процессов» Института геологии и геофизики имени Х.М. Абдуллаева, Государственный комитет по геологии и минеральным ресурсам Республики Узбекистан, e-mail: gsuyundikova@rambler.ru.

**Кирезиди Светлана Вадимовна** – докторант отдела «Изучение рудообразующих процессов» Института геологии и геофизики имени Х.М. Абдуллаева, Государственный комитет по геологии и минеральным ресурсам Республики Узбекистан, e-mail: skirezidi@gmail.com.

**Abstract.** The article describes the geological, petrographic, mineralogical and geochemical data confirming comagmatic nature of syenitoid small intrusions and dikes of the Kumbel-Ugam zone of deep faults. Specialty of syenitoids and related metasomatites and hydrothermalites for precious and rare metals is described on the basis of the results of microprobe analyzes of the forms of occurrence, the material composition of minerals, micro segregations of ore-bearing silicon-alkaline fluids and nanocrystallites in them. The results of mass-spectrometric study of syenitoids confirm their metallogenic specialization in noble, rare and rare earth metals.

**Keywords:** syenites, quartz syenites, granosyenites, minerals-concentrators, minerals-carriers, ore elements, metallogenic specialization.

**Date of acceptance for publication:** 04.08.2020  
**Date of publication:** 25.12.2020

**Authors' information:**

**Usmonjon D. Mamarozikov** – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the Department for the study of ore formation processes, Institute of geology and geophysics named after H.M. Abdullaev, State Committee of the Republic of Uzbekistan on Geology and mineral Resources, e-mail: udmamarozikov@rambler.ru.

**Gulchekhra M. Suyundikova** – researcher of the Department for the study of ore formation processes, Institute of geology and geophysics named after H.M. Abdullaev, State Committee of the Republic of Uzbekistan on Geology and mineral Resources, e-mail: gsuyundikova@rambler.ru.

**Svetlana V. Kirezidi** – Doctorant of the Department for the study of ore formation processes, Institute of geology and geophysics named after H.M. Abdullaev, State Committee of the Republic of Uzbekistan on Geology and mineral Resources, e-mail: skirezidi@gmail.com.

## 1. Введение

В магматических провинциях сиенитоидный магматизм характеризуется как индикатор, указывающий на постколлизивно-анорогенный (внутриплитный) этапа их геодинамического развития [1-4]. В последние десятилетия в ряде регионов мира в сиенитоидах или их фронтальных и апикальных экзоконтактных частях установлены неизвестные ранее рудные месторождения Fe, Cu, Mo, Au, Ag и платиноидов [1, 4, 6-8].

Внутриплитный магматизм Чаткало-Кураминского региона Среднего Тянь-Шаня наряду с субщелочными габброидами и редкометальными гранитоидами характеризуется развитием магматитов сиенитоидного состава. Последние образовали обширные проявления сиенитоидных малых порфировых интрузий и дайковых полей. Сопряженность этих малых порфировых интрузий и дайковых полей с разнотипными благородными и редкометальными (в том числе редкоземельными) оруденениями данного региона представляет несомненный интерес для создания эмпирических поисковых моделей, основанных на формировании рудогенерирующего сиенитоидного магматического расплава и разработке связанных с ним геолого-петрографических, минералого-геохимических критериев поиска рудных и нерудных объектов. Полученные нами новые данные по геолого-петрографическим и минералого-геохимическим особенностям сиенитоидов Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов Чаткало-Кураминского региона дают новую информацию об условиях их формирования и закономерностях локализации, приуроченных к ним разнотипных метасоматических и рудных тел.

В докладе академика О.В. Петрова на 33 Международном Геологическом Конгрессе [9], посвященном основным результатам международного проекта по тектонике и металлогении Центральной Азии и прилегающих территорий, отмечается особая роль глубинных тектонических процессов в эволюции литосферы Земли на всех этапах ее развития. Это процессы мантийного апвеллинга, сопряженные с глубокими попереч-

ными расколами континентальной коры складчатых областей, возникновением зон высокого прогрева и декомпрессии, внедрением в кору глубинного мантийного вещества и активным взаимодействием мантийных флюидов с силикатическим веществом коры. Для таких зон характерны локальные ареалы субщелочных и щелочных базальтоидов, трахитов, ультраосновного и основного, карбонатитового, сиенитоидного, редкометального гранитоидного, лампроитового и лампрофирового магматизма.

Деструктивные зоны глубинных разломов имеют важное металлогеническое значение, поскольку в них размещаются крупные месторождения титана, ниобия, циркония, редких земель, кобальта, никеля, золота и серебра с платиноидной нагрузкой, апатита и др.

Генезис этих месторождений связывают с поздними деструктивными постколлизивными и посторогенными обстановками с проявлением внутриплитного магматизма, тектономагматической активизацией и глыбовой тектоники [9].

## 2. Геологическая позиция, петрографические и петрохимические особенности сиенитоидных малых интрузий и даек

Кумбель-Угамская зона глубинных разломов является важнейшей деструктивной анти Тяньшанской структурой, разделяющей Чаткальскую и Кураминскую зоны Среднего Тянь-Шаня. Наиболее крупные субпараллельные разломы в зоне - Кумбельский, Джулайсайский Арашанский, Кенкольский и Угамский. Максимальная ширина Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов достигает 25 км, протяженность на отрезке между Северо-Ферганским и Северо-Каржантаускими глубинными разломами - 180 км. Строение зоны разломов кулисообразное. Основные разломы сопровождаются многочисленными мелкими опирающими и сопутствующими разрывами. Падение смесителя на северо-восток под углами  $60^{\circ}$ - $90^{\circ}$ , юго-западное крыло приподнято. В новейшее время по нему происходили сдвиговые перемещения с амплитудой до 5 км. Зона хо-

рошо прослеживается на аэрофотоснимках и топокартах по вытянутым депрессиям, цепочке седловин и родников.

В пределах Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов сиенитоидные малые интрузивы и дайки участвуют в геологических строениях во многих благородно-редкометалльных рудных полях (Чаркасарское, Чадакское, Актепинское, Ерташское, Ташкескен-Каттаакарское, Тереклинское и др.) и месторождениях урана и молибдена (Ризак и др.), золота и серебра (Пирмираб, Гузаксай, Актепа, Реваште и др.), апатита (Актепа) и флюорита (Суппаташ), размещенные в Кумбель-Угамской зоне глубинных разломов [10]. Но научные исследования по оценке металлогенической специализации этих образований никем специально не проведено.

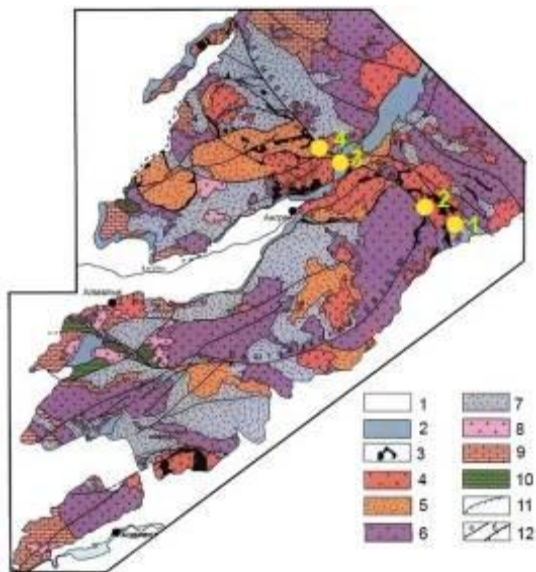


Рис. 1. Геологическая схема Чатколо-Кураминского региона по Н.П.Лаверову [11] с упрощениями У.Д. Мамарозикова.

На рис. 1 обозначено: 1 - континентальные отложения, межгорные и предгорные молассы, лессовидные суглинки ( $P_{g3-Q}$ ); 2 - морские и прибрежно-морские платформенные отложения ( $J_2 - P_{g3}$ ); 3-6- породы позднепалеозойского вулканогенно-интрузивного комплекса; 3-интрузивные комплексы граносиенит-порфиров, лейкогранит-порфиров, кварцевых порфиров в эндоконтактовых ареолах экструзивных куполов, кольцевых и

полукольцевых разломах, обрамлениях кальдер ( $P_2$ ), 4- многофазные субвулканические интрузивы и экструзивные купола аляскитоидных гранитов, аляскитов, риолитов и трахириолитов ( $P_1$ ); 5- вулканы кислого состава и красноцветные молассы ( $P_{1-2}$ ); 6- многофазные интрузивы гранодиоритов, гранодиорит- и гранитов ( $C_2-C_3$ ); 7 - вулканы андизит-дацитового состава ( $C_{2-3}$ ); 8-9- породы основания позднепалеозойского вулканогенно-интрузивного комплекса; 8- каледонские гранитоиды ( $S_2-D_1$ ); 9 - терригенные и хемогенные отложения, вулканы андизитового риолитового состава ( $S_2-D_2$  и  $D_3-C_1$ ); 10 - метаморфические сланцы, доломиты, известняки, вулканы андезит-дацитового состава (O-S); 11 - альпийские надвижки; 12 - региональные (а) и кольцевые разломы (б), 13 - объекты исследования: 1- Чадакское рудное поле, 2 -Актепинское рудное поле, 3 -Бешкуль-Сардалинское рудное поле, 4 - Ерташское рудное поле.

В пределах Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов определяющие породы внутриплитной сиенитоидной ассоциации – сиенит-порфиры, кварцевые сиенит-порфиры и граносиенит-порфиры выявлены в составе бабайобского ( $P_1$ ), бабайтаудорского ( $P_1$ ), чильтенского ( $P_1$ ) и гузаксайского ( $P_2$ ) комплексов [2, 4, 12].

Т.Н. Далимов [2] предполагал, что чильтенские сиенит-порфиры и бабайтагские граносиенит-порфиры являются разновозрастными и представляют собой фациальные разновидности. По нему «чильтенские» сиенит-порфиры являются наименее эродированными, в то время как бабайтагские граносиенит-порфиры представляют собой наиболее эродированные части сиенит-порфировых тел, т.е. чильтенские сиенит-порфиры соответствуют субвулканической фации бабайтагских граносиенит-порфиров принадлежащих к фации малых глубин.

Дайки сиенитоидов гузаксайского комплекса, выделенные только в пределах Чадакского рудного поля мы параллелизируем с аналогичными породами чильтенского комплекса, имеющими региональное распространение и далее в тексте их рассматриваем в составе последнего. Сиенитоиды бабайоб-



ского комплекса считаем сходными с породами бабайтаудорского комплекса.

Сиенитоиды бабайобского, бабайтаудорского, чильтенского и гузаксайского комплексов, несомненно, относятся к послекызылнуринским магматическим образованиям, доказательством чему служат многочисленные примеры прорыва ими пород кызылнуринского комплекса ( $C_3-P_1$ ) и данные радиологических датировок ( $276 \pm 9$  млн. лет, K-Ar, ИГЕМ РАН, [13]).

Граносиениты бабайтаудорского комплекса образуют трещинные штокообразные интрузии внутри Бабайтаудорского лакколита или развиты в его периферии в виде кольцевых даек, иногда малых порфировых интрузий. Наиболее полно изучен петрографический состав сиенитоидных штоков Бешкуль, Айгырбайтал, Джусали и Байназар, где граносиенит-порфиры являются преобладающими. Они представляют собой породы, обладающие большим количеством порфировых выделений красных калиевых полевых шпатов, белых и розовых плагиоклазов, разложившихся темноцветных минералов и редких зерен кварца (рис. 2 и 3). Часто наблюдается зональное строение полевых шпатов: ядро их сложено плагиоклазом, а периферийная часть - калиевым полевым шпатом; изредка наблюдается обратная зональность. Количество порфировых выделений в среднем равно 30% объема породы, доходя местами до 40%. В приконтактных зонах количество порфировых выделений падает до 8-10%.

Тела сиенит-порфиров и кварцевых сиенит-порфиров чильтенского комплекса с трахидолеритами, гранит-порфирами, онгонитами образуют групповые дайковые пучки, развивающиеся по параллельно-ориентированным трещинам, образуют самостоятельные тела, но иногда наблюдаются в эндоконтактных частях трахидолеритов, образуя с ними вместе сложные дайки. Контакты между этими породами резкие, а также имеют постепенные переходы. Иногда сиенитоидные дайки чильтенского комплекса формируют радиальные дайки, ориентированные к центрам штокообразных интрузивных тел сиенитоидов. Характерна вытянутая форма

штоков по простиранию Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов. Вполне вероятно, что сиенитоидный магматический расплав внедрялся здесь по разлому.

Породы плотные, обладают коричневатобурой, красно-бурой, иногда розовато-серой окраской и имеют порфировую, микропорфировую или слабопорфировую (реже афировую, сферолитовую) структуру (рис. 3). В выделениях: таблитчатый плагиоклаз, псевдоморфозы хлорита и кальцита по амфиболу, калиево-натриевый полевой шпат таблитчатой формы, пелитизированный, содержащий пойкилитовые включения измененных пироксена и амфибола.

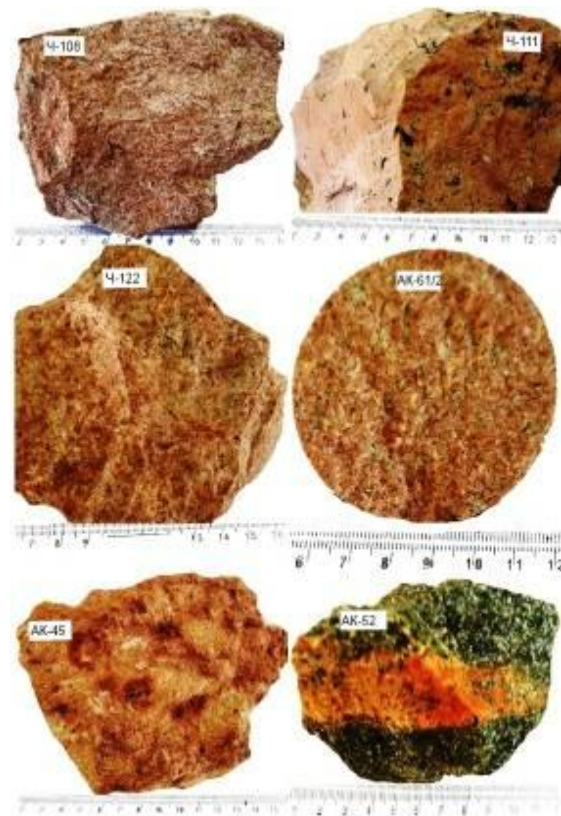


Рис. 2. Фотографии штурфов пород внутриплитной сиенитоидной ассоциации Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов

Ч-108 – кварцевый сиенит-порфир, Чадак; Ч-111 – трахит, Чадак; Ч-122- мелкозернистый граносиенит, Чадак; АК-61/2 – среднезернистый граносиенит, Актепа; АК-45 – измененный граносиенит, переработанный флюидами, Актепа; АК-52 – маломощная сиенитовая дайка в меланогаббро, Актепа.

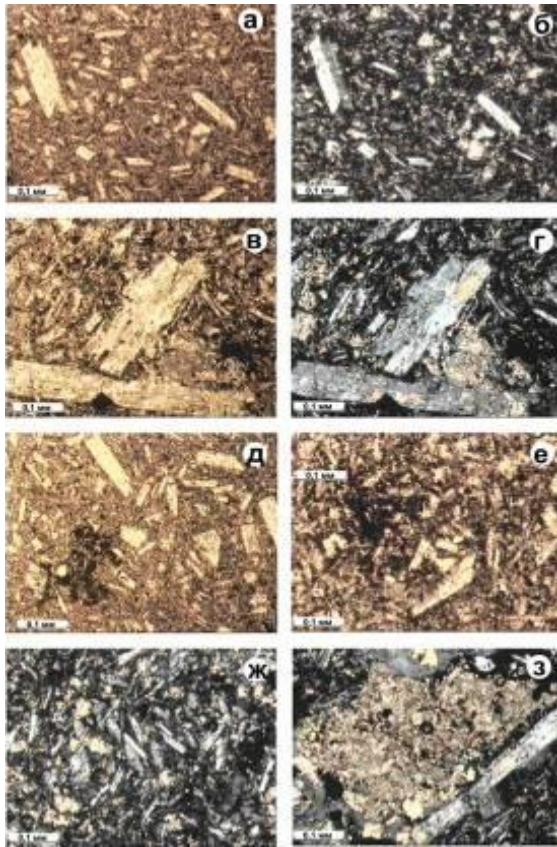


Рис. 3. Микрофотографии прозрачных шлифов сиенитоидных даек: а, в, д, е – снимки получены без анализатора, б, г, ж, з – с анализатором.

Основная масса пород скрытокристаллическая, мелкозернистая, гипидиоморфнозернистая, обычно сильно разложенная и состоит из пелитизированных идиоморфных зерен полевого шпата и ксеноморфного кварца в мезостазице. В меньшем количестве встречаются идиоморфные лейсты плагиоклаза (рис. 3).

В Чадакском рудном поле наряду с дайками сиенит-порфиров и трахитов, нами выявлены дайки сферолитовых трахитов, ассоциирующие с шаровидными дайками трахидолеритов. Их отличительная особенность – наличие радиально-лучистых образований, сложенных кварцем и полевыми шпатами, между которыми располагается вулканическое стекло или микрофельзитовая масса (рис. 4 и 5).



Рис. 4. Штуфы из даек сферолитовых трахитов Чадакского рудного поля (Au-Ag месторождение Пирмираб)

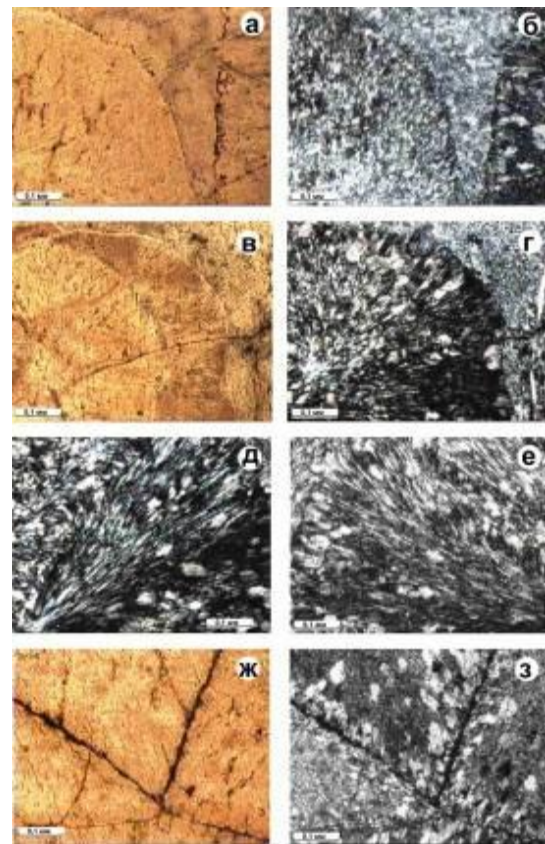


Рис. 5. Микрофотографии прозрачных шлифов дайки сферолитового трахита, Чадакского рудного поля. Шлиф № ЧВ-1

а-е – радиально-лучистые сферолитовые образования, сложенные кварцем и полевыми шпатами, между которыми располагается вулканическое стекло; ж-з – радиальноориентированная кристаллизация полевых шпатов на стенках прожилков гематитсодержащих редкоземельных карбонатов; а, в, ж – снимки получены без анализатора, остальные – с анализатором.

Главная часть выделений (60%) принадлежит обычно идиоморфному калиевому полево-му шпату, иногда пертитового строения. Изучение на электронном микроанализаторе (Jeol-8800Rh, Япония) показало близость минерала к анортоклазу. Плагиоклаз кислый

(An<sub>1-23</sub>), встречается реже калиевого полево-го шпата (37% порфировых выделений) как в виде самостоятельных зерен, так и в виде внутренних частей зональных кристаллов (табл. 1).

Таблица 1

Составы полевых шпатов пород сиенитодных малых интрузий и даек Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов, %

| № пробы           | n  | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO* | MnO  | CaO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | BaO  | Сумма  | An    | Ab    | Or    | Cel  |
|-------------------|----|------------------|--------------------------------|------|------|------|-------------------|------------------|------|--------|-------|-------|-------|------|
| <b>Плагиоклаз</b> |    |                  |                                |      |      |      |                   |                  |      |        |       |       |       |      |
| 09-M24            | 5  | 67,53            | 20,17                          | 0,49 | 0,01 | 0,34 | 11,65             | 0,15             | 0    | 100,34 | 1,65  | 97,41 | 0,94  | 0    |
| 09-M22            | 11 | 64,71            | 21,65                          | 0,29 | 0,03 | 1,34 | 10,70             | 0,92             | 0    | 99,64  | 6,71  | 87,37 | 5,92  | 0    |
|                   | 2  | 65,75            | 20,47                          | 0,10 | 0    | 0,18 | 10,21             | 3,29             | 0    | 100,00 | 0,32  | 78,13 | 21,55 | 0    |
| AK-05             | 3  | 47,99            | 25,13                          | 0,18 | 0,03 | 25,3 | 1,25              | 0,13             | 0    | 100,01 | 85,3  | 13,6  | 1,1   | 0    |
|                   | 3  | 57,01            | 26,66                          | 0,33 | 0,05 | 9,56 | 5,87              | 0,39             | 0    | 99,87  | 45,2  | 52,3  | 2,5   | 0    |
|                   | 2  | 61,15            | 24,32                          | 0,33 | 0,02 | 6,10 | 7,55              | 0,54             | 0    | 100,01 | 30,0  | 66,6  | 3,4   | 0    |
|                   | 4  | 69,09            | 19,82                          | 0,07 | 0,02 | 0,25 | 10,68             | 0,02             | 0    | 99,95  | 1,3   | 98,6  | 0,1   | 0    |
| AK-17             | 3  | 67,87            | 19,81                          | 0,29 | 0,03 | 0,24 | 11,72             | 0,21             | 0    | 100,17 | 0,78  | 97,99 | 1,23  | 0    |
| AK-22             | 1  | 68,36            | 20,05                          | 0,02 | 0,11 | 0,02 | 11,10             | 0,34             | 0    | 100,00 | 0,09  | 97,76 | 2,14  | 0    |
| AK-26             | 3  | 68,43            | 20,05                          | 0,22 | 0,02 | 0,42 | 10,76             | 0,03             | 0    | 99,93  | 2,11  | 97,69 | 0,19  | 0    |
| AK-31             | 4  | 68,78            | 19,73                          | 0,43 | 0,05 | 0,10 | 10,51             | 0,35             | 0    | 99,95  | 0,51  | 97,16 | 2,31  | 0    |
| Ч-14/14           | 4  | 66,98            | 21,53                          | 0,87 | 0,08 | 1,37 | 7,90              | 1,17             | 0    | 99,90  | 8,03  | 83,15 | 8,82  | 0    |
| Ч-19/14           | 3  | 69,55            | 19,82                          | 0,05 | 0    | 0,08 | 10,37             | 0,12             | 0    | 99,99  | 0,42  | 98,76 | 0,81  | 0    |
| Ч-23/14           | 4  | 66,71            | 20,20                          | 0,35 | 0    | 0,26 | 12,33             | 0,17             | 0    | 100,02 | 0,64  | 97,45 | 1,03  | 0    |
| ЧВ-1/14           | 2  | 67,62            | 18,77                          | 0,74 | 0    | 0,41 | 9,59              | 2,65             | 0    | 99,78  | 3,10  | 83,28 | 16,40 | 0    |
| <b>Анортоклаз</b> |    |                  |                                |      |      |      |                   |                  |      |        |       |       |       |      |
| 09-M22            | 1  | 56,17            | 29,50                          | 1,77 | 0,09 | 0,32 | 5,80              | 6,84             | 0    | 100,49 | 1,84  | 48,13 | 50,03 | 0    |
| Ч-14/14           | 1  | 53,89            | 27,56                          | 4,17 | 0,11 | 5,12 | 3,66              | 5,54             | 0    | 100,05 | 33,65 | 27,18 | 39,15 | 0    |
|                   | 1  | 60,70            | 24,35                          | 2,05 | 0,10 | 1,30 | 4,73              | 6,30             | 0,47 | 97,95  | 7,11  | 46,04 | 43,83 | 3,02 |
| <b>Ортоклаз</b>   |    |                  |                                |      |      |      |                   |                  |      |        |       |       |       |      |
| 49-M07            | 3  | 62,99            | 19,62                          | 0,03 | 0    | 0,02 | 0,51              | 17,29            | 0,02 | 100,48 | 0,04  | 4,29  | 95,62 | 0,05 |
| 09-M24            | 6  | 64,37            | 18,67                          | 0,27 | 0    | 0,01 | 0,37              | 16,84            | 0    | 100,53 | 0     | 1,94  | 98,06 | 0    |
| 09-M22            | 11 | 63,26            | 19,42                          | 0,12 | 0,01 | 0    | 0,74              | 16,35            | 0    | 99,92  | 0,09  | 3,27  | 96,64 | 0    |
| AK-03             | 3  | 64,94            | 17,95                          | 0,84 | 0    | 1,54 | 0                 | 14,76            | 0,05 | 100,08 | 5,42  | 0     | 94,57 | 0    |
| AK-17             | 2  | 64,22            | 18,57                          | 0,14 | 0,05 | 0,05 | 0,90              | 16,35            | 0,22 | 100,50 | 0     | 0,15  | 99,79 | 0,06 |
| AK-22             | 1  | 64,84            | 18,59                          | 0,01 | 0,17 | 0,14 | 0,33              | 15,92            | 0    | 100,00 | 0,66  | 2,79  | 96,55 | 0    |
| AK-31             | 2  | 63,37            | 18,05                          | 0,86 | 0,06 | 0,16 | 0,28              | 16,63            | 0,28 | 99,89  | 0,67  | 2,29  | 96,91 | 0,13 |
| Ч-14/14           | 2  | 63,41            | 18,26                          | 0,10 | 0    | 0,02 | 0,59              | 16,59            | 1,03 | 100,00 | 0     | 1,74  | 98,23 | 1,93 |
| Ч-19/14           | 3  | 63,69            | 18,08                          | 0,18 | 0,03 | 0,33 | 0,03              | 17,15            | 0,25 | 99,74  | 0,88  | 0     | 98,44 | 0,68 |
| Ч-23/14           | 2  | 65,15            | 19,37                          | 0,23 | 0    | 0,30 | 1,40              | 13,41            | 0,17 | 100,03 | 1,48  | 12,43 | 85,24 | 0,83 |
| Ч-29/14           | 3  | 63,80            | 18,39                          | 0,33 | 0,01 | 0,12 | 0,31              | 17,07            | 0,24 | 0      | 0,88  | 0,18  | 97,16 | 1,78 |
| ЧВ-1/14           | 1  | 67,46            | 17,25                          | 0,29 | 0    | 0,26 | 3,83              | 11,01            | 0    | 100,01 | 0,84  | 11,13 | 88,03 | 0    |

Примечание: здесь и далее в тексте и таблицах: FeO\* = FeO+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; n – количества определенных; содержания CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O – не определены; микрозондовые анализы выполнены У.Д.Мамарозиковым на электронном микроанализаторе «Jeol-8800R» (Япония) в ИГиГ Госкомгеологии РУз; 09-M24 – дайка мелкозернистого граносиенит-аплита в Бешкулском штокоподобном теле граносиенит-порфиров; 09-M22 – граносиенит-порфир, Бешкульское

штокоподобное тело; 49-M07 – дайка кварцевого сиенит-порфира (Ерташсайская площадь, Каттаакар); АК-03 и АК-05 – монцониты, Актепинский габбро-монцонит-сиенитовый массив; АК-17, АК-22, АК-26 и АК-31 – дайки трахитов (АК-26 и АК-31), кварцевых сиенитов (АК-22) и граносиенитов (АК-17), Актепинский габбро-монцонит-сиенитовый массив; Ч-14/14, Ч-19/14, Ч-23/14, Ч-29/14 и ЧВ-1 – дайки кварцсодержащих (Ч-14/14, Ч-19/14), кварцевых (Ч-29/14), ортоклазовых (Ч23/14) сиенит-порфиров и сферолитовых трахитов (ЧВ-1) Чадакского рудного поля.

Кварц в порфировых выделениях встречается не часто, образуя корродированные зерна.

Темноцветные минералы очень редки и представлены зеленой роговой обманкой, реже биотитом, обычно полностью замещенными хлоритом, карбонатом, эпидотом, магнетитом, а биотит, кроме того, мусковитом (табл. 2). Основная масса породы сложена пелитизированным калиевым полевым шпатом и кварцем, причем последний играет подчиненную роль.

Кроме того, в основной массе присутствуют плагиоклаз, хлорит и рудный минерал. В зоне контакта основная масса имеет микропироксилитовую и фельзитовую структуру.

Местами количество кварца в основной массе уменьшается, и порода переходит в кварцевые сиенит-порфиры; иногда количество кварца увеличивается, и порода превращается в гранит-порфиры. Под микроскопом – полностью раскристаллизованная порфировая порода, состоящая в основном, из крупных кристаллов плагиоклаза, размер которых варьирует в пределах от 0,1 до 1,0 мм; редко отмечаются призматические кристаллы роговой обманки и таблички биотита с неправильными очертаниями, размером 1-2 мм, а также кварца, микропертита.

В породе установлены следующие акцессорные минералы: циркон, апатит, флюорит, редкоземельные карбонаты, ортит и другие.

Таблица 2

Составы фемических породообразующих минералов пород малых интрузий и даек Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов, %

| № пробы                               | n   | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO*  | MnO  | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | MgO   | CaO   | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | Cl   | Всего  |
|---------------------------------------|---|------------------|------------------|--------------------------------|-------|------|-------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------------------|------------------|------|--------|
| <b>Энстатит</b>                       |   |                  |                  |                                |       |      |                               |                                |       |       |                   |                  |      |        |
| 09-M24                                | 2   | 53,84            | 0                | 9,77                           | 0,84  | 0    | 0                             | 5,80                           | 22,38 | 0,98  | 0,19              | 2,67             | 0,38 | 96,85  |
| <b>Диопсид</b>                        |   |                  |                  |                                |       |      |                               |                                |       |       |                   |                  |      |        |
| АК-26                                 | 3   | 54,23            | 0,0              | 0,80                           | 6,41  | 0,56 | 0,08                          | 0                              | 14,29 | 23,23 | 0,28              | 0                | 0    | 99,88  |
| <b>Авгит</b>                          |   |                  |                  |                                |       |      |                               |                                |       |       |                   |                  |      |        |
| АК-05                                 | 3   | 52,70            | 0,13             | 1,89                           | 19,40 | 0,75 | 0,06                          | 0                              | 12,31 | 12,54 | 0,04              | 0,14             | 0,06 | 100,02 |
|                                       | 8   | 54,26            | 0,40             | 1,68                           | 13,64 | 0,69 | 0,16                          | 0                              | 16,37 | 12,56 | 0,08              | 0,14             | 0,05 | 100,03 |
| <b>Амфибол (феррочермакит)</b>        |   |                  |                  |                                |       |      |                               |                                |       |       |                   |                  |      |        |
| Ч-14/14                               | 5   | 38,92            | 0,07             | 23,55                          | 12,18 | 0,32 | 0,03                          | 0                              | 0,98  | 23,72 | 0,18              | 0,06             | 0    | 100,01 |
| <b>Амфибол (ферроэдинит)</b>          |   |                  |                  |                                |       |      |                               |                                |       |       |                   |                  |      |        |
| 09-M22                                | 4   | 42,41            | 0,68             | 7,40                           | 19,60 | 1,19 | 0                             | 0                              | 8,00  | 10,73 | 2,05              | 1,23             | 0,22 | 93,51  |
|                                       | <b>Амфибол (железистая роговая обманка)</b> |                  |                  |                                |       |      |                               |                                |       |       |                   |                  |      |        |
|                                       | 1   | 43,70            | 0,02             | 19,78                          | 13,25 | 0,30 | 0                             | 0                              | 0     | 19,46 | 0,12              | 0,01             | 0    | 96,64  |
| <b>Щелочной амфибол (арфведсонит)</b> |   |                  |                  |                                |       |      |                               |                                |       |       |                   |                  |      |        |
| 09-M24                                | 1   | 32,04            | 0,21             | 11,41                          | 46,99 | 0,07 | 0                             | 0                              | 0,58  | 0,11  | 8,30              | 0,29             | 0    | 100    |

Окончание табл. 2

| № пробы         | n  | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO*  | MnO  | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | MgO   | CaO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | Cl   | Всего |
|-----------------|----|------------------|------------------|--------------------------------|-------|------|-------------------------------|--------------------------------|-------|------|-------------------|------------------|------|-------|
| <b>Биотит</b>   |    |                  |                  |                                |       |      |                               |                                |       |      |                   |                  |      |       |
| 49-M07          | 3  | 36,67            | 1,63             | 16,97                          | 27,04 | 0,55 | 0                             | 0                              | 4,03  | 0    | 0                 | 9,41             | 0,56 | 96,84 |
|                 | 1  | 28,90            | 2,07             | 17,07                          | 31,54 | 0,54 | 0                             | 0                              | 3,06  | 0    | 0                 | 5,54             | 0,29 | 89,01 |
| 09-M24          | 1  | 40,61            | 0,09             | 18,32                          | 23,11 | 0,31 | 1,57                          | 0                              | 0     | 0,28 | 0,32              | 7,30             | 0    | 91,91 |
|                 | 10 | 37,26            | 2,08             | 12,19                          | 19,54 | 0,74 | 0                             | 0                              | 11,84 | 0,09 | 0,25              | 8,86             | 0,27 | 93,12 |
| AK-03           | 3  | 40,12            | 4,09             | 14,79                          | 14,95 | 0,43 | 0,16                          | 0                              | 15,56 | 0,20 | 0,27              | 8,07             | 0,16 | 98,87 |
| 81-90           | 1  | 36,10            | 3,26             | 10,95                          | 17,79 | 0,25 | 0                             | 0                              | 13,29 | 0    | 0,29              | 9,37             | 0,40 | 91,70 |
| 80/90           | 1  | 35,24            | 5,74             | 12,55                          | 13,33 | 0,33 | 0                             | 0                              | 14,10 | 0    | 0,50              | 8,76             | 0,17 | 90,72 |
| 80a/90          | 1  | 35,56            | 5,06             | 12,26                          | 13,21 | 0,15 | 0                             | 0                              | 14,88 | 0    | 0,36              | 9,32             | 0,21 | 91,01 |
| <b>Мусковит</b> |    |                  |                  |                                |       |      |                               |                                |       |      |                   |                  |      |       |
| 09-M24          | 3  | 48,98            | 0,07             | 30,97                          | 5,11  | 0,10 | 0                             | 0                              | 0,87  | 0,59 | 0,29              | 9,70             | 0    | 96,68 |
| AK-03           | 1  | 49,36            | 0,03             | 28,21                          | 4,55  | 0,09 | 0,03                          | 0                              | 2,56  | 0,66 | 0,42              | 8,98             | 0    | 95,00 |
| AK-17           | 3  | 45,98            | 0,10             | 26,60                          | 1,48  | 0,07 | 0,05                          | 0                              | 2,32  | 0,34 | 0,34              | 8,82             | 0    | 86,10 |

Примечание: в амфиболах Бешкульского граносиенитового штока: La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,66; Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,62; в Анализы биотитов проб №№ 81-90, 80/90, 80a/90 – по [13]: 81/90 – граносиенит, Актепа; 80/90 и 80a/90 – сиенит, Актепа.

В.Н. Волков и другие [13] на Актепинском рудном поле выделяют две группы сиенитоидов: плутонические и субвулканические (дайковые). Бийназарский и Джусалисайский сиенитоидные тела субвулканического облика и по морфологическим особенностям и составу весьма близки к сиенитоидам Чильтенского штока. Сиенитоиды, участвующие в строении Актепинского массива имеют плутонический облик, которые пространственно тяготеют к интрузивным телам габброидов и по суммарному объему резко уступают ему. Наиболее ранние сиенитоиды этой группы по составу близки к сформировавшимся до этого породам поздней фазы габброидного массива. Поэтому при рассмотрении эволюции минерального состава актепинских магматических пород в возрастном ряду от ранней фазы габброидов до поздней фазы сиенитоидов рубеж между этими группами пород незаметен: от начала к концу этого ряда в составе пород плавно нарастает содержание кварца и калишпата. Параллельно с этим убывает и площадь выходов соответствующих пород, сформированных в ходе прогрессирующей кристаллизационной дифференциации субщелочной базитовой магмы. Исходя из этого можно считать, что мелано-, мезо-, лейкократовые

габбро, монцогаббро и сиенитоиды, слагающие Актепинский массив, генетически связаны между собой и представляют разные фазы эволюции первичной субщелочной базальтовой магмы [13]. Кроме того, это дает возможность объяснить близость возраста базитовых и сиенитоидных даек, совместное нахождение их в одном поле или встречаемость в строении сложных даек.

По химизму и петрохимическим особенностям сиенитоиды малых интрузий и даек Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов полностью соответствуют друг другу. Они имеют идентичные содержания SiO<sub>2</sub> и охватывают широкий спектр средних (сиениты и кварцсодержащие сиениты), кислых (кварцевые сиениты и граносиениты) пород, характеризующиеся повышенной щелочностью (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O – 5,5 – 10 %).

По петрохимическим коэффициентам пермские сиенитоиды Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов относятся к калий-натриевой серии (в малых интрузиях Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O – 0,38-1,90, в среднем – 1,40; в дайках Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O – 0,54-1,31, в среднем – 0,80) и высокоглиноземистому ряду (в малых интрузиях al' – 0,76-4,78, в среднем – 2,86; в дайках al' – 1,13-4,43, в среднем – 2,41) магматических пород.

Значения коэффициентов агапитности сиенитоидов малых интрузий ( $Ka = 0,23-0,45$ , в среднем –  $0,35$ ) совпадают с аналогичными коэффициентами сиенитоидных даек ( $Ka = 0,26-0,61$ , в среднем –  $0,45$ ). Похожую картину можно увидеть при сопоставлении их значений коэффициента фемичности (в малых интрузиях  $f^* = 1,90-16,82$ ; в среднем  $9,00$ ; в дайках  $f^* = 3,00-15,27$ ; в среднем –  $8,77$ ).

На дискриминационной диаграмме AFM (рис.6, а,б), предложенной Куно и др. [14], можно различить толеитовые и известково-щелочные (в том числе щелочные) серии магматических пород. Характер размещения точек пород сиенитоидов малых интрузий и даек Кумбель-Угамской зоны на этой диаграмме одинаковый, т.е. все точки попадают на известково-щелочную область.

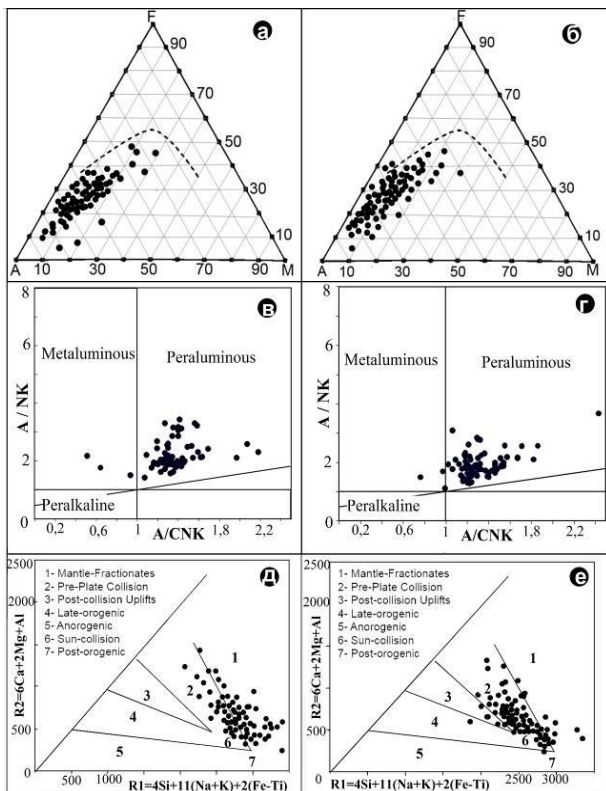


Рис. 6 – Размещение пермских малых интрузий (а, в, д) и даек сиенитоидов (б, г, е) Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов на петрохимических диаграммах

Буквы в кружках: а- и б- диаграмма AFM Х.Куно [14], для разделения толеитовых и известково-щелочных серий магматических пород, где  $A=Na_2O+K_2O$ ,  $F=FeO+Fe_2O_3 \cdot 0,9$ ,

$M=MgO$ ; в- и г- дискриминационная диаграмма  $A/NK - A/CNK$  Маниэра и Пиколи [15], где  $A=Al_2O_3$ ,  $N=Na_2O$ ,  $K=K_2O$ ,  $C=CaO$ ; д- и е- дискриминационная диаграмм  $R_1-R_2$  Бачеловор-Боудена [16].

На петрохимической диаграмме  $A/NK - A/CNK$  [15] сиенитоидные малые интрузии и дайки размещаются в поле высокоглиноземистых пород (рис. 6, в,г).

Размещение точек пермских малых интрузий и даек сиенитоидов на петрогенетической дискриминационной диаграмме  $R_1-R_2$  Бачеловор-Боудена [16] указывает на петрогенезис их, который свойственен частично для послеколлизионного, в большинстве случаев внутриплитного развития складчатых областей (рис. 6, д-е).

### 3. Главные минералы-концентраторы и минералы-носители рудных элементов

Для выявления главных минералов-концентраторов благородных и редких металлов в породах внутриплитной сиенитоидной ассоциации Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов с помощью электронного микроанализатора «Jeol-8800Rh» исследованы формы нахождения и состав около 60 разновидностей акцессорно-рудных минералов и рудоносных флюидных включений (таблицы 3-13).

**Самородные металлы и металлические сплавы.** В граносиенитах Бешкульского штока были определены металлические сплавы, имеющие алюминий-никелевые и медь-цинковые составы (табл. 3). Микровключения самородного молибдена с незначительными примесями вольфрама (0,47%), рения (0,32%), осмия (1,23%) и серы (0,49%) нами были выявлены в дайках граносиенит-аплитов того же интрузива. В кварце граносиенитов Бешкуля выявлено самородное золото, в составе которого присутствуют примеси платиноидов (3,60 %), меди (0,49 %), молибдена (0,50) и ниобия (0,99 %).

Из акцессорных минералов во внутриплитных сиенитоидах Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов самыми распространенными являются **оксиды железа и титана.**

Таблица 3

Результаты микрозондового исследования металлических сплавов граносиенитов  
Бешкульского массива, %

| № про-бы                   | n | Si   | Al    | Fe   | Ni    | V | Cr   | Cu    | Zn    | Mo    | Pt   | Ag | Au    | S    |
|----------------------------|---|------|-------|------|-------|---|------|-------|-------|-------|------|----|-------|------|
| <b>Самородный молибден</b> |   |      |       |      |       |   |      |       |       |       |      |    |       |      |
| 09-M22                     | 2 | 3,02 | 0     | 0,71 | 0     | 0 | 0,68 | 0     | 0     | 93,09 | 0    | 0  | 0     | 0,49 |
| <b>Al-Ni-вый сплав</b>     |   |      |       |      |       |   |      |       |       |       |      |    |       |      |
| 09-M22                     | 1 | 4,39 | 41,86 | 0,21 | 53,54 | 0 | 0    | 0     | 0     | 0     | 0    | 0  | 0     | 0    |
| <b>Cu-Zn-вый сплав</b>     |   |      |       |      |       |   |      |       |       |       |      |    |       |      |
| 09-M24                     | 1 | 0,32 | 0,54  | 0,24 | 0     | 0 | 0    | 61,61 | 37,03 | 0     | 0    | 0  | 0     | 0,26 |
| <b>Самородное золото</b>   |   |      |       |      |       |   |      |       |       |       |      |    |       |      |
| 09-M24                     | 2 | 0,20 | 0     | 0,46 | 0     | 0 | 0    | 0,49  | 0     | 0,50  | 3,60 | 0  | 93,76 | 0    |

Примечание: Кроме вышеприведенных элементов в сплавах присутствуют следующие примеси (в %): в самородном молибдене W -0,47, Re - 0,32, Os - 1,23; в самородном золоте Nb - 0,99; в Pb-V-Pt - вом сплаве Tl - 1,19.

**Магнетит и титаномагнетит** встречаются во всех разновидностях сиенитоидов (табл. 4). Их мелкие кристаллы, скопления в матрице пород сиенитовых даек, кварцевых сиенит-порфирах и порфировидных грано-

сиенитах малых интрузий наблюдаются в межзерновых пространствах породообразующих минералов (рис. 7), чаще ассоциируя с апатитом.

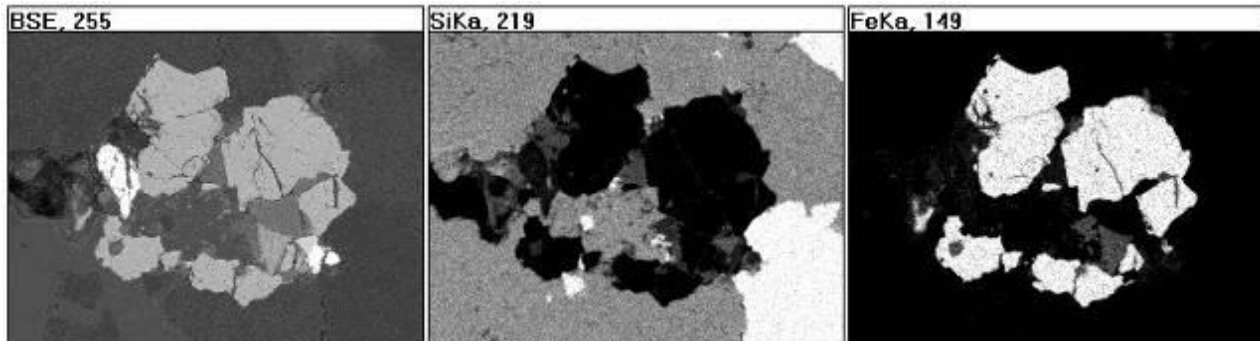


Рис. 7. Растровый снимок скоплений кристаллов магнетита в межзерновых пространствах породообразующих силических минералов (дайка кварцевого сиенит-порфира, левый приток р. Каттаакар, Ерташская площадь). Ув. 300<sup>X</sup>

Магнетиты даек сиенитоидов являются носителями золота, серебра, платиноидов. Это подтверждается определением их примесей в составе магнетитов этих пород. Например, в магнетитах дайки трахита Актепинского рудного поля установлены (в %): Rh - 0,04; Pd - 0,16; Pt - 0,54; в магнетитах даек сиенит-порфиров и сферолитовых трахитов Чадакского рудного поля определены примеси (в %): Au - 0,0n-0,36; Ag<sub>2</sub>O - 0,0n-

0,12; Ru<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -0,0n-0,27; Rh<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 0,0n-0,58; Pd -0,0n-0,28.

**Ильменит и манганильменит** относительно меньше встречаются в сиенитоидах малых интрузий и даек, чаще образуются титанит или рутил (лейкоксен). Ильменит и манганильменит почти всегда являются носителями ниобия, но наибольшее содержание его определено в манганильмените (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 0,65 %; Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 0,24 %).

Таблица 4

Результаты микронзондового исследования магнетита, титаномагнетита, ильменита, манганильменита, гематита, рутила и титанита пород внутриплитной сиенитоидной ассоциации Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов, %

| Номера проб                     | n | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO*  | MnO   | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CoO  | NiO  | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | MgO  | CaO   | Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | CuO  | ZnO  | Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Сумма  |
|---------------------------------|---|------------------|------------------|--------------------------------|-------|-------|--------------------------------|------|------|-------------------------------|------|-------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------------------|--------|
| <b>Магнетит</b>                 |   |                  |                  |                                |       |       |                                |      |      |                               |      |       |                                |                                |      |      |                               |        |
| 49-M07                          | 1 | 0,55             | 0,53             | 0,16                           | 84,45 | 0,36  | 2,12                           | 0    | 0    | 0,14                          | 0    | 0     | 0                              | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 88,31  |
| 09-M24                          | 4 | 6,39             | 0                | 2,59                           | 85,19 | 0     | 0,13                           | 0    | 0    | 0                             | 0    | 0,31  | 0                              | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 94,61  |
| 09-M22                          | 8 | 1,43             | 0,99             | 0,51                           | 82,50 | 0,46  | 0                              | 0    | 0    | 0,19                          | 0    | 0,15  | 0                              | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 86,23  |
| AK-05                           | 3 | 1,59             | 0,40             | 0,15                           | 96,86 | 0,29  | 0                              | 0,04 | 0,06 | 0,46                          | 0    | 0,17  | 0                              | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 100,02 |
| AK-17                           | 1 | 5,75             | 0,52             | 3,07                           | 89,91 | 0,03  | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 0    | 0     | 0                              | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 99,25  |
| AK-26                           | 2 | 0,39             | 2,05             | 0                              | 95,32 | 0,27  | 0                              | 0    | 0,25 | 0                             | 0    | 0,35  | 0                              | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 98,63  |
| AK-31                           | 8 | 2,11             | 4,46             | 0,34                           | 88,32 | 0,87  | 0                              | 0,01 | 0,25 | 0,19                          | 0    | 1,09  | 0                              | 0                              | 0    | 1,50 | 0                             | 99,14  |
| Ч-14/14                         | 5 | 0,74             | 0,01             | 0,31                           | 98,15 | 0,04  | 0                              | 0,16 | 0,04 | 0,15                          | 0    | 0     | 0                              | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 99,60  |
| Ч-19/14                         | 1 | 0,93             | 0                | 0,29                           | 98,53 | 0,07  | 0                              | 0    | 0    | 0,03                          | 0    | 0,11  | 0                              | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 99,96  |
| Ч-23/14                         | 4 | 2,84             | 0,21             | 0                              | 94,37 | 0,10  | 0                              | 0    | 0    | 0,10                          | 0    | 0,34  | 0                              | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 97,69  |
| Ч-29/14                         | 6 | 1,19             | 0,06             | 0,07                           | 97,38 | 0,06  | 0                              | 0,06 | 0,12 | 0,03                          | 0    | 0,29  | 0                              | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 99,26  |
| ЧВ-1/14                         | 3 | 2,70             | 0,03             | 0                              | 96,19 | 0     | 0                              | 0    | 0,15 | 0,02                          | 0    | 0     | 0                              | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 99,09  |
| <b>Титаномагнетит</b>           |   |                  |                  |                                |       |       |                                |      |      |                               |      |       |                                |                                |      |      |                               |        |
| 49-M07                          | 4 | 0,39             | 11,92            | 0,12                           | 73,54 | 0     | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 0    | 0     | 0                              | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 85,97  |
| AK-03                           | 3 | 0,79             | 13,53            | 0,09                           | 78,25 | 0,06  | 0                              | 0,02 | 0    | 0,57                          | 0,15 | 0,19  | 0                              | 0                              | 0    | 1,56 | 4,25                          | 99,46  |
| AK-31                           | 3 | 1,70             | 20,50            | 1,21                           | 72,72 | 0,76  | 0                              | 0    | 0,21 | 0,60                          | 0    | 0,63  | 0                              | 0                              | 0,02 | 1,44 | 0                             | 99,79  |
| Ч-19/14                         | 4 | 31,01            | 30,19            | 5,70                           | 1,19  | 0,08  | 0                              | 0    | 0    | 0,45                          | 0,91 | 27,53 | 0,57                           | 0,20                           | 0    | 0    | 0                             | 97,83  |
| <b>Ильменит, манганильменит</b> |   |                  |                  |                                |       |       |                                |      |      |                               |      |       |                                |                                |      |      |                               |        |
| 49-M07                          | 6 | 0,07             | 53,32            | 0,02                           | 30,38 | 13,56 | 0                              | 0    | 0    | 0,53                          | 0    | 0     | 0,65                           | 0,24                           | 0    | 0    | 0                             | 98,77  |
| 09-M22                          | 2 | 0,47             | 54,16            | 0,11                           | 39,13 | 0,50  | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 0    | 3,34  | 0,07                           | 0                              | 0    | 0,59 | 0                             | 98,39  |
| AK-03                           | 1 | 0,76             | 56,25            | 0                              | 39,70 | 0,43  | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 0    | 0,96  | 0,59                           | 0,10                           | 0    | 0    | 0                             | 100,01 |
| AK-05                           | 5 | 0,33             | 46,27            | 0,15                           | 50,11 | 2,55  | 0                              | 0    | 0    | 0,18                          | 0    | 0,34  | 0,06                           | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 99,99  |
| AK-26                           | 2 | 0,20             | 47,27            | 0,01                           | 48,20 | 2,25  | 0                              | 0    | 0    | 1,28                          | 0    | 0,22  | 0                              | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 99,43  |



Окончание табл. 4

| Номера проб                | n | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO*  | MnO   | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CoO  | NiO  | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | MgO  | CaO   | Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | CuO  | ZnO  | Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Сумма  |  |
|----------------------------|---|------------------|------------------|--------------------------------|-------|-------|--------------------------------|------|------|-------------------------------|------|-------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------------------|--------|--|
| Ч-14/14                    | 2 | 3,69             | 48,17            | 0,38                           | 28,25 | 14,18 | 0                              | 0,07 | 0,08 | 0,76                          | 0,29 | 4,04  | 0                              | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 99,91  |  |
|                            | 2 | 0,63             | 49,85            | 0,13                           | 40,21 | 7,49  | 0                              | 0    | 0    | 0,73                          | 0,06 | 0,92  | 0                              | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 100,02 |  |
| Ч-29/14                    | 1 | 1,67             | 56,41            | 0,77                           | 23,45 | 0,55  | 0                              | 0    | 0    | 1,28                          | 0    | 2,24  | 0,14                           | 0                              | 0    | 1,46 | 0                             | 87,97  |  |
|                            | 1 | 0,31             | 57,67            | 0,46                           | 38,75 | 0,75  | 0                              | 0    | 0    | 0,83                          | 0    | 0,54  | 0,13                           | 0                              | 0    | 0,20 | 0                             | 99,94  |  |
| <b>Гематит</b>             |   |                  |                  |                                |       |       |                                |      |      |                               |      |       |                                |                                |      |      |                               |        |  |
| АК-22                      | 4 | 11,26            | 0,22             | 0,68                           | 73,91 | 0     | 0                              | 0,02 | 0    | 0,08                          | 0,43 | 1,03  | 0                              | 0                              | 0,43 | 0    | 0                             | 88,39  |  |
| <b>Рутил, ильменорутил</b> |   |                  |                  |                                |       |       |                                |      |      |                               |      |       |                                |                                |      |      |                               |        |  |
| 09-M24                     | 6 | 0,65             | 87,31            | 0,10                           | 2,56  | 0,01  | 0                              | 0    | 0    | 0,82                          | 0    | 0,34  | 5,76                           | 0,21                           | 0    | 0    | 0                             | 97,89  |  |
|                            | 1 | 0,68             | 94,90            | 0                              | 1,62  | 0,01  | 0                              | 0    | 0    | 0,62                          | 0    | 1,09  | 0,66                           | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 99,58  |  |
| АК-17                      | 6 | 0,72             | 91,75            | 0                              | 1,71  | 0,02  | 0                              | 0    | 0    | 2,36                          | 0    | 0,12  | 3,06                           | 0,03                           | 0    | 0    | 0                             | 99,77  |  |
| АК-22                      | 2 | 1,08             | 85,27            | 0                              | 1,39  | 0,25  | 0                              | 0    | 0    | 1,83                          | 0    | 0,12  | 1,99                           | 0,11                           | 0    | 0    | 7,74                          | 99,28  |  |
| АК-31                      | 2 | 0,36             | 97,22            | 0                              | 1,10  | 0,01  | 0                              | 0    | 0,04 | 0,95                          | 0    | 0,14  | 0,14                           | 0,08                           | 0    | 0,12 | 0                             | 100,16 |  |
| Ч-23/14                    | 1 | 0,63             | 83,01            | 0,06                           | 14,32 | 0,11  | 0                              | 0    | 0    | 0,53                          | 0    | 0,15  | 0                              | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 98,81  |  |
|                            | 2 | 1,15             | 91,60            | 0,31                           | 2,74  | 0,05  | 0                              | 0    | 0    | 0,47                          | 0    | 0,46  | 0                              | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 96,78  |  |
| ЧВ-1/14                    | 3 | 0,56             | 95,23            | 0,10                           | 1,67  | 0,10  | 0                              | 0    | 0    | 1,39                          | 0    | 0,22  | 0,72                           | 0,05                           | 0    | 0    | 0                             | 100,04 |  |
| <b>Титанит</b>             |   |                  |                  |                                |       |       |                                |      |      |                               |      |       |                                |                                |      |      |                               |        |  |
| 09-M22                     | 8 | 30,08            | 30,01            | 4,11                           | 2,82  | 0,04  | 0                              | 0    | 0    | 0,28                          | 0    | 26,64 | 0,58                           | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 94,56  |  |
| АК-05                      | 1 | 29,91            | 37,49            | 2,38                           | 0,40  | 0,03  | 0                              | 0    | 0    | 0,16                          | 0    | 29,64 | 0                              | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 100,01 |  |
| АК-31                      | 4 | 21,20            | 20,64            | 4,37                           | 35,80 | 0,18  | 0                              | 0    | 0,03 | 0,53                          | 0    | 16,89 | 0                              | 0                              | 0    | 0,39 | 0                             | 100,03 |  |
|                            | 3 | 32,28            | 29,91            | 6,53                           | 1,56  | 0,03  | 0                              | 0    | 0,04 | 0,66                          | 0    | 28,79 | 0                              | 0                              | 0    | 0,15 | 0                             | 99,95  |  |
| Ч-14/14                    | 4 | 30,37            | 37,03            | 2,19                           | 0,98  | 0,10  | 0                              | 0,04 | 0,04 | 0,71                          | 0,22 | 28,34 | 0                              | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 100,02 |  |
| Ч-29/14                    | 2 | 30,61            | 32,69            | 4,20                           | 2,14  | 0,21  | 0                              | 0    | 0    | 0,68                          | 0,45 | 28,13 | 0,66                           | 0                              | 0    | 0    | 0                             | 99,77  |  |

Примечание: рутилы граносиенита Актепинского массива (АК-17) содержат Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 1,70 % (ср. из 3-х анализов 0,28 %); в магнетитах дайки трахита Актепинского рудного поля (проба №АК-26) установлены (в %): Rh – 0,04; Pd – 0,16; Pt – 0,54; в магнетитах даек кварцсодержащего сиенит-порфира (пробы №Ч-14/14 и №Ч-19/14), кварцевого сиенит-порфира (Ч-29/14), ортоклазового сиенит-порфира (проба №Ч-23/14) и сферолитового трахита (проба №ЧВ-1/14) Чадакского рудного поля определены примеси (в %): Au – 0,11; 0,14; 0,36; 0,04; 0,01; Ag<sub>2</sub>O – 0,00; 0,12; 0,07; 0,01; 0,05; Ru<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,03; 0,00; 0,04; 0,27; 0,05; Rh<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,00; 0,00; 0,02; 0,58; 0,04; Pd – 0,05; 0,00; 0,28; 0,00; 0,16; в манган-ильменитах граносиенит-порфиров (проба 09-M24, Бешкульский интрузив) P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 1,61; в гематитах кварцевых сиенитов Актепинского массива (АК-22) содержатся (в %): SO<sub>3</sub> – 2,35; 7,11; 4,73; PbO – 14,01; 0,0; 7,00; Ag<sub>2</sub>O – 0,0; 0,43; 0,22.

Ильмениты граносиенит-порфиров Бешкульского интрузива, дайки кварцевого сиенит-порфира Чадакского поля содержат примеси цинка (соответственно,  $ZnO - 0,59\%$  и  $0,83\%$ ).

**Рутил** во всех разновидностях сиенитоидов малых интрузий и даек является ниобий-содержащим (рис. 8, табл. 5).

В ниобийстых рутилах граносиенит-аплита Бешкульского штока определены примеси окислов вольфрама ( $WO_3 - 0,55\%$ ) и скандия ( $Sc_2O_3 - 0,41\%$ ).

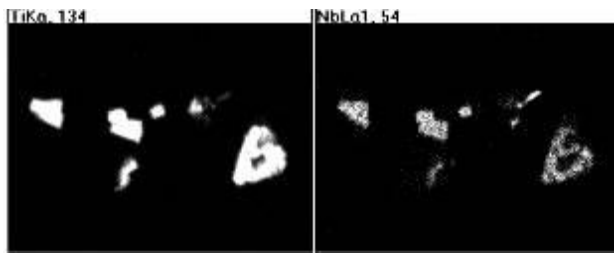


Рис. 8. Растровый снимок формы выделений ниобийского рутила в граносиенитах Бешкульского штока. Аншлиф №09-М24. Ув.  $60\times$

**Гематит** характеризуется неравномерным распределением в сиенитоидах. Он встречается в виде мелких вкрапленников в купольных и апикальных частях сиенитоидных тел, образуя неправильные кристалльные формы в стенках микропор полевых шпатов, формирование которых связано с дефлюидизацией постмагматического расплава сиенитоидов и циркуляцией рудогенерирующих кремнщелочных флюидов (рис. 9).

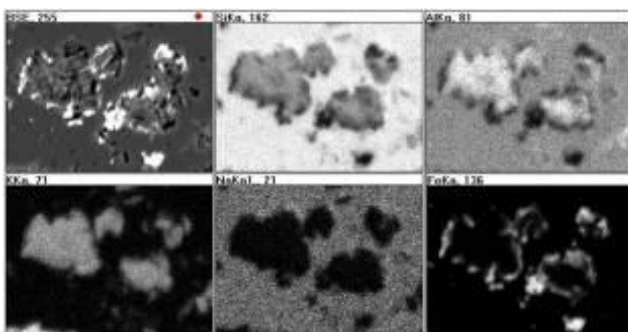


Рис. 9. Растровый снимок микропор альбита, стенки которых сложены гематитом, внутренние части заполнены серицитовым агрегатом. Аншлиф № 09-М24, граносиенит Бешкульского штока. Ув.  $150\times$

Гематиты микропор в граносиенитах Бешкульского интрузива содержат (в %):  $AuO - 0,21$ ;  $Ag_2O - 0,10$ ;  $Ru_2O_3 - 0,05$ ;  $Rh_2O_3 - 0,18$ . Гематит наблюдается также в составе кварц-гематит-хлоритовых прожилков в сиенитах и граносиенитах по системе трещин. Состав прожилков изменяется от кварцево-гематитовых, карбонатно-гематитовых до моноклоритовых и кварц-хлоритовых.

**Свинцовый бисмит** установлен в граносиенитах Бешкульского штока. Единичные микровключения его встречаются в кварце и ортоклаз-пертите (рис. 10, табл. 5), в виде порошковатых, землистых агрегатов. Образуется за счет окисления висмутсодержащих сульфидных минералов, на что указывает присутствие в его составе серы ( $SO_3 - 2,79$ ). Он образует минералогический парагенезис со **свинцовым суриком и молибдитом**, которые являются вторичными минералами, развивающимися за счет окисления сульфидных минералов в близповерхностных условиях. В составе молибдита установлены примеси серы ( $SO_3 - 3,12\%$ ), осмия ( $Os - 1,28\%$ ) и рения ( $0,16\%$ ). Свинцовому сурику, выявленному в граносиенитах Бешкульского штока характерны примеси хрома и фтора ( $Cr_2O_3 - 3,43\%$ ;  $F - 7,50\%$ ).

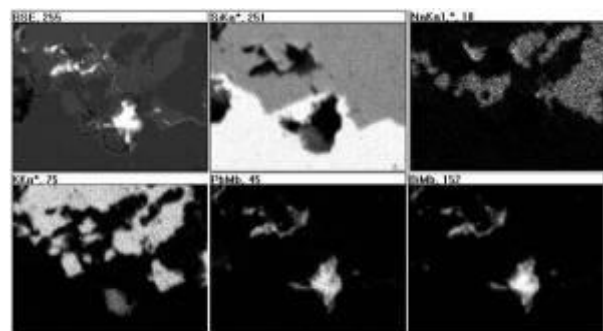


Рис. 10. Растровые снимки формы выделения микровключений свинцового бисмита в кварце и ортоклаз-пертите. Аншлиф №09-М24, граносиенит Бешкульского штока. Ув.  $125\times$

**Циркон** среди аксессуаров пород сиенитоидных малых интрузий и даек Кумбель-Угамской зоны разломов является более распространенным силикатом-концентратором редких элементов (циркония и гафния), но содержание его в них неравномерно. Отно-

сительного часто встречаются дипирамидальные, ромбо-октаэдрические кристаллики циркона, имеющие изометричные, почти овально-округлые очертания в кварцевых

сиенитах чильтенского копмплекса Цирконы малых интрузий и даек сиенитодов региона по значению Zr/Hf, набору элементов-примесей идентичны (табл. 6).

Таблица 5

Результаты микрозондового исследования свинцового бисмита и свинцового сурика, молибдита и свинцового касситерита дайки граносиенит-аплита (Бешкульский интрузив), %

| n                           | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO* | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | CuO  | PbO   | MoO <sub>3</sub> | SnO <sub>2</sub> | Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> | F    | Сумма  |
|-----------------------------|------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|------|------|-------|------------------|------------------|--------------------------------|-----------------|------|--------|
| <b>Свинцовый бисмит</b>     |                  |                                |      |                                |      |      |       |                  |                  |                                |                 |      |        |
| 2                           | 1,53             | 0,44                           | 0,48 | 0,36                           | 5,19 | 0    | 19,71 | 0                | 0                | 68,28                          | 2,62            | 0    | 97,21  |
| <b>Свинцовый сурик</b>      |                  |                                |      |                                |      |      |       |                  |                  |                                |                 |      |        |
| 1                           | 2,57             | 0                              | 0    | 3,43                           | 0    | 0    | 82,11 | 0                | 3,69             | 0                              | 0               | 7,50 | 99,30  |
| <b>Молибдит</b>             |                  |                                |      |                                |      |      |       |                  |                  |                                |                 |      |        |
| 2                           | 0,72             | 0                              | 0,37 | 0                              | 0    | 0    | 94,36 | 0                | 0                | 3,12                           | 0               | 0    | 100,01 |
| <b>Свинцовый касситерит</b> |                  |                                |      |                                |      |      |       |                  |                  |                                |                 |      |        |
| 2                           | 0,52             | 0                              | 0    | 0                              | 0    | 0,39 | 23,58 | 0                | 75,51            | 0                              | 0               | 0    | 100,00 |

Примечание: в молибдите содержатся примеси рения (Re- 0,16 %) и осмия (Os-1,28 %).

Таблица 6

Результаты микрозондового исследования циркона пород внутриплитной сиенитоидной ассоциации Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов, %

| Номера проб | n | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO* | MnO  | CaO  | ZrO <sub>2</sub> | HfO <sub>2</sub> | TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ThO <sub>2</sub> | UO <sub>2</sub> | Сумма  |
|-------------|---|------------------|--------------------------------|------|------|------|------------------|------------------|--------------------------------|------------------|-----------------|--------|
| 49-M07      | 2 | 30,75            | 1,53                           | 4,49 | 0,16 | 0,56 | 55,35            | 2,16             | 0                              | 0                | 0               | 95,35  |
|             | 3 | 32,81            | 0                              | 0,47 | 0    | 0    | 65,63            | 1,64             | 0                              | 0                | 0               | 100,55 |
| 09-M22      | 7 | 31,66            | 0,76                           | 0,51 | 0    | 0,13 | 60,15            | 4,61             | 0,03                           | 0,20             | 0,28            | 98,33  |
| AK-17       | 7 | 32,76            | 0                              | 0,95 | 0    | 0    | 65,39            | 0,15             | 0,13                           | 0,03             | 0,11            | 95,52  |
| AK-22       | 5 | 33,52            | 0                              | 0,22 | 0    | 0    | 66,27            | 0,17             |                                | 0,01             | 0               | 100,19 |
| AK-26       | 2 | 32,95            | 0                              | 0,56 | 0    | 0    | 65,10            | 0,62             | 0,08                           | 0,23             | 0,54            | 100,08 |
| Ч-23/14     | 1 | 30,88            | 0                              | 1,97 | 0,03 | 1,04 | 61,96            | 2,45             | 0                              | 0                | 0               | 98,33  |
| Ч-29/14     | 1 | 32,96            | 0,60                           | 0,52 | 0,01 | 0    | 64,30            | 1,60             | 0                              | 0                | 0               | 99,99  |

Следующие главные концентраторы-силикаты редких и редкоземельных элементов в продуктах внутриплитного сиенитоидного магматизма региона представлены **сложными силикатами – ортитами и чевкинитами**. Они обнаружены в дайках кварцсодержащих сиенит-порфиров Чадакского рудного поля, кварцевых сиенитов Ерташской площади, граносиенит-порфирах Бешкульского интрузива, размещенных в пределах Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов (табл. 7). Микрозондовыми исследованиями в ортитах граносиенит-порфира Бешкульского тела выявлено при-

сутствие фтора (0,7- 3,30 %), в ортитах дайки кварцсодержащего сиенит-порфира (проба № Ч-19/14) установлены (в %): F – 1,75; Au – 0,09; Ag<sub>2</sub>O – 0,08, а в чевкинитах кварцевых сиенит-порфиров Ерташской площади V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0,41 %; Na<sub>2</sub>O – 1,50 %; PbO – 0,71 %; WO<sub>3</sub> – 1,70 %; Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 8,32 %; Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 2,05 %; в чевкините граносиенит-аплита Бешкульского интрузива Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 1,46 %.

Таблица 7

Результаты микрозондового исследования сложных силикатов редких земель пород внутриплитной сиенитоидной ассоциации Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов, %

| Номера проб     | n  | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO*  | MnO  | CaO   | La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> * | Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> * | TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | UO <sub>2</sub> | Сумма |
|-----------------|----|------------------|------------------|--------------------------------|-------|------|-------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------------|-------|
| <b>Ортит</b>    |    |                  |                  |                                |       |      |       |                                  |                                  |                                |                 |       |
| 49-M07          | 1з | 29,74            | 0                | 13,09                          | 17,11 | 0,67 | 10,27 | 25,75                            | 3,32                             | 29,07                          | 0               | 99,95 |
|                 | 2з | 29,32            | 0                | 16,35                          | 13,27 | 0,66 | 9,14  | 28,58                            | 2,49                             | 31,07                          | 0               | 100,0 |
|                 | 3з | 31,88            | 0                | 17,33                          | 11,90 | 0,56 | 9,70  | 24,48                            | 2,10                             | 26,58                          | 0               | 97,95 |
|                 | 9  | 30,76            | 0,11             | 16,10                          | 16,93 | 0,60 | 10,63 | 23,72                            | 2,91                             | 26,63                          | 0               | 101,8 |
| 09-M24          | 2  | 29,14            | 0                | 12,23                          | 18,20 | 0,33 | 9,60  | 24,33                            | 0                                | 24,33                          | 0               | 93,29 |
| 09-M22          | 6  | 30,23            | 1,36             | 12,94                          | 15,61 | 1,06 | 9,88  | 23,79                            | 0                                | 23,79                          | 0,35            | 95,22 |
|                 | 3  | 31,37            | 0,43             | 17,51                          | 12,92 | 2,28 | 10,29 | 21,94                            | 0                                | 21,94                          | 0               | 96,74 |
|                 | 9  | 30,61            | 1,04             | 14,46                          | 14,72 | 1,47 | 10,02 | 23,17                            | 0                                | 23,17                          | 0,22            | 95,78 |
| Ч-19/14         | 4  | 31,02            | 0,45             | 15,30                          | 15,17 | 0,39 | 10,93 | 22,84                            | 1,16                             | 24,00                          | 0,05            | 97,31 |
| <b>Чевкинит</b> |    |                  |                  |                                |       |      |       |                                  |                                  |                                |                 |       |
| 09-M24          | 2  | 27,32            | 13,25            | 0,36                           | 10,14 | 0,40 | 1,93  | 39,60                            | 0                                | 39,60                          | 4,32            | 97,32 |

Примечание: 1з, 2з, 3з – соответствующие зоны зонального кристалла ортита; в ортитах граносиенит-порфира Бешкульского тела (проба № 09-M22) присутствует фтор (соответственно в %: 0,7; 3,30; 1,40); в чевкинитах граносиенит-аплита (проба № 09-M24, Бешкуль) Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 1,46 %; в ортитах дайки кварцсодержащего сиенит-порфира (проба № Ч19/14) установлены (в %): F – 1,75; Au – 0,09; Ag<sub>2</sub>O – 0,08.

В табл. 8 приведены результаты микрозондовых анализов *оксидов и гидрооксидов ниобия, редких земель, тория и урана* внутриплитных сиенитоидов Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов. Минералы представ-

лены ризёритом, иттрокразитом, герасимовскитом, которые относительно чаще встречаются в сиенитоидах Ерташского рудного поля, чем в других проявлениях сиенитоидного магматизма.

Таблица 8

Результаты микрозондового исследования сложных оксидов и гидрооксидов ниобия, редких земель, тория и урана дайках кварцевых сиенитов Ерташского и Чадакского рудных полей, %

| Номера проб                | n | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO*  | MgO  | CaO  | WO <sub>3</sub> | Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ThO   | UO <sub>2</sub> | Сумма  |
|----------------------------|---|------------------|------------------|--------------------------------|-------|------|------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-----------------|--------|
| <b>Титанистый колумбит</b> |   |                  |                  |                                |       |      |      |                 |                                |                                |                                |       |                 |        |
| Ч-23/14                    | 1 | 2,52             | 44,05            | 0,55                           | 12,80 | 0    | 2,65 | 0               | 22,78                          | 2,54                           | 0                              | 10,83 | 1,38            | 100,10 |
| <b>Ризёрит</b>             |   |                  |                  |                                |       |      |      |                 |                                |                                |                                |       |                 |        |
| 49-M07                     | 3 | 0                | 1,61             | 1,38                           | 4,33  | 0    | 0,11 | 1,54            | 39,83                          | 0,71                           | 13,10                          | 0     | 0               | 62,14  |
| <b>Иттрокразит</b>         |   |                  |                  |                                |       |      |      |                 |                                |                                |                                |       |                 |        |
| 49-M07                     | 2 | 1,88             | 45,02            | 0                              | 3,83  | 1,92 | 0,75 | 0               | 1,05                           | 0                              | 15,66                          | 0     | 1,40            | 71,80  |
| <b>Герасимовскит</b>       |   |                  |                  |                                |       |      |      |                 |                                |                                |                                |       |                 |        |
| 49-M07                     | 2 | 3,04             | 26,79            | 0                              | 5,42  | 0    | 0,60 | 0               | 19,87                          | 0,96                           | 5,10                           | 0     | 0,68            | 62,48  |

Примечание: TR – редкие элементы; ризёрит и иттрокразит даек кварцевых порфиров Ерташской площади (49-M-07) содержат примесь (в %) ZrO<sub>2</sub> – 0,55 и 0,11 соответственно.

Среди минералов-носителей и минералов-концентраторов редких и редкоземельных элементов в сиенитоидах особое место зани-

мают фосфорсодержащие минералы и собственно фосфаты (табл. 9).

Таблица 9

Результаты микронзондового исследования фосфорсодержащих и собственно фосфатных минералов пород внутриплитной сиенитоидной ассоциации Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов, %

| Номера проб   | n | SiO <sub>2</sub> | FeO* | MgO  | CaO   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Cl   | F     | Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ThO <sub>2</sub> | Сумма  |
|---|---|------------------|------|------|-------|-------------------------------|------|-------|-------------------------------|--------------------------------|------------------|--------|
| <b>Апатит</b>   |   |                  |      |      |       |                               |      |       |                               |                                |                  |        |
| 49-M07  | 1 | 0                | 0,85 | 0    | 54,96 | 42,25                         | 0    | 0     | 0                             | 2,84                           | 0                | 100,90 |
|   | 3 | 0,61             | 0,39 | 0,07 | 53,57 | 40,18                         | 0,01 | 0     | 0,11                          | 5,00                           | 0                | 99,94  |
|   | 1 | 5,70             | 1,90 | 0    | 40,33 | 30,33                         | 0    | 0     | 0,22                          | 6,43                           | 12,27            | 97,18  |
| 09-M22  | 4 | 0,72             | 0,47 | 0    | 53,25 | 40,78                         | 0    | 0     | 0                             | 4,54                           | 0                | 99,76  |
|   | 1 | 0,24             | 1,05 | 0    | 53,76 | 41,13                         | 0    | 0     | 0                             | 3,30                           | 0                | 99,48  |
|   | 2 | 0                | 0,34 | 0    | 52,37 | 38,11                         | 0    | 0     | 0                             | 0,69                           | 0                | 91,51  |
|   | 4 | 0,24             | 0,41 | 0    | 51,64 | 37,46                         | 0    | 0     | 0                             | 2,84                           | 0                | 92,59  |
| AK-05   | 3 | 0,20             | 0,51 | 0    | 54,93 | 40,97                         | 1,76 | 0     | 0                             | 1,69                           | 0                | 100,06 |
| AK-17   | 3 | 0                | 0,33 | 0    | 52,41 | 42,81                         | 0,24 | 0     | 1,26                          | 2,84                           | 0                | 99,89  |
| AK-26   | 4 | 0                | 0,26 | 0    | 52,28 | 42,39                         | 1,21 | 0     | 0,34                          | 3,57                           | 0                | 100,04 |
| Ч-14/14   | 3 | 0,38             | 0,27 | 0,03 | 50,02 | 41,09                         | 0,40 | 0     | 0                             | 1,76                           | 0,03             | 93,98  |
| <b>Фтороапатит</b>                                      |   |                  |      |      |       |                               |      |       |                               |                                |                  |        |
| Ч-19/14   | 1 | 0,43             | 0,62 | 0    | 43,79 | 34,90                         | 0    | 18,95 | 1,33                          | 0                              | 0                | 100,02 |
| Ч-23/14   | 3 | 0,57             | 0,22 | 0    | 40,18 | 33,35                         | 0    | 25,25 | 0                             | 0,46                           | 0                | 100,03 |
| Ч-29/14   | 3 | 0,96             | 0,32 | 0    | 40,47 | 32,26                         | 0    | 23,47 | 0                             | 2,60                           | 0                | 100,08 |
| ЧВ-1/14   | 1 | 9,75             | 1,20 | 0    | 35,43 | 30,38                         | 0,04 | 21,26 | 0                             | 0,87                           | 0                | 98,93  |
| <b>Монацит</b>  |   |                  |      |      |       |                               |      |       |                               |                                |                  |        |
| 09-M24  | 2 | 0,69             | 0,17 | 0    | 0,14  | 26,82                         | 0,15 | 0     | 0                             | 69,18                          | 3,23             | 100,38 |
| AK-22   | 2 | 0                | 0    | 0    | 0,29  | 26,90                         | 0    | 0     | 0                             | 64,95                          | 0                | 98,60  |
| <b>Бритоцит</b>   |   |                  |      |      |       |                               |      |       |                               |                                |                  |        |
| 09-M22  | 1 | 33,26            | 1,68 | 0    | 0,72  | 17,46                         | 0    | 0     | 0                             | 37,58                          | 9,49             | 100,19 |
| <b>Рабдофанит и его высококарбонатная разновидность</b> |   |                  |      |      |       |                               |      |       |                               |                                |                  |        |
| 49-M07  | 4 | 0                | 1,28 | 0    | 0,22  | 43,90                         | 0,02 | 0     | 3,43                          | 14,15                          | 0                | 63,00  |
|   | 1 | 0                | 1,31 | 0    | 0     | 61,60                         | 0    | 0     | 0                             | 18,70                          | 0                | 81,61  |

**Апатит.** В сиенитоидах малых интрузий они распространены сравнительно слабее, чем в дайках сиенитоидов, несмотря на то, что они самые обычные и наиболее часто встречающиеся акцессорные минералы магматитов. В сиенитоидных малых интрузиях они преимущественно являются хлорсодержащими и носителями иттрия и редких земель на ранних стадиях кристаллизации фосфатов до появления сложных фторфосфатов редких земель и титана.

**Монацит** очень типичный акцессорный минерал для сиенитоидов малых порфировых

интрузий и ассоциирующих с ним даек. Он и приведенные в таблице 10 сложные *редкоземельные фторфосфаты иттрия, титана и циркония*, характерны для кварцевых сиенитов и граносиенитов, т.е. более поздним дифференциатам сиенитоидного расплава, бедных кальцием с низким содержанием пятиоксида фосфора и повышенными содержаниями фтора, суммы редких земель, что, обычно, приводит к выделению монацита и фторфосфата вместо апатита. Наряду с этими редкоземельными минералами фосфатов магматического генезиса встречаются агрегаты мелких зерен

монацита вместе с рабдофанитом др., в метасоматитах и кварц-гематит-хлоритовых жилах.

**Бритолит.** Этот водный фосфорсодержащий редкоземельный силикат, также, как и предыдущие минералы, характерен для сиенитоидов, в частности, Бешкульского штока граносиенитов. Он кристаллизовался одним из первых и сингенетичен с цирконом. Размер кристаллов <0,05 мм. Меньшие по размерам кристаллы сильно разрушены.

**Карбонаты и фторкарбонаты** (в том числе гидрокарбонаты) являются главными

носителями и концентраторами редкоземельных элементов в породах пермских малых интрузий и даек сиенитоидов и связанных с ними метасоматитах и рудах. В этих образованиях главные носители редкоземельных элементов представлены кальцитом, фторсодержащим кальцийгидрокарбонатом, фторсодержащим манган-кальцитом, анкеритом, основные концентраторы – кальцинит и синхизит и его титанистая разновидность и лантанит (табл. 9).

Таблица 9

Результаты микронзондового исследования карбонатов и фторкарбонатов пород внутриплитной сиенитоидной ассоциации Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов, %

| Номера проб                                      | n | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO*  | MnO  | MgO   | CaO   | F     | Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ThO <sub>2</sub> | Сумма |
|--|---|------------------|------------------|--------------------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------------------------------|--------------------------------|------------------|-------|
| <b>Кальцит</b>                                   |   |                  |                  |                                |       |      |       |       |       |                               |                                |                  |       |
| 09-M24   | 3 | 0                | 0,84             | 0                              | 0,17  | 1,13 | 0,03  | 51,29 | 1,51  | 0                             | 0,84                           | 0                | 55,81 |
| ЧВ-1/14  | 1 | 0,17             | 0                | 0,09                           | 1,71  | 0    | 0     | 55,33 | 4,15  | 0                             | 1,05                           | 0                | 62,70 |
| <b>Анкерит</b>                                   |   |                  |                  |                                |       |      |       |       |       |                               |                                |                  |       |
| АК-03  | 6 | 0,12             | 0                | 0                              | 10,89 | 1,36 | 10,82 | 26,17 | 0     | 0                             | 2,73                           | 0                | 54,82 |
| АК-03  | 1 | 1,52             | 0                | 0                              | 22,87 | 1,50 | 1,05  | 52,01 | 0     | 0,35                          | 0                              | 0                | 79,30 |
| <b>Фторсодержащий манган-кальцит</b>             |   |                  |                  |                                |       |      |       |       |       |                               |                                |                  |       |
| 49-M07   | 2 | 0                | 0                | 0                              | 1,72  | 5,01 | 0,22  | 49,93 | 4,45  | 0                             | 2,30                           | 0                | 63,63 |
| <b>Кальцинит</b>                                 |   |                  |                  |                                |       |      |       |       |       |                               |                                |                  |       |
| 49-M07   | 2 | 4,22             | 0                | 1,26                           | 0,76  | 0,06 | 0     | 15,76 | 0     | 0,33                          | 52,09                          | 0                | 74,48 |
| 09-M22   | 1 | 0                | 0                | 0                              | 0     | 0    | 0     | 16,10 | 0     | 0                             | 52,99                          | 0                | 69,09 |
| ЧВ-1/14  | 1 | 17,50            | 1,71             | 1,85                           | 0     | 0    | 0     | 16,43 | 0     | 1,80                          | 39,58                          | 0                | 78,87 |
| <b>Ti-REE-фторкарбонат – титанистый синхизит</b> |   |                  |                  |                                |       |      |       |       |       |                               |                                |                  |       |
| 09-M24   | 1 | 0,36             | 12,11            | 0                              | 7,78  | 0    | 0     | 8,75  | 0     | 0                             | 34,82                          | 0                | 63,82 |
|  | 2 | 0,81             | 15,24            | 0                              | 1,85  | 0    | 0     | 11,50 | 4,68  | 0                             | 39,66                          | 0                | 73,74 |
| <b>Синхизит</b>                                  |   |                  |                  |                                |       |      |       |       |       |                               |                                |                  |       |
| 09-M22   | 2 | 6,72             | 0,11             | 0,98                           | 8,72  | 0    | 0,08  | 12,33 | 6,62  | 0                             | 34,72                          | 0,38             | 70,28 |
| АК-17  | 4 | 0,22             | 0                | 0                              | 0,09  | 0    | 0     | 14,74 | 1,33  | 0,52                          | 41,12                          | 0,85             | 58,87 |
| Ч-23/14  | 6 | 0,26             | 0,02             | 0,02                           | 0,55  | 0    | 0     | 10,23 | 7,04  | 0                             | 35,10                          | 1,19             | 54,41 |
| ЧВ-1/14  | 6 | 3,64             | 0,06             | 1,32                           | 1,65  | 0    | 0     | 17,97 | 3,43  | 1,74                          | 49,36                          | 0                | 79,17 |
| <b>Лантанит</b>                                  |   |                  |                  |                                |       |      |       |       |       |                               |                                |                  |       |
| Ч-19/14  | 2 | 0,17             | 0                | 0,04                           | 0,20  | 0    | 0     | 87,66 | 10,34 | 1,58                          | 0                              | 0                | 100,0 |
| Ч-23/14  | 2 | 0,22             | 0                | 0                              | 0,08  | 0,05 | 0,06  | 65,32 | 33,35 | 0                             | 0,88                           | 0                | 99,93 |

Примечание: в Ti-REE-карбонате граносиенит-аплита (проба № 09-M-24, Бешкуль) присутствует Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0,91%, в его фтористых разновидностях (проба № 09-M-24, Бешкуль) ZnO<sub>2</sub> – 0,59%; синхизит ортоклазового сиенит-порфира (проба № Ч23/14) содержит (в %): P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> -0,05; Ag<sub>2</sub>O – 0,06; в кальцинитах и синхизитах дайки сферолитовых трахитов (проба № ЧВ-1/14) установлены (в %): Au – 0,12; 0,20; Ag<sub>2</sub>O – 0,00; 0,21; Pd – 0,21; 0,02.

В дайках сферолитовых трахитах Чадакского рудного поля также определен фторкарбонат редкоземельных элементов – синхизит, криптокристаллы которого образуют удлиненные скопления согласно внутреннему радиально-лучитому строению сферолитов или составляют стенки микропор в них (рис. 11).

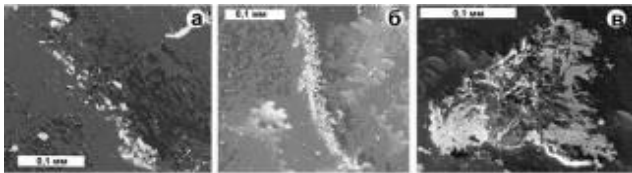


Рис.11. Растровые снимки форм находений синхизита в дайке сферолитового трахита (проба № ЧВ-1/14) Чадакского рудного поля:  
 а - и б – удлиненные скопления криптокристаллов синхизита согласно внутреннему радиально-лучистому строению сферолитов; в – синхизит (белое)-гематитовые (серое) составляющие стенки микропор

В свою очередь карбонаты и фторкарбонаты (в том числе гидрокарбонаты) являются минералами-носителями некоторых благородных и редких металлов. Например, в титанистом синхизите граносиенит-аплита (проба № 09-М-24, Бешкуль) присутствует  $Nb_2O_5$  – 0,91%, в его фтористых разновидностях (проба № 09М-24, Бешкуль)  $ZnO_2$  – 0,59%. В кальцинитах и синхизитах дайки сферолитовых трахитов (проба № ЧВ-1/14) присутствуют примеси золота, серебра и платиноидов, соответственно: Au – 0,12 %; 0,20 %;  $Ag_2O$  – 0,0%; 0,21 %; Pd – 0,21%; 0,02%.

**Сульфиды и сульфосоли.** В породах внутриплитной сиенитоидной ассоциации Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов сульфидные минералы встречаются неравномерно, сильно рассеяны. Основная часть сульфидных минералов сконцентрирована в сиенитоидных дайках. Среди них преобладает пирит, меньше развит халькопирит, и редко галенит и висмутин (табл. 10).

Таблица 10

Результаты микрозондового исследования сульфидов пород внутриплитной сиенитоидной ассоциации Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов, %

| Номера проб        | n | Fe    | Mn   | Co   | Ni   | S     | Ag   | Cu    | Zn   | Mo   | Re   | ЭПГ  | TR   |
|--------------------|---|-------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|
| <b>Халькопирит</b> |   |       |      |      |      |       |      |       |      |      |      |      |      |
| 49-М07             | 2 | 34,17 | 0    | 0    | 0    | 33,58 | 0    | 26,55 | 0    | 0    | 3,35 | 1,35 | 2,26 |
| <b>Пирит</b>       |   |       |      |      |      |       |      |       |      |      |      |      |      |
| 49-М07             | 2 | 43,24 | 0,13 | 0    | 0    | 50,27 | 0    | 0     | 0    | 0    | 1,49 | 2,77 | 2,10 |
| АК-17              | 7 | 41,20 | 0    | 0    | 0,12 | 44,42 | 0,35 | 0     | 0,14 | 8,60 | 0    | 4,42 | 0,87 |
| АК-22              | 3 | 42,73 | 0    | 0    | 0,14 | 41,62 | 0,25 | 0     | 0    | 7,23 | 0    | 0,73 | 1,01 |
|                    | 4 | 44,12 |      | 0    | 0,14 | 54,70 | 0,03 | 0     | 0,10 | 0    | 0    | 0    | 0,67 |
| АК-26              | 1 | 56,49 | 0    | 0,08 | 0,19 | 34,65 | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    | 0,15 | 0,50 |
| <b>Галенит</b>     |   |       |      |      |      |       |      |       |      |      |      |      |      |
| 09-М22             | 1 | 0,20  | 0    | 0    | 0    | 13,82 | 0    | 0,08  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 09-М22             | 1 | 0     | 0    | 0    | 0    | 12,72 | 0    | 0     | 0    | 6,18 | 0    | 0    | 0    |

В пирите и халькопирите дайки кварцевого сиенит-порфира Каттаакара (Ерташская площадь) микрозондовым анализом установлены относительно значительные содержания рения, платиноидов и редких земель (%), в пирите Re – 1,49; ЭПГ – 2,77; TR – 2,11; халькопирите Re – 3,35; ЭПГ – 1,35; TR – 1,53). В единичных зернах галенита граносиенитов Беш-

кульского штока присутствует молибден (Mo – 6,18 %). В пиритах сиенитоидов Актепинского рудного поля содержания примеси серебра и платиноидов достигают до 0,35 % и 4,42 % соответственно. Кроме того, они являются носителями никеля (Ni – 0,12-0,19 %) и редких земель (TR – 0,50-1,01 %), в редких

случаях, молибдена (Mo – 7,23-8,60 %) и цинка (Zn – 0,10-0,14 %).

**Кремнещелочные флюиды и нанокристаллы в них.** Р.И. Конеевым было предложено считать наноминералом «... минеральный вид или разновидность размерами менее 100 мкм, особенности состава, структуры и свойства которых определяются размерными эффектами. В наномасштабах могут кристаллизоваться наноминералы с нетрадиционной кристаллографией, допускающей симметрию 5, 7 порядков (фуллерены). Возникает кристаллохимия соединений, не существующих в масштабной форме, появляются минеральные виды с «запрещенными» сочетаниями элементов» [17].

Микроскопическим и электронно-микрондовым исследованиями в дайках кварцевых сиенит-порфиров и сферолитовых трахитов нами установлены рудогенерирующие кремнистые, кремнещелочно-фторидные и кремнещелочно-хлоридные флюидные микрообособления, содержащие сахаровидные и радиально-лучистые нанокристаллы (рис. 12, табл. 11).

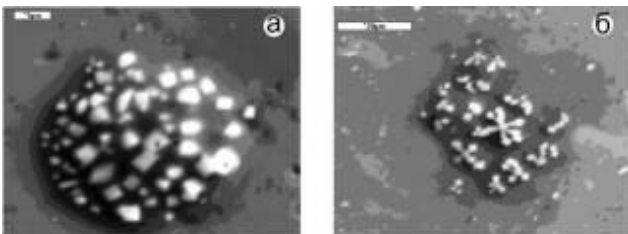


Рис. 12. Растровый снимок кремнещелочного флюидного микрообособления с нанокристаллами в дайках кварцевого сиенит-порфира (а) и сферолитового трахита (б): а – аншлиф № Ал-1/14, Курташ, юго-западный фланг Кызылалмасайского рудного поля; б – аншлиф № ЧВ-1/14, месторождение Пирмираб, Чадакское рудное поле

К выявлению роли магматогенных рудогенерирующих флюидов в формировании и локализации комплексного благородно-редкометалльного оруденения посвящены многочисленные работы [18-23]. Согласно им, отделение рудного вещества начинается с момента зарождения магматических расплавов. Его перенос вверх и концентрирование внутри рас-

плава осуществляются главным образом с помощью механизма пенной флотации, которая способствует насыщению металлами газожидких, газовых и жидких отделяющихся флюидов, превращая их в реально рудонесущие и потенциально рудогенерирующие.

Поведение рудного вещества, отделившегося от магматического силикатного расплава, может быть двояким: в одном случае при кристаллизации расплава оно образует обособленные рудные скопления внутри него, в другом – выносится за пределы расплава и формирует рудные тела уже вне материнской среды. Отделение рудной фазы первоначально выражается в возникновении рассеянных мельчайших капель рудогенерирующего флюидного микрообособления. Далее этими же пузырьками газо-жидкого флюида рудные компоненты транспортируются в верхние части магматического резервуара, а затем и за его пределы. Исходя из этого мы предполагаем связь золото-серебряных рудных объектов с платиноидной нагрузкой с сиенитоидными малыми интрузиями и дайками, которые интенсивно развиты в их пределах серебряных и золото-серебряных объектов, размещенных в Кумбель-Угамской зоне глубинных разломов и насыщенных рудогенерирующими кремнещелочно-хлоридными флюидными микрообособлениями. Они характеризуются значительными концентрациями серебра и платиноидов в хлорсодержащем кремнещелочном флюиде. Сахаровидные нанокристаллиты, содержащиеся в них характеризуются также высокими концентрациями золота, серебра и платиноидов. В дайках кварцевых сиенит-порфиров Чадакского рудного поля выявлены кремнещелочно-хлоридные микрообособления, содержащие золото (Au – 0,07 %), серебро (Ag<sub>2</sub>O – 0,16 %) и платиноиды (0,50 %). Сахаровидные, радиально-лучистые нанокристаллы кремнещелочно-хлоридных микрообособлений, определенные в дайках сферолитовых трахитов этого поля отличаются специализацией на золото, серебро и платиноиды (% Au – 0,12; Ag<sub>2</sub>O – 1,33; платиноиды – 3,44).



Таблица 11

Результаты микронзондового исследования кремнистых и кремнещелочных флюидных микрообосблений с нанокристаллами пород внутриплитной сиенитоидной ассоциации Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов, %

| Номера проб                                       | n | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO   | MnO  | MgO   | CaO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | Cl    | F    | SO <sub>3</sub> | CuO  | PbO   | ZnO  | SnO <sub>2</sub> | MoO <sub>3</sub> | Rh <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Pt   | Ag <sub>2</sub> O | Au   |
|---|---|------------------|------------------|--------------------------------|-------|------|-------|------|-------------------|------------------|-------|------|-----------------|------|-------|------|------------------|------------------|--------------------------------|------|-------------------|------|
| <b>Флюидные микрообосбления</b>                   |   |                  |                  |                                |       |      |       |      |                   |                  |       |      |                 |      |       |      |                  |                  |                                |      |                   |      |
| 09М-24  | 1 | 37,03            | 6,42             | 8,07                           | 18,92 | 1,78 | 10,97 | 1,63 | 0,88              | 0,31             | 0,01  | 1,74 | 0               | 0,15 | 0     | 0,98 | 0                | 0                | 0                              | 0    | 0                 | 0    |
| 09М-24  | 3 | 89,13            | 0,78             | 1,80                           | 0,09  | 0    | 0,78  | 0,22 | 0,71              | 0,40             | 0,14  | 0    | 0,33            | 0    | 0     | 0    | 0                | 0,14             | 0                              | 0    | 0                 | 0    |
|   | 1 | 42,67            | 0,28             | 16,25                          | 3,39  | 0    | 9,94  | 1,28 | 3,72              | 2,93             | 0     | 0    | 3,76            | 0    | 0     | 0    | 0                | 0                | 0                              | 0    | 0                 | 0    |
|   | 2 | 13,93            | 0                | 0                              | 0     | 0    | 0     | 0,90 | 0                 | 0                | 0     | 5,24 | 0               | 0    | 39,81 | 0    | 40,13            | 0                | 0                              | 0    | 0                 | 0    |
| Ч-29/14   | 2 | 60,66            | 0                | 16,95                          | 0,69  | 0,04 | 0     | 1,14 | 10,82             | 4,31             | 2,00  | 0    | 0               | 0    | 0     | 0    | 0                | 0                | 0,30                           | 0,20 | 0,16              | 0,07 |
| <b>Нанокристаллы во флюидных микрообосблениях</b> |   |                  |                  |                                |       |      |       |      |                   |                  |       |      |                 |      |       |      |                  |                  |                                |      |                   |      |
| Ч-29/14   | 1 | 54,58            | 0                | 15,85                          | 0,10  | 0    | 0     | 0,22 | 3,69              | 20,19            | 5,05  | 0    | 0               | 0    | 0     | 0    | 0                | 0                | 0                              | 0    | 0                 | 0,18 |
|   | 1 | 59,28            | 0                | 17,31                          | 0,50  | 0    | 0     | 0,58 | 8,16              | 9,23             | 4,55  | 0    | 0               | 0    | 0     | 0    | 0                | 0                | 0                              | 0    | 0                 | 0    |
| ЧВ-1/14   | 2 | 25,93            | 0                | 6,54                           | 0,75  | 0,13 | 0     | 0,73 | 7,43              | 36,51            | 22,18 | 0    | 0               | 0,24 | 0     | 0,21 | 0                | 1,36             | 3,44                           | 0    | 1,33              | 0,12 |

В нанокристаллах наблюдается прямая параэлементная корреляция калия с золотом и платиноидами, т.е. чем больше содержание калия в них, тем больше повышается и концентрация последних. Хлорсодержащие кремнещелочные флюидные микрообосбления в сиенитоидах имеют ярко выраженную положительную специализацию на золото, серебро и платиноиды, а фторсодержащие – редкие и редкоземельные металлы.

#### 4. Геохимическая специализация сиенитоидных малых интрузий и даек

Изучение геохимии элементов в породах малых порфировых интрузий и дайковых образований внутриплитной сиенитоидной ассоциации, развитых в пределах Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов региона выполнено путем сопоставления содержания, которые были определены ИСП-масс-спектрометрическим методом с кларками и интерпретацией их на диаграммах (рис. 12 и 13). По содержанию благородных, редких и цветных металлов в породе они имеют положительную геохимическую корреляцию, но в некоторых случаях обладают незначительными отличиями, которые не влияют на общую тенденцию специализации сиенитоидных малых интрузий и даек.

Малые интрузивы и дайки сиенитоидов характеризуются повышенными содержаниями урана и тория. Максимальное содержание урана в первых из них достигает до 39 г/т, а тория 60 г/т, когда в сиенитовых дайках их содержания не превышают соответственно 10,6 г/т, 36,2 г/т, которые тоже являются вышекларковыми. Дайки граносиенит-аплитов, секущие Бешкульский шток граносиенитов имеют также, как и породы материнского интрузива, повышенные содержания этих металлов (U -20 г/т, Th -90 г/т).

Самые высокие содержания циркония установлены в дайках сферолитовых трахитов Чадака (Zr- 430 г/т), трахитов Актёпы (Zr – 300 г/т). Содержание циркония в граносиенитах Бешкульского и Актёпинского рудных полей достигает до 170-190 г/т.

Олово в сиенитоидах малых интрузий и дайках рассеяно неравномерно. В породах обоих фациальных типов содержание его изменяется от низкокларковых значений до пятикратно превышающих их кларковые значения. Самые высокие концентрации олова выявлены в дайках сиенит-порфиров Чадакского рудного поля, содержащих вкрапленность гематита (Sn – 300 г/т) и в сферолитовых трахитах (Sn – 210 г/т).

Ниобий-танталлоносность более отчетливо выражена в породах малых интрузий, чем в дайках внутриплитной сиенитоидной ассоциации, максимальное суммарное содержание их в первых составляет 62 г/т, а в дайках – 48 г/т.

В сиенитоидах обоих фациальных типов повышены содержания молибдена и вольфрама (Кк, в малых интрузивах Мо – 1,27-10,91,0, в среднем – 4,15; W – 0,92-5,92, в среднем – 5,33; в дайках Мо – 0,91-10,91, в среднем 2,92; W – 0,96-17,69, в среднем 8,25).

Сиенитоиды малых интрузий и даек Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов также характеризуются высокими и весьма высокими концентрациями селена, сурьмы и теллура, которые обычно являются попутными элементами минералов-концентраторов или носителей золота и серебра, т.е. элементами-индикаторами при поиске золото-серебряного оруденения с платиноидной нагрузкой.

Породы внутриплитной сиенитоидной ассоциации являются потенциально золотоносными и сереброносными. Концентрация серебра и золота в них превышает кларк этих элементов в земной коре (Кк, в малых интрузивах Ag – 3-17, Au – 1,5-51, в дайках Ag – 2-16, Au – 2-58). Максимальное содержание серебра в граносиенитах малых порфировых интрузий достигает 0,85 г/т, золота – 0,1 г/т, а в сиенитовых дайках Ag – 350 г/т, Au – 0,25 г/т.

Исследуемые магматические породы характеризуются часто нижекларковыми, редко околоскларковыми содержаниями меди. Высокие концентрации цинка определены в дайках кварцевых сиенит-порфиров Ерташского и трахитов Актёпинского рудных полей (соответственно 1131 г/т и 690 г/т). Содержание свинца в сиенитоидах обоих комплексов неравномерное (в малых интрузивах 12-900 г/т; в дайках 2,9-1200 г/т).

Суммарные количества иттрия, скандия и редкоземельных элементов в сиенитоидах Актёпинского массива достигают до 470 г/т, трахитах Актёпинского рудного поля – 230-293 г/т, сферолитовых трахитах Чадакского рудного поля – 478 г/т.

Таблица 12

Результаты ИСР-масс-спектрометрического исследования пород пермских малых порфировых интрузий сиенитоидов Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов, г/т

| Элементы | 1      | 09M24 | Бл57/14 | AK-03 | AK-16 | AK-22 | AK-34 | AK-35 | AK-43 |
|----------|--------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| P        | 930    | Н.д.  | 330     | 10000 | 730   | 530   | 1700  | 1100  | 377   |
| Rb       | 150    | 340   | 360     | 74    | 300   | 270   | 160   | 180   | 182   |
| Cs       | 3,7    | 10    | 11      | 2     | 7,8   | 8,5   | 2,8   | 3,7   | 8,82  |
| Ba       | 650    | 21    | 270     | 930   | 1100  | 1200  | 1400  | 1400  | 761   |
| Sr       | 340    | 8,8   | 55      | 970   | 93    | 84    | 370   | 200   | 17,2  |
| Be       | 3,8    | 11    | 8,1     | 1,60  | 3,6   | 4,3   | 4,7   | 4,7   | 2,77  |
| Th       | 13     | 53    | 60,0    | 6     | 61    | 43    | 34    | 35    | 6,92  |
| U        | 2,5    | 12    | 39,0    | 1,8   | 16    | 7,1   | 9,2   | 7,9   | 0,025 |
| Sn       | 2,5    | 0,4   | 10,0    | 2,0   | 3,4   | 3,4   | 3,7   | 3,6   | 1,27  |
| Zr       | 170    | 170   | 100,0   | 76    | 190   | 170   | 120   | 150   | 89,1  |
| Hf       | 1      | 4,2   | 4,30    | 2,30  | 6,2   | 6     | 3,8   | 4,5   | 2,89  |
| Nb       | 20     | 53    | 46,0    | 18    | 14    | 22    | 36    | 24    | 11,8  |
| Ta       | 2,5    | 8,7   | 4,90    | 0,93  | 1,5   | 2,3   | 2,4   | 1,9   | 1,11  |
| Mo       | 1,1    | 12    | 2,20    | 1,4   | 8,6   | 3,2   | 7,8   | 1,3   | 4,53  |
| W        | 1,3    | 6,1   | 4,30    | 1,2   | 2,9   | 31    | 2,2   | 7,7   | 2,64  |
| Ag       | 0,07   | 0,2   | 0,40    | 0,85  | 0,71  | 1,2   | 0,58  | 0,69  | 0,201 |
| Au       | 0,0043 | 0,1   | 0,005   | 0,04  | 0,05  | 0,22  | 0,056 | 0,06  | 0,05  |
| Cu       | 47     | 11    | 5,4     | 76    | 7,9   | 30    | 13    | 9,5   | 1,85  |
| Zn       | 83     | 40    | 55,0    | 240   | 27    | 110   | 50    | 74    | 13,4  |
| Pb       | 16     | 120   | 36,0    | 27    | 22    | 900   | 31    | 62    | 10,5  |
| Bi       | 0,009  | 1,2   | 0,61    | 0,25  | 0,61  | 4,9   | 1,5   | 2,5   | 0,098 |
| Sc       | 0,009  | 1,4   | 2,6     | 24,0  | 3,7   | 4,5   | 7,7   | 6,6   | 1,99  |
| Y        | 29     | 10    | 34,0    | 38    | 24    | 17    | 25    | 22    | 3,24  |
| La       | 29     | 8,7   | 51,0    | 74    | 58    | 34    | 57    | 36    | 21,2  |
| Ce       | 70     | 22    | 77,0    | 180   | 96    | 92    | 100   | 70    | 37,6  |
| Pr       | 9      | 1,4   | 16,0    | 20    | 12    | 8,4   | 12    | 8,7   | 3,33  |
| Nd       | 37     | 5,2   | 35,0    | 83    | 42    | 28    | 44    | 30    | 10,3  |
| Sm       | 8      | 1,9   | 6,40    | 15    | 7     | 5,1   | 7,7   | 5,4   | 1,51  |
| Eu       | 1,3    | 0,074 | 0,51    | 3,3   | 1,2   | 0,88  | 1,7   | 1,30  | 0,156 |
| Gd       | 8      | 1,5   | 5,70    | 13    | 6,2   | 4,5   | 6,9   | 4,8   | 1,0   |
| Tb       | 4,3    | 0,36  | 0,88    | 1,6   | 0,88  | 0,68  | 0,95  | 0,71  | 0,124 |
| Dy       | 5      | 2,3   | 5,80    | 8,6   | 5,2   | 4,1   | 5,1   | 3,9   | 0,52  |
| Ho       | 1,7    | 0,6   | 1,20    | 1,4   | 0,94  | 0,72  | 0,97  | 0,81  | 0,114 |
| Er       | 3,3    | 2,1   | 3,80    | 3,6   | 2,6   | 2,2   | 2,7   | 2,3   | 0,292 |
| Tm       | 0,27   | 0,45  | 0,64    | 0,45  | 0,42  | 0,34  | 0,39  | 0,36  | 0,066 |
| Yb       | 0,33   | 3,4   | 4,80    | 2,9   | 3,2   | 2,6   | 2,7   | 2,5   | 0,498 |
| Lu       | 0,08   | 0,37  | 0,74    | 0,37  | 0,47  | 0,40  | 0,39  | 0,38  | 0,069 |

Окончание табл. 12

| Элементы | 1      | АК-45 | АК-47 | АК-49 | АК-58 | ГВ-02 | ГВ-03 | ГВ-04 | ГВ-20 |
|----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| P        | 930    | 239   | 5948  | 209   | 292   | 150   | 140   | 430   | 140   |
| Rb       | 150    | 163   | 1,31  | 255   | 164   | 240   | 310   | 27    | 190   |
| Cs       | 3,7    | 5,58  | 0,43  | 19,7  | 5,76  | 2,4   | 3     | 0,95  | 2,5   |
| Ba       | 650    | 711,4 | 9,68  | 76,4  | 89,8  | 590   | 57    | 170   | 960   |
| Sr       | 340    | 16,4  | 21,1  | 6,5   | 11,4  | 27    | 12    | 140   | 310   |
| Be       | 3,8    | 1,6   | 1,45  | 2,09  | 1,17  | 2,0   | 5,7   | 24,0  | 2,70  |
| Th       | 13     | 12,8  | 8,20  | 7,55  | 8,31  | 11,0  | 29,0  | 1,2   | 22,0  |
| U        | 2,5    | 0,039 | 0,09  | 0,055 | 0,053 | 8,6   | 9,2   | 0,98  | 4,0   |
| Sn       | 2,5    | 2,38  | 1,32  | 8,08  | 5,18  | 7,9   | 2,8   | 2,1   | 4,6   |
| Zr       | 170    | 86,3  | 30,6  | 96,7  | 63,1  | 140,0 | 62,0  | 30,0  | 100,0 |
| Hf       | 1      | 2,51  | 1,07  | 3,59  | 2,23  | 6,2   | 3,1   | 1,1   | 4,2   |
| Nb       | 20     | 10,4  | 8,15  | 20,2  | 13,1  | 36,0  | 62,0  | 1,9   | 27,0  |
| Ta       | 2,5    | 0,943 | 0,781 | 1,59  | 0,577 | 2,8   | 5,9   | 0,16  | 2,0   |
| Mo       | 1,1    | 3,88  | 2,45  | 2,74  | 4,21  | 5,5   | 3,0   | 1,2   | 2,0   |
| W        | 1,3    | 1,82  | 7,24  | 2,35  | 95,21 | 5,6   | 6,8   | 21,0  | 3,0   |
| Ag       | 0,07   | 0,543 | 1,01  | 0,484 | 0,214 | 0,42  | 0,37  | 0,29  | 0,73  |
| Au       | 0,0043 | 0,05  | 0,05  | 0,05  | 0,05  | 0,012 | 0,011 | 0,009 | 0,005 |
| Cu       | 47     | 1,71  | 2,98  | 3,45  | 2,01  | 9,70  | 38    | 210   | 560   |
| Zn       | 83     | 16,7  | 19,1  | 67,6  | 34,4  | 9,20  | 17,0  | 89,0  | 79,0  |
| Pb       | 16     | 10,7  | 3,68  | 16,6  | 11,2  | 14,0  | 35,0  | 8,7   | 12,0  |
| Bi       | 0,009  | 0,224 | 0,594 | 0,534 | 0,422 | 1,0   | 0,78  | 0,25  | 0,53  |
| Sc       | 0,009  | 5,76  | 3,47  | 1,30  | 1,68  | 0,52  | 0,88  | 62,0  | 4,50  |
| Y        | 29     | 5,03  | 9,22  | 10,2  | 8,45  | 12,0  | 22,0  | 13,0  | 7,40  |
| La       | 29     | 14,0  | 41,1  | 9,44  | 22,2  | 6,4   | 13,0  | 5,6   | 8,1   |
| Ce       | 70     | 19,6  | 65,7  | 15,7  | 42,9  | 10,0  | 20,0  | 14,0  | 12,0  |
| Pr       | 9      | 1,74  | 9,03  | 1,90  | 4,24  | 1,5   | 3,9   | 2,3   | 1,9   |
| Nd       | 37     | 5,8   | 30,3  | 7,26  | 16,1  | 5,1   | 12,0  | 11,0  | 5,9   |
| Sm       | 8      | 0,83  | 3,86  | 1,15  | 2,92  | 1,4   | 3,1   | 3,2   | 1,1   |
| Eu       | 1,3    | 0,277 | 0,52  | 0,173 | 0,361 | 0,1   | 0,17  | 0,89  | 1,3   |
| Gd       | 8      | 0,875 | 2,99  | 1,30  | 2,51  | 1,8   | 2,9   | 3,2   | 1,0   |
| Tb       | 4,3    | 0,126 | 0,337 | 0,229 | 0,320 | 0,38  | 0,55  | 0,51  | 0,17  |
| Dy       | 5      | 0,78  | 1,65  | 1,64  | 1,62  | 2,60  | 3,8   | 3,3   | 1,3   |
| Ho       | 1,7    | 0,192 | 0,275 | 0,336 | 0,260 | 0,49  | 0,76  | 0,63  | 0,28  |
| Er       | 3,3    | 0,475 | 0,762 | 1,03  | 0,704 | 1,5   | 2,5   | 1,6   | 0,95  |
| Tm       | 0,27   | 0,129 | 0,107 | 0,147 | 0,134 | 0,24  | 0,46  | 0,22  | 0,15  |
| Yb       | 0,33   | 0,836 | 0,631 | 1,26  | 0,810 | 1,7   | 3,5   | 1,4   | 1,1   |
| Lu       | 0,08   | 0,106 | 0,110 | 0,174 | 0,115 | 0,24  | 0,53  | 0,18  | 0,18  |

Примечание: 1 - здесь и в далее таблицах кларк элемента в земной коре по А.П.Виноградову [24]; 09М24, Бл-57/14 - граносиенит-порфиры Бешкульского интрузива; АК-03, АК-16, АК-22, АК-34, АК-35, АК-43, АК-45, АК-47, АК-49, АК-58 – породы Актепинского массива: АК-03, АК-34 и АК-35 – монзониты; АК-16 – сиенит-порфир; АК-22 – кварцевый сиенит-порфир, АК-43, АК-45, АК-47, АК-49; АК-58 – измененные граносиениты; ГВ-02, ГВ-03, ГВ-04 и ГВ-20 – кварцевые сиенит-порфиры Алычалькского массива.

Таблица 13

Результаты ИСР-масс-спектрометрического исследования пермских сиенитодных даек  
Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов, г/т

| Элементы | 1      | 10M07 | 49M07 | 51M07 | 09M22 | AK26 | AK31 | AK40 | ЧВ1   | Ч1/14 | Ч2    | Ч3    |
|----------|--------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| P        | 930    | 151   | 410   | 2000  | Н.д.  | 2800 | 2600 | 2700 | 210   | 320   | 120   | 97    |
| Rb       | 150    | 230   | 130   | 61    | 400   | 8,5  | 240  | 260  | 227   | 4,2   | 140   | 43    |
| Cs       | 3,7    | 4,59  | 1,7   | 5,2   | 29    | 3    | 3    | 11   | 3,51  | 0,12  | 1,6   | 0,4   |
| Ba       | 650    | 92,1  | 2900  | 880   | 330   | 54   | 1100 | 970  | 41    | 82    | 640   | 200   |
| Sr       | 340    | 13,6  | 1100  | 560   | 110   | 850  | 190  | 130  | 35,5  | 43    | 84    | 45    |
| Be       | 3,8    | 2,64  | 4,5   | 1,5   | 12    | 7,9  | 4,9  | 5,2  | 3,77  | 1,2   | 1,30  | 1,6   |
| Th       | 13     | 36,2  | 29    | 8,3   | 90    | 22   | 13   | 11   | 24,1  | 4,1   | 24    | 15    |
| U        | 2,5    | 10,6  | 4,4   | 3,6   | 20    | 3    | 3,3  | 5,4  | 9,05  | 3,8   | 3,6   | 2     |
| Sn       | 2,5    | 2,47  | 0,74  | 2,2   | 1,8   | 4,4  | 2,6  | 2    | 5,21  | 210   | 2,1   | 1,9   |
| Zr       | 170    | 74    | 160   | 26,0  | 180   | 140  | 300  | 290  | 430   | 30    | 66    | 38    |
| Hf       | 1      | 3,03  | 2,9   | 1,0   | 3,6   | 3,4  | 7,1  | 7    | 0,17  | 1     | 2,8   | 1,7   |
| Nb       | 20     | 22,5  | 40    | 8,9   | 57    | 43   | 24   | 24   | 32,2  | 5     | 7     | 3,8   |
| Ta       | 2,5    | 1,73  | 4     | 0,39  | 9,3   | 5,2  | 1,5  | 1,3  | 2,0   | 0,42  | 1,1   | 0,59  |
| Mo       | 1,1    | 1,35  | 3,6   | 1,0   | 5,5   | 1,7  | 1,6  | 3    | 2,13  | 6,3   | 1     | 1,9   |
| W        | 1,3    | 22,2  | 1,8   | 2,9   | 3,1   | 5    | 69   | 8,1  | 23    | 530   | 2,4   | 2,9   |
| Ag       | 0,07   | 0,18  | 0,8   | 0,33  | 0,3   | 350  | 1,1  | 1,1  | 0,74  | 0,11  | 0,22  | 0,15  |
| Au       | 0,0043 | 0,05  | 0,25  | 0,016 | 0,21  | 0,09 | 0,07 | 0,05 | 0,05  | 0,013 | 0,012 | 0,014 |
| Cu       | 47     | 415   | 9,2   | 90    | 8,1   | 15   | 39   | 34   | 16,7  | 3     | 7,1   | 4,7   |
| Zn       | 83     | 1131  | 51    | 110   | 71    | 59   | 690  | 560  | 31,7  | 5,9   | 13    | 8,5   |
| Pb       | 16     | 7,78  | 54    | 34    | 140   | 8,1  | 1200 | 44   | 32,2  | 2,9   | 8,7   | 3,4   |
| Bi       | 0,009  | 0,237 | 0,5   | 0,33  | 1,1   | 1,1  | 7,4  | 1,5  | 0,241 | 0,47  | 0,11  | 0,24  |
| Sc       | 10     | 1,95  | 4,7   | 10,0  | 4,5   | 16   | 12   | 15   | 1,68  | 7,0   | 0,92  | 0,86  |
| Y        | 29     | 3,44  | 33    | 8,8   | 39    | 18   | 31   | 32   | 91,2  | 4,2   | 7,4   | 3,5   |
| La       | 29     | 17,7  | 45    | 19    | 44    | 33   | 47   | 49   | 152   | 30    | 21    | 13    |
| Ce       | 70     | 19,1  | 81    | 41    | 83    | 76   | 100  | 94   | 113   | 50    | 30    | 20    |
| Pr       | 9      | 5,08  | 6     | 4,7   | 5,9   | 8,5  | 12   | 13   | 15,6  | 4,7   | 4,4   | 2,8   |
| Nd       | 37     | 17,6  | 25    | 17    | 24    | 32   | 46   | 52   | 57,8  | 13    | 14    | 9,3   |
| Sm       | 8      | 4,22  | 8     | 3,4   | 7,2   | 5,3  | 8,3  | 9,7  | 11,3  | 2,0   | 2,6   | 1,7   |
| Eu       | 1,3    | 0,28  | 1,11  | 0,86  | 0,65  | 1,1  | 2,4  | 2,4  | 0,15  | 0,2   | 0,48  | 0,26  |
| Gd       | 8      | 3,73  | 5,9   | 3,0   | 5,1   | 4,6  | 7,4  | 8,3  | 9,63  | 2     | 2,2   | 1,4   |
| Tb       | 4,3    | 0,58  | 1,2   | 0,39  | 1     | 0,62 | 1    | 1,2  | 1,53  | 0,23  | 0,3   | 0,18  |
| Dy       | 5      | 3,87  | 6,3   | 2,1   | 5,5   | 3,3  | 5,8  | 6,6  | 9,43  | 1,2   | 1,8   | 1     |
| Ho       | 1,7    | 0,74  | 1,5   | 0,37  | 1,4   | 0,63 | 1,2  | 1,3  | 1,83  | 0,22  | 0,34  | 0,18  |
| Er       | 3,3    | 2,2   | 4,3   | 1,0   | 4,5   | 1,8  | 3,1  | 3,6  | 5,23  | 0,67  | 1,1   | 0,55  |
| Tm       | 0,27   | 0,34  | 0,9   | 0,14  | 1     | 0,29 | 0,44 | 0,53 | 0,84  | 0,1   | 0,18  | 0,09  |
| Yb       | 0,33   | 2,63  | 6,4   | 0,88  | 6,9   | 2,1  | 3    | 3,4  | 5,84  | 0,7   | 1,4   | 0,7   |
| Lu       | 0,08   | 0,34  | 0,54  | 0,11  | 0,81  | 0,36 | 0,45 | 0,55 | 0,79  | 0,1   | 0,22  | 0,11  |

Окончание табл. 13

| Элементы | 1      | Ч19  | Ч29  | Ч60   | Ч10   | Ч11   | Ч49   | Ч56   | Ч68   | Ч110  | Ч111  |
|----------|--------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| P        | 930    | 180  | 240  | 119   | 110   | 180   | 213   | 235   | 243   | 138   | 140   |
| Rb       | 150    | 140  | 120  | 123   | 1,2   | 28    | 19,7  | 3,48  | 5,64  | 224   | 215   |
| Cs       | 3,7    | 1,7  | 1,2  | 1,37  | 0,09  | 1,5   | 0,676 | 0,303 | 0,46  | 10,0  | 5,69  |
| Ba       | 650    | 1000 | 820  | 363   | 37    | 87    | 18,5  | 16,5  | 20,0  | 352   | 1051  |
| Sr       | 340    | 47   | 47   | 39,2  | 6,7   | 100   | 130   | 14,5  | 18,9  | 204   | 286   |
| Be       | 3,8    | 2,2  | 2,8  | 3,36  | 3,1   | 8,6   | 4,82  | 4,92  | 1,45  | 3,16  | 2,51  |
| Th       | 13     | 6,8  | 26   | 30,25 | 0,17  | 2,8   | 8,13  | 1,09  | 1,32  | 22,8  | 4,63  |
| U        | 2,5    | 5    | 4,1  | 4,56  | 24    | 5,0   | 2,52  | 9,64  | 17,2  | 21,8  | 3,98  |
| Sn       | 2,5    | 5,3  | 4,9  | 6,58  | 300   | 31    | 5,85  | 8,74  | 2,03  | 1,84  | 2,27  |
| Zr       | 170    | 170  | 200  | 125   | 1,4   | 12    | 20,6  | 3,68  | 5,61  | 75,6  | 61,7  |
| Hf       | 1      | 5,6  | 6,1  | 4,78  | 0,06  | 0,57  | 0,71  | 0,11  | 0,19  | 2,61  | 2,29  |
| Nb       | 20     | 26   | 27   | 33    | 0,71  | 3,3   | 8,71  | 1,17  | 1,43  | 15,8  | 13,4  |
| Ta       | 2,5    | 1,8  | 2    | 2,31  | 0,03  | 0,25  | 0,5   | 0,09  | 0,125 | 1,31  | 1,35  |
| Mo       | 1,1    | 0,98 | 2,5  | 3,6   | 25    | 18    | 1,92  | 31,3  | 79    | 5,16  | 2,19  |
| W        | 1,3    | 2,2  | 1,8  | 3,82  | 1900  | 280   | 5,24  | 259   | 7,65  | 1,25  | 1,64  |
| Ag       | 0,07   | 0,63 | 0,09 | 0,804 | 0,03  | 0,11  | 0,098 | 0,455 | 2,32  | 0,246 | 0,767 |
| Au       | 0,0043 | 0,01 | 0,01 | 0,05  | 0,016 | 0,014 | 0,07  | 0,05  | 0,067 | 0,05  | 0,05  |
| Cu       | 47     | 5,9  | 4,5  | 17,5  | 1,6   | 3,4   | 8,64  | 36,9  | 415   | 10,4  | 7,75  |
| Zn       | 83     | 25   | 28   | 19,3  | 10    | 44    | 11,4  | 70,4  | 1131  | 58,7  | 180   |
| Pb       | 16     | 45   | 73   | 46,4  | 13    | 9,8   | 7,09  | 217   | 221   | 31    | 74,4  |
| Bi       | 0,009  | 0,6  | 401  | 0,208 | 0,69  | 0,73  | 0,765 | 2867  | 10200 | 0,141 | 1,75  |
| Sc       | 10     | 1,2  | 1,4  | 1,95  | 8,8   | 1,8   | 1,59  | 1,19  | 1,12  | 2,02  | 2,24  |
| Y        | 29     | 13   | 28   | 14,4  | 11    | 17    | 26,4  | 2,56  | 3,44  | 16,2  | 28    |
| La       | 29     | 22   | 40   | 45,6  | 2     | 10    | 27    | 2,01  | 1,81  | 30,2  | 26,5  |
| Ce       | 70     | 38   | 70   | 90,9  | 2,8   | 20    | 64,7  | 2,31  | 2,92  | 50,42 | 44,9  |
| Pr       | 9      | 4,6  | 13   | 10,1  | 0,76  | 2,2   | 6,76  | 0,47  | 0,46  | 5,46  | 5,05  |
| Nd       | 37     | 15   | 32   | 34,3  | 3,3   | 8,1   | 26,7  | 1,49  | 1,62  | 20,6  | 17,9  |
| Sm       | 8      | 2,9  | 6,2  | 5,67  | 1,3   | 2     | 6,09  | 0,34  | 0,42  | 2,7   | 2,6   |
| Eu       | 1,3    | 0,5  | 0,76 | 0,215 | 0,16  | 0,87  | 0,463 | 0,078 | 0,10  | 0,404 | 0,593 |
| Gd       | 8      | 2,7  | 5,5  | 4,92  | 1,5   | 2,3   | 5,43  | 0,39  | 0,52  | 2,96  | 3,73  |
| Tb       | 4,3    | 0,4  | 0,85 | 0,573 | 0,3   | 0,43  | 0,80  | 0,07  | 0,083 | 0,394 | 0,686 |
| Dy       | 5      | 2,6  | 5,3  | 3,08  | 2,3   | 3,2   | 4,2   | 0,406 | 0,614 | 2,39  | 4,17  |
| Ho       | 1,7    | 0,51 | 1    | 0,593 | 0,46  | 0,62  | 0,825 | 0,078 | 0,122 | 0,492 | 0,802 |
| Er       | 3,3    | 1,6  | 3,1  | 1,88  | 1,4   | 1,8   | 2,53  | 0,235 | 0,369 | 1,60  | 2,27  |
| Tm       | 0,27   | 0,25 | 0,48 | 0,315 | 0,21  | 0,27  | 0,38  | 0,036 | 0,051 | 0,262 | 0,315 |
| Yb       | 0,33   | 1,7  | 3,2  | 2,26  | 1,4   | 1,7   | 2,77  | 0,253 | 0,523 | 1,55  | 1,94  |
| Lu       | 0,08   | 0,25 | 0,5  | 0,356 | 0,22  | 0,23  | 0,45  | 0,044 | 0,056 | 0,348 | 0,424 |

Примечание: 49М-07, 51М-07 – кварцевый сиенит-порфир, Ерташсай, 09М-22 граносиенит-аплит, Бешкуль; АК-26, АК-31, АК-40 – трахит, Актепа; ЧВ1 – дайка сферолитового трахита, Ч1/14, Ч24, Ч3, Ч19, Ч29– дайки сиенит-порфиров и связанные с ними гематитовые (Ч10 и Ч11), кварц-карбонатные (Ч49 и Ч56), кварц-гематитовые (Ч58) жилы, Ч110 – эндоконтакт и Ч11 – центральная часть дайки трахита, Чадакское рудное поле.

Более основные дайки сиенитоидов характеризуются кларковыми, даже нижекларковыми содержаниями иттрия, скандия и редких земель. Аналогичный характер их распределения наблюдается и в сиенитоидах малых интрузий. Даже в одном штокоподобном теле наблюдается неравномерное распределение этих элементов. Например, в более глубоких зонах Бешкульского граносиенитового штока суммарное содержание их почти в три раза ниже кларка (62 г/т), когда в купольной части штока они имеют вышекларковые значения (246 г/т).

На рис. 13 приведены спайдер-диаграммы, на которых сопоставлены нормированные к примитивной мантии спектры распределения некоторых индикаторных элементов в граносиенит-порфирах Бешкульского и Актепинского интрузивов, в дайках сиенит-порфиров, кварцевых сиенит-порфиров, трахитов и сферолитовых трахитов Ерташского

Актепинского и Чадакского дайковых полей. Сопоставление максимумов и минимумов распределений элементов в граносиенитах штокообразных трещинных интрузивов, секущих кислые вулканиты Бабайтаудора и размещенных в пределах Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов, с дайками сиенит-порфиров и кварцевых сиенит-порфиров дайковых полей, приуроченных к этой зоне, показали ярко выраженную положительную геохимическую корреляцию элементов в них. Сходные или близкие спектры распределения элементов повторяются и на спайдер-диаграммах сиенитов и кварцевых сиенитов с дайками трахитов и сферолитовых трахитов в Чадакском поле. Для дайки сферолитового трахита характерны незначительные отклонения бариевого и гафниевого минимумов и максимумов, которые не влияют на общую геохимическую картину.

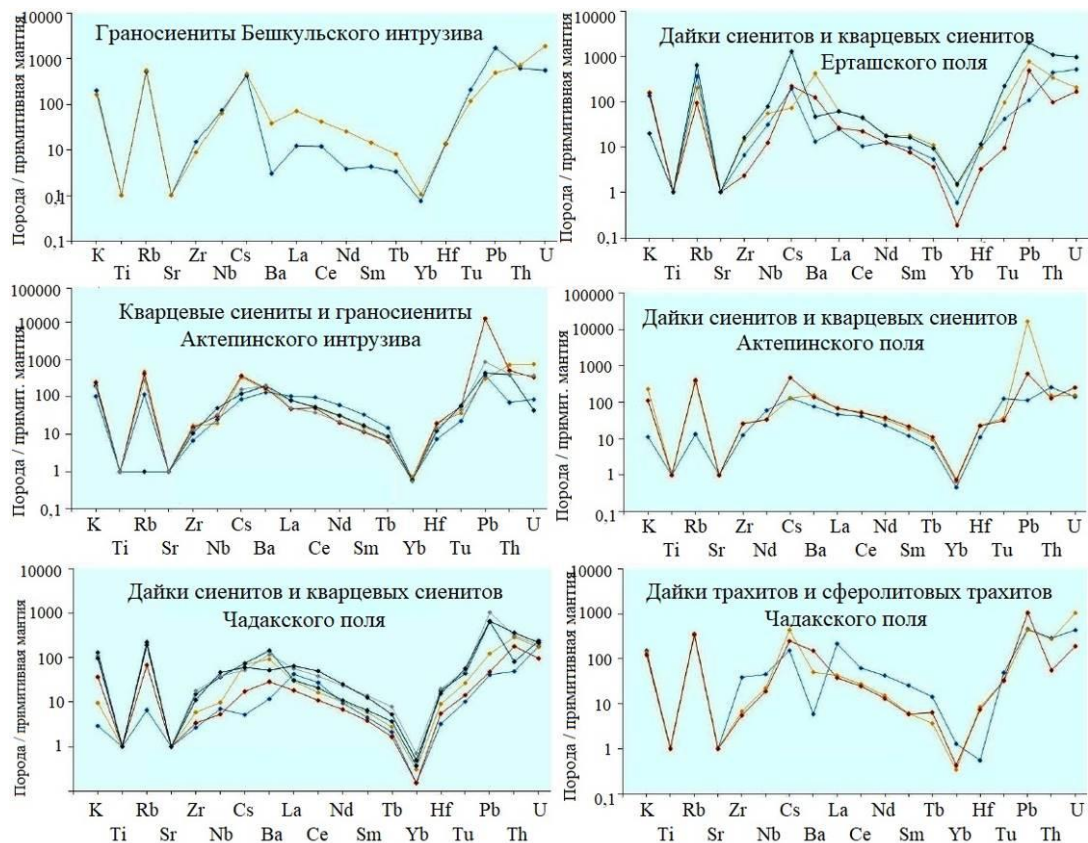


Рис. 13. Спайдер-диаграммы распределения элементов-примесей в породах внутриплитной сиенитоидной ассоциации Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов

Спектры распределения РЗЭ в малых порфировых интрузиях и дайках внутри-

плитной сиенитоидной ассоциации Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов указы-

вают на неравномерные содержания РЗЭ при значительном преобладании легких лантаноидов над тяжелыми (La/Yb).

Максимальное обеднение Eu характерно дайкам сферолитовых трахитов Чадакского дайкового поля, содержащим высокие концентрации редких земель, а также дайкам

сиенит-порфиров Ерташского поля и граносиенитам Бешкульского интрузива. Для кварцевых сиенитов и граносиенитов Актепинского интрузива и ассоциирующих с ним сиенитовых даек характерны спектры РЗЭ со слабо или умеренно выраженными отрицательными Eu-аномалиями (рис. 14).

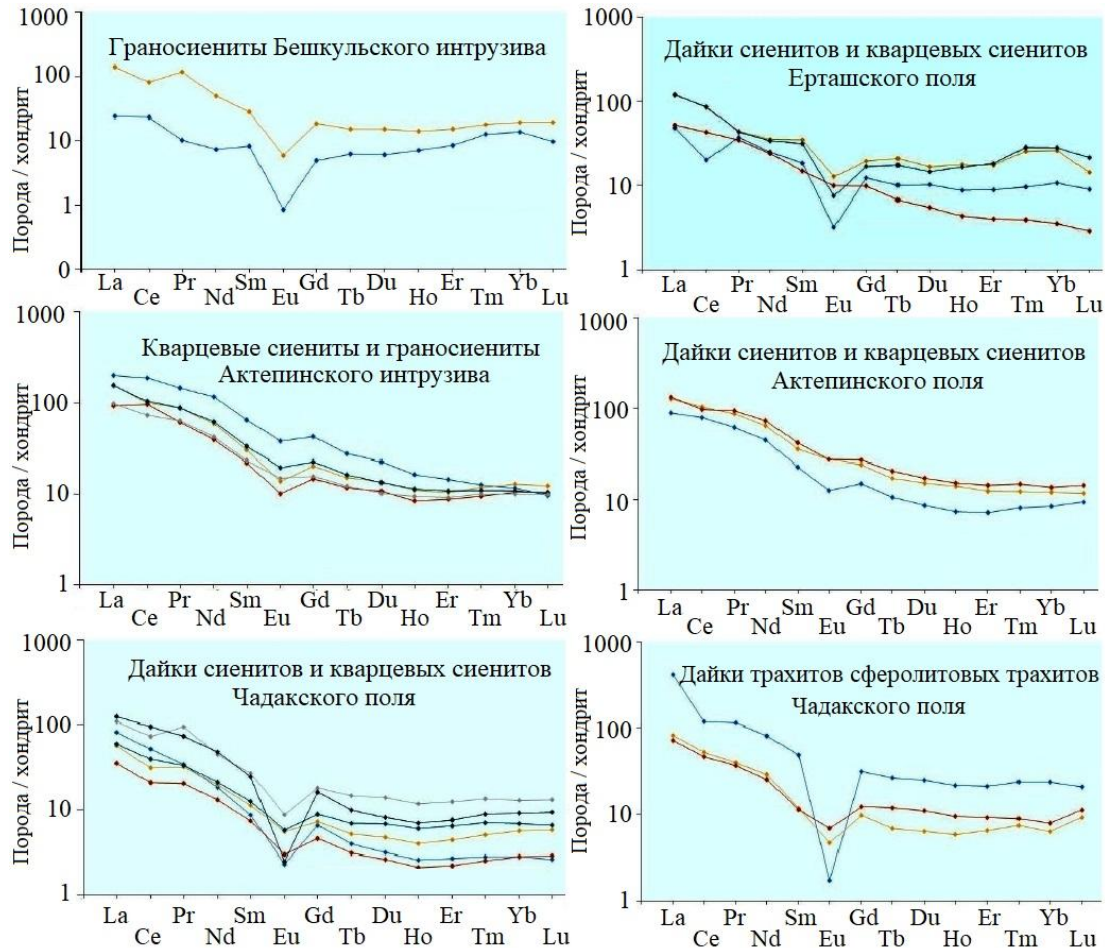


Рис. 14. Распределение редкоземельных элементов в сиенитоидных малых интрузиях и дайках Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов

## 5. Выводы

Приведены геологические, петрографические, минералогические и геохимические сведения, подтверждающие комагматичность сиенитоидных малых интрузий и даек Кумбель-Угамской зоны глубинных разломов. Они металлогенически специализированы на олово, ниобий, тантал, цирконий, редкие земли, золото, серебро. В кварцах граносиенит-порфиров выявлены микровключения само-

родного золота с примесями платиноидов, меди и молибдена. Минералы-концентраторы редких и редкоземельных элементов в сиенитоидах представлены их силикатами (циркон, ортит, чевкинит, бритолит), оксидами (касситерит, колумбит, самарскит, фергюсонит, ризерит, торит, ураноторит), фосфатами (апатит, фторапатит, ксенотим, монацит, редко рабдофанит, чёрчит), карбонатами (калькинцит, синхизит, лантанит).



## Список литературы

1. Багдасаров Ю.А., Гусев Г.С., Гушин А.В., Межеловский Н.В., Морозов А.Ф. Металлогения магматических комплексов внутриплитовых геодинамических обстановок. М.: ГЕОС. 2001. 640 с.
2. Далимов Т.Н., Ганиев И.Н. Эволюция и типы магматизма Западного Тянь-Шаня. Ташкент: Университет. 2010. 227 с.
3. Короновский Н.В., Демина Л.И. Магматизм как индикатор геодинамических обстановок. М.: МГУ. 2011. 234 с.
4. Мамарозиков У.Д. Состояние изученности проблемы внутриплитного магматизма Среднего Тянь-Шаня // Геология и минеральные ресурсы. № 1. 2017. С.19-29.
5. Barr D.A., Fox B.E., Northcote, K.E., Preto, V.A. The Alkaline Suite Porphyry Deposits // Porphyry Deposits of the Canadian Cordillera, Sutherland Brown. Canadian Institute of Mining and Metallurgy. Special V. 15. 1976. P. 359-367.
6. Cameron E.M. Alkaline magmatism at Kirkland Lake, Ontario // Geological Survey of Canada, Paper 90-1C, 1990. – P. 261-269.
7. Nie Feng-Jun, Wu Cheng-Yu. Gold deposits related to alkaline igneous rocks in North China Craton, People's Republic of China // Global Tectonics and Metallogeny. 1998. Vol. 6. P. 159-171.
8. Pirajno F., Santosh M. Rifting, intraplate magmatism, mineral systems and mantle dynamics in central-east Eurasia: An overview // Ore Geology Reviews. 2014. Vol. 63. P. 265-295.
9. Петров О.В. Тектоника и металлогения Центральной Азии и прилегающих территорий. Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ. 2008. 32 с.
10. Рудные месторождения Узбекистана // Отв. ред. И.М. Голованов. Ташкент: ИМР. 2001. 660 с.
11. Лаверов Н.П., Величкин В.И., Власов Б.П. Урановые и молибден-урановые месторождения в областях развития континентального внутрикорового магматизма: геология, геодинамические и физико-химические условия формирования. М.: ИФЗ РАН, ИГЕМ РАН. 2012. 320 с.
12. Далимов Р.Т. Геология даек Чадакско-

## References

1. Bagdasarov Yu. A., Gusev G.S., Gushchin A.V., Mezhelevskiy N.V., Morozov A.F. *Metallogeniya magmaticheskikh kompleksov vnutriplitovykh geodinamicheskikh obstanovok* [Metallogeny of magmatic complexes of intraplate geodynamic conditions.]. Moskow, GEOS, 2001. 640 p. (In Russian)
2. Dalimov T.N., Ganiyev I.N. *Evolitsiya i tipy magmatizma Zapadnogo Tyan-Shanya* [Evolution and types of magmatism of the Western Tien Shan]. Tashkent, Universitet, 2010. 226 p. (In Russian)
3. Koronovskiy N. B., Demina L.I. *Magmatizm kak indikator geodinamicheskikh obstanovok* [Magmatism as an indicator of geodynamic conditions]. Moskow, MGU, 2011. 234 p. (In Russian)
4. Mamarozikov U.D. *Sostoyaniye izuchennosti problemy vnutriplitnogo magmatizma Srednjgo Tiyen-Shana* [State of knowledge of problem of intraplate magmatism ore content of the Middle Tien-Shan]. *Geologiya va mineralniye resursy*, 2017, No 1, 2017, pp. 19-29. (In Russian)
5. Barr D.A., Fox B.E., Northcote, K.E., Preto, V.A. The Alkaline Suite Porphyry Deposits. *Porphyry Deposits of the Canadian Cordillera, Sutherland Brown. Canadian Institute of Mining and Metallurgy*, 1976, Special Vol. 15, pp. 359-367.
6. Cameron E.M. Alkaline magmatism at Kirkland Lake, Ontario. *Geological Survey of Canada, Paper 90-1C*, 1990, pp. 261-269.
7. Nie Feng-Jun, Wu Cheng-Yu. Gold deposits related to alkaline igneous rocks in North China Craton, People's Republic of China. *Global Tectonics and Metallogeny*, 1998, Vol. 6, pp. 159-171.
8. Pirajno F., Santosh M. Rifting, intraplate magmatism, mineral systems and mantle dynamics in central-east Eurasia: An overview. *Ore Geology Reviews*, 2014, Vol. 63, pp. 265-295.
9. Petrov O.V. *Tektonika i metallogeniya Tsentralnoy Azii i prilegayushchikh territoriy* [Tectonics and metallogeny of Central Asia and adjacent territories]. Sankt-Peterburg, VSEGEI, 2008. 32 p. (In Russian)
10. Rudniye mestorozhdeniya Uzbekistana

го грабена // Автореферат дис. ... канд. геолого-минеролог. наук. Ташкент. 1993. 24 с.

13. Волков В.Н., Лебедев В.А., Гольцман Ю.В., Аккелянц М.М., Голубев В.Н., Байрова Э.Д. Магматические формации и оруденение Актепинского рудного поля (Кураминский хребет, Узбекистан): последовательность образования и изотопный возраст // Геология рудных месторождений. 1999. Том 41. № 3. С. 266-280.

14. Kuno H., Hess H. Differentiation of basalt magmas // Basalts: The Poldervaart treatise on rocks of basaltic composition. N.Y.: Interscience, 1968. Vol. 2. P. 623-688.

15. Maniar, P. D. & Piccoli, P. M. Tectonic discriminations diagrams of granitoids // Geological Society of America Bulletin. 1989. Vol. 101. P. 635-643.

16. Batchelor, R. A. & Bowden, P. (1985). Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters // Chemical Geology. 1985. Vol. 48. P. 43-55.

17. Конеев Р.И. Наноминералогия золотая эпитеpmальных месторождений Чаткало-Кураминского региона (Узбекистан). СПб: DELTA. 2006. 220 с.

18. Brimhall G.H., Crerar D.A. Ore fluids: magmatic to supergene. // Reviews in mineralogy. 1987. Part 17. P. 235-321.

19. Roeder E. Natural occurrence and significance of fluids indicating high pressure and high temperature. In: Chemistry and geochemistry of solutions at high temperature and pressure. N.Y. 1981. No. 4. P. 9-35.

20. Борисенко А.С., Боровик А.А., Житова Л.М., Павлова Г.Г. Состав магматогенных флюидов, факторы их геохимической специализации и металлоносности // Геология и геофизика. 2006. Том 47. №12. С. 1308-1325.

21. Возняк Д.К., Квасница В.Н. Необычные включения минералообразующие среды – включения раскристаллизованного солевого расплава // Геохимия. 1988. №11. С. 1661-1665.

22. Мамарозиков У.Д. Рудогенерирующие флюидные микрообособления во внутриплитных магматических и постмагматических образованиях месторождений Au-Ag Восточного Узбекистана // Материалы

[Ore deposits of Uzbekistan]. Responsible ed. Golovanov I.M. Tashkent, IMR, 2001. 660 p. (In Russian)

11. Laverov H.P., Velichkin V.I., Vlasov B.P. Uranoviye i molibden-uranoviye mestorozhdeniya v oblastiakh razvitiya kontinentalnogo vnutrikorovogo magmatizma: geologiya, geodinamicheskiye i fiziko-khimicheskiye usloviya formirovaniya [Uranium and molybdenum-uranium deposits in the areas of development of continental intracrustal magmatism: geology, geodynamic and physicochemical conditions of formation]. Moskow, IFZ RAN, IGEM RAN, 2012. 320 p. (In Russian)

12. Dalimov R.T. Geologiya dayek Chadakskogo grabena [Geology of dikes of the Chadak graben]. Avtoreferat of Diss. Cand. Sci. Tashkent. 1993. 24 p. (In Russian)

13. Volkov V.N., Lebedev V.A., Goltzman Yu.V., Arakelyants M.M., Golubev V.N., Bairova E.D. Magmatic associations and ore mineralization of the Aktepe ore field (Kuraminsk ridge, Uzbekistan): formation sequence and isotope age. *Geology of ore deposits*, 1999, Vol. 41, No 3, pp. 238-251. (In Russian)

14. Kuno H. Differentiation of basalt magmas. Basalts: The Poldervaart treatise on rocks of basaltic composition. N.Y, Interscience, 1968, Vol. 2, pp. 623.

15. Maniar, P. D. & Piccoli, P. M. Tectonic discriminations diagrams of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, Vol. 101, pp. 635-643.

16. Batchelor R.A., Bowden P. Petrogenetic interpretation of rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology*, 1985, No. 48, pp. 43-55.

17. Koneev R.I. Nanomineralogiya zolotaya epitermalnikh mestorozhdeniy Chatkalo-Kuraminskogo regiona (Uzbekistan) [Nanomineralogy of gold in the epithermal deposits of Chatkal-Kurama region (Uzbekistan)]. Sankt-Peterburg, DELTA, 2006. 220 p. (In Russian)

18. Brimhall G.H., Crerar D.A. Ore fluids: magmatic to supergene. *Reviews in mineralogy*, 1987, Part 17, pp. 235-321.

19. Roeder E. Natural occurrence and sig-

XVII Всероссийской конференции по тер-  
мобарогеохимии. Улан-Удэ, ГИН СО РАН.  
2016. С. 97-100.

23. Рябчиков И.Д., Хамилтон Д.Л. О  
возможности отделения концентрирован-  
ных хлоридных растворов в ходе кристал-  
лизации кислых магм // Доклады АН СССР.  
1971. Том 197. №4. С. 933-936.

24. Виноградов А.П. Средние содержа-  
ния химических элементов в главных типах  
изверженных пород земной коры // Геохи-  
мия. 1962. № 7. С. 555-571.

† significance of fluids indicating high pressure and  
† high temperature. In: *Chemistry and geochem-  
† istry of solutions at high temperature and pres-  
† 20 sure*, N.Y., 1981, No 4, pp. 9-35.

† 20 Borisenko A.S., Borovikov A.A.,  
† Zhitova L.M., and Pavljva G.G. Composition  
† of magmatogene fluids and factors determing  
† their geochemistry and metal contents. *Russian  
† Geology and Geophysics*, 2006, Vol. 47, No.  
† 12, pp. 1308-1325. (In Russian)

† 21. Voznyak D.K., Kvasnitsa V.N.  
† Neobichniye vklucheniya  
† mineraloobrazuyushchiye sredi – vklucheniya  
† raskristallizovannogo solevogo rasplava [Unu-  
† usual inclusions mineral-forming media - inclu-  
† sions of crystallized salt melt]. *Geokhimiya*,  
† 1998, No. 11, pp. 1661-1665. (In Russian)

† 22. Mamarozikov U.D.  
† Rudogeneriyushchiye fluyudniye  
† mikroobosobleniya vo vnutriplitnikh  
† magmaticeskikh i postmagmaticeskikh  
† obrazovaniyakh mestorozhdeniy Au-Ag  
† Vostochnogo Uzbekistana [Ore-generating flu-  
† id micro-segregations in intraplate magmatic  
† and post-magmatic formations of Au-Ag de-  
† posits of East Uzbekistan]. *Materiyaly XVII  
† Vserossiyskogo konferensii po  
† termobarogeokhimii*. Ulan-Ude, GIN SO RAN,  
† 2016, pp. 97-100. (In Russian)

† 23. Ryabchikov I.D., Khamilton D.L. O  
† vozmozhnosti otdeleniya konsentrirovannykh  
† khloridnykh rastvorov v khode kristallizatsii  
† kislykh magm [On the possibility of separating  
† concentrated chloride solutions during crystal-  
† lization of acidic magmas]. *Doklady AN SSSR*,  
† 1971, Vol. 197, No 4, pp. 933-936. (In Rus-  
† sian)

† 24. Vinogradov A.P. *Sredniye  
† sodержaniya khimicheskikh elementov  
† vglavnikh tipakh izverzhennikh porod zemnoy  
† kory* [The average contents of chemical ele-  
† ments in the main types of igneous rocks of the  
† earth's crust]. *Geokhimiya*, 1962, No. 7, pp.  
† 555-571. (In Russian)

Сетевое издание  
**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК**  
Брянского государственного университета

**ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ / ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ /  
НАУКИ О ЗЕМЛЕ**

**Учредитель и издатель:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского».

**Свидетельство о регистрации средства массовой информации  
выдано Федеральной службой по надзору  
в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций  
Эл № ФС77-62798 от 18 августа 2015 г.**

**Главный редактор сетевого издания:**

доктор технических наук, профессор  
А.В. Лагереv

**Адрес учредителя:**

ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет  
имени академика И.Г. Петровского»  
241036, Россия, Брянск, ул. Бежицкая, д. 14

**Адрес редакции и издателя:**

РИСО ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет  
имени академика И.Г. Петровского»  
241036, Россия, Брянск, ул. Бежицкая, д. 20

Дата размещения сетевого издания в сети Интернет  
на официальном сайте <http://www.ntv-brgu.ru> 25.12.2020 г.