

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 328, № 11, 2017

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА.  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

**Редакционная коллегия**

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)  
Рихванов Л.П., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)  
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)  
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)  
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)  
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Шварцев С.Л., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)  
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Коробочкин В.В., д-р техн. наук (Россия)  
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)  
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)  
Тойпель У., Dsc (Германия)  
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)  
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)  
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)  
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)  
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)  
Руи Д., PhD (Португалия)  
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)  
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)  
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)  
Кирыанова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)  
Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия)

Входит в Перечень ВАК РФ – ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2017

**УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!**

Журнал «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» – рецензируемый научный журнал, издающийся с 1903 года.

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – Свидетельство ПИ № ФС 77-65008 от 04.03.2016 г.

ISSN (print) – 2500-1019  
ISSN (on-line) – 2413-1830

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ за 2015 г. – 0,339  
(без самоцитирования – 0,287)

«Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» публикует оригинальные работы, обзорные статьи, очерки и обсуждения, охватывающие последние достижения в области геологии, разведки и добычи полезных ископаемых, технологии транспортировки и глубокой переработки природных ресурсов, энергоэффективного производства и преобразования энергии на основе полезных ископаемых, а также безопасной утилизации геоактивов.

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке энергоресурсов, ИТ-специалистов, а также ученых других смежных областей. Тематические направления журнала «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов»:

- Прогнозирование и разведка георесурсов
- Добыча георесурсов
- Транспортировка георесурсов
- Глубокая переработка георесурсов
- Энергоэффективное производство и преобразование энергии на основе георесурсов
- Безопасная утилизация георесурсов и вопросы геоэкологии
- Инженерная геология Евразии и окраинных морей.

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях.

Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят закрытое (слепое) рецензирование.

Автор статьи имеет право предложить двух рецензентов по научному направлению своего исследования.

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com)

**BULLETIN  
OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY  
GEO ASSETS ENGINEERING**

Volume 328, № 11, 2017

**BULLETIN  
OF THE TOMSK  
POLYTECHNIC  
UNIVERSITY.  
GEO ASSETS ENGINEERING**

**Editorial Board**

Semiletov I.P., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)  
Rikhvanov L.P., Dr. Sc. (Russia)  
Ostvald R.V., Cand. Sc. (Russia)  
Savichev O.G., Dr. Sc. (Russia)  
Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)  
Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)  
Kontorovich A.E., Dr. Sc. (Russia)  
Shvartsev S.L., Dr. Sc. (Russia)  
Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)  
Silkin V.M., PhD (Spain)  
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)  
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)  
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)  
Korobochkin V.V., Dr. Sc. (Russia)  
Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)  
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)  
Teipel U., Dsc (Germany)  
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)  
Ilyin A.P., Dr. Sc. (Russia)  
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)  
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)  
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)  
Alekseenko S.V., Dr. Sc. (Russia)  
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)  
Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia)  
Rui D., PhD (Portugal)  
Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (South Korea)  
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)  
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)  
Kiryanova L.G., managing editor, Cand. Sc. (Russia)  
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)

© Tomsk Polytechnic University, 2017

**AIMS AND SCOPES**

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering is peer-reviewed journal owned by Tomsk Polytechnic University.

The journal was founded in 1903.

The journal is registered internationally (ISSN 2413-1830) and nationally (Certificate PE no. FM 77-65008, March 04, 2016 from the RF Ministry of Press, Broadcasting and Mass Communications).

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

The journal publishes research papers in the field defined as "life cycle of georesources". It presents original papers, reviews articles, rapid communications and discussions covering recent advances in geology, exploration and extraction of mineral resources, transportation technologies and deep processing of natural resources, energy-efficient production and energy conversion based on mineral resources as well as on safe disposal of geo assets.

The journal will be of interest to geologists, chemists, engineers, physicists, ecologists, power engineers, specialists in storage and transportation of energy resources, IT specialists as well as to other specialists in the related fields.

Scope of the journal issue "Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering" in accordance with Geo Assets (GA) strategy includes:

- Geo Assets Exploration and Refining;
- Geo Assets Mining;
- Geo Assets Transportation;
- Geo Assets Deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets and questions Geoecology;
- Geo-engineering of Eurasia and marginal sea.

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering publishes only original research articles. All articles are peer reviewed by international experts. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication. Authors are advised to suggest 2 potential reviewers who are familiar with the research focus of the article. Final decision on any paper is made by the Editor in Chief.

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering is published monthly.

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on  
[www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com).

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

- Геотермическая зональность Предъенисейского осадочного бассейна**  
Дульцев Ф.Ф., Новиков Д.А. **6**
- Магматизм и оруденение Мурзинского золоторудного поля (Горный Алтай)**  
Гусев А.И., Табакаева Е.М. **16**
- Погашение выработанного пространства изоляцией с сохранением земной поверхности**  
Голик В.И., Разоренов Ю.И. **30**
- Особенности элементного состава воды объектов водопользования, расположенных на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона**  
Есильканов Г.М., Лукашенко С.Н., Рихванов Л.П., Койгельдинова М.Т., Мухамедияров Н.Ж., Шакинов Е.З., Темиржанова А.Е., Яковенко Ю.Ю. **39**
- Оценка ведущих факторов эволюции подземной гидросферы урбанизированных территории (на примере г. Иркутска)**  
Лоншаков Г.С., Аузина Л.И. **50**
- О применимости СВч-печей для определения влажности грунтов**  
Крамаренко В.В., Никитенков А.Н., Молоков В.Ю. **60**
- Изучение смачивания алюминиевой и стальной подложек полиорганосилоксанами в присутствии азотсодержащих поверхностно-активных веществ**  
Тюканько В.Ю., Дюрягина А.Н., Островной К.А., Демьяненко А.В. **75**
- Нелинейная динамика микроэлектромеханических систем резонаторов в виде прямоугольных в плане сферических оболочек с учетом геометрической и физической нелинейности**  
Мицкевич С.А., Жигалов М.В., Захарова А.А., Крысько В.А. **83**
- Результаты поисково-разведочных работ на полиметаллы методами электроразведки с контролируемыми источниками в районе Рудного Алтая**  
Бабушкин С.М., Егоров А.Н., Неведрова Н.Н., Шапаренко И.О. **97**
- Комплексный анализ результатов инженерных изысканий для проектирования, строительства и эксплуатации сооружений на территориях со склоновыми процессами**  
Конюшков В.В., Веселов А.А., Кондратьева Л.Н. **111**
- Оценочные исследования тягового асинхронного электродвигателя с пониженным напряжением питания для рудничного электровоза**  
Арсентьев О.В., Баранов П.Р., Вильнин А.Д., Кладиев С.Н. **126**
- Geothermal zonality of fore-Yenisei sedimentary basin**  
Dultsev F.F., Novikov D.A. **6**
- Magmatism and ore deposits of Murzinskoe gold ore field (Gorny Altai)**  
Gusev A.I., Tabakaeva E.M. **16**
- Goaf filling with isolation preserving earth surface**  
Golik V.I., Razorenov Yu.I. **30**
- Peculiarities of water elemental composition at water use objects located at the territory of the former Semipalatinsk test site**  
Yessilkanov G.M., Lukashenko S.N., Rikhvanov L.P., Koygeldinova M.T., Mukhamediyarov N.Zh., Shakenov E.Z., Temirzhanova A.E., Yakovenko Yu.Yu. **39**
- Evaluation of determining factors of underground hydrosphere evolution within urban areas (on the example of Irkutsk)**  
Lonshakov G.S., Auzina L.I. **50**
- Application of microwave method for determining soil moisture**  
Kramarenko V.V., Nikitenkov A.N., Molokov V.Yu. **60**
- Study of wetting of aluminum and steel substrates with polyorganosiloxanes in the presence of nitrogen-containing surfactants**  
Tyukanko V.Yu., Duryagina A.N., Ostrovnoy K.A., Demyanenko A.V. **75**
- Nonlinear dynamics of microelectromechanical system resonators in the form of rectangular-plan spherical shells taking into account geometrical and physical non-linearity**  
Mitskevich S.A., Zhigalov M.V., Zakharova A.A., Krysko V.A. **83**
- Results of polymetals search-exploration investigations using electrical surveying methods with controlled sources in Gorny Altai**  
Babushkin S.M., Egorov A.N., Nevedrova N.N., Shaparenko I.O. **97**
- Comprehensive analysis of the results of engineering surveys for design, construction and exploitation of structures in the areas with landslide processes**  
Konyushkov V.V., Veselov A.A., Kondratyeva L.N. **111**
- Evaluative research of induction traction electric motor with low-level power supply or mine locomotive**  
Arsentiev O.V., Baranov P.R., Vilnin A.D., Kladiev S.N. **126**

УДК 553.981/982:551.24.054

## ГЕОТЕРМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ПРЕДЪЕНИСЕЙСКОГО ОСАДОЧНОГО БАССЕЙНА

Дульцев Федор Федорович<sup>1</sup>,  
DultsevFF@ipgg.sbras.ru

Новиков Дмитрий Анатольевич<sup>1,2</sup>,  
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

<sup>2</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

*Актуальность работы связана с тем, что пластовые температуры являются одним из основных факторов, контролирующих степень преобразованности рассеянного органического вещества горных пород, газо- и нефтеобразования, формирования и сохранения залежей углеводородов. Именно от температуры зависят физико-химические свойства и фазовое состояние газов, нефти и воды в пластовых условиях. Верхнедевонско-палеозойские отложения Предъенисейского осадочного бассейна рассматриваются в последние годы как один из возможных объектов для прироста ресурсной базы углеводородов в пределах Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. В настоящее время изучаемый регион крайне слабо изучен бурением, поэтому в настоящей работе предложена геотермическая модель, показывающая характер изменения пластовых температур с глубиной и позволяющая прогнозировать тенденции изменения температуры на труднодоступных объектах, слабо обеспеченных фактическими данными.*

**Цель работы:** выявление геотермических особенностей верхнедевонско-палеозойских отложений Предъенисейского осадочного бассейна; районирование и составление геотермической модели осадочного выполнения бассейна.

**Методы исследования.** Рассчитаны геотермические параметры геологического разреза, выполнено геотермическое районирование территории по величине геотермического градиента. С использованием структурных карт по основным стратиграфическим горизонтам и регрессионных зависимостей геотермических параметров с глубиной с использованием специализированных программных пакетов GridBuilder и GridMaster, а также GS Surfer были созданы сеточные модели (Grid).

**Результаты.** Установлено, что как по формационному составу, так и по своим геотермическим условиям разрез верхнедевонско-палеозойских отложений Предъенисейского осадочного бассейна сопоставимы с западными районами Сибирской платформы и характеризуются пониженными геотермическими градиентами (1,25–2,55 °C/100 м). Впервые составлена детальная геотермическая модель осадочного выполнения бассейна, позволяющая прогнозировать геотермические условия недр.

### Ключевые слова:

Предъенисейский осадочный бассейн, геотермическая зональность, геотермический градиент, пластовые температуры, геотермическая модель.

### Введение

Предъенисейский осадочный бассейн (ПОБ), расположенный в юго-восточной части Западной Сибири и представляющий собой верхнепротерозойско-нижнепалеозойский комплекс чехольных образований выделенного здесь Касско-Туруханского микроконтинента, погруженных под мезозойско-кайнозойские осадки Западно-Сибирской геосинеклизы, в последние годы рассматривается как один из перспективных регионов прироста ресурсов углеводородов (УВ) в Сибири [1, 2] (рис. 1). Изучаемый регион характеризуется переходным типом кембрийских отложений: с запада на восток бессолевого тип разреза меняется на соленосный, характерный для хорошо изученных районов запада Сибирской платформы [3, 4].

Надо отметить, что по геологическому строению и условиям седиментации Предъенисейский бассейн очень близок с неопротерозойско-нижнепалеозойским Сычуанским осадочным бассейном (Южно-Китайская платформа), где китайскими геологами недавно были открыты гигантские газовые месторождения [5, 6]. Существенным отличием (с точки зрения потенциальной нефтегазоносности)

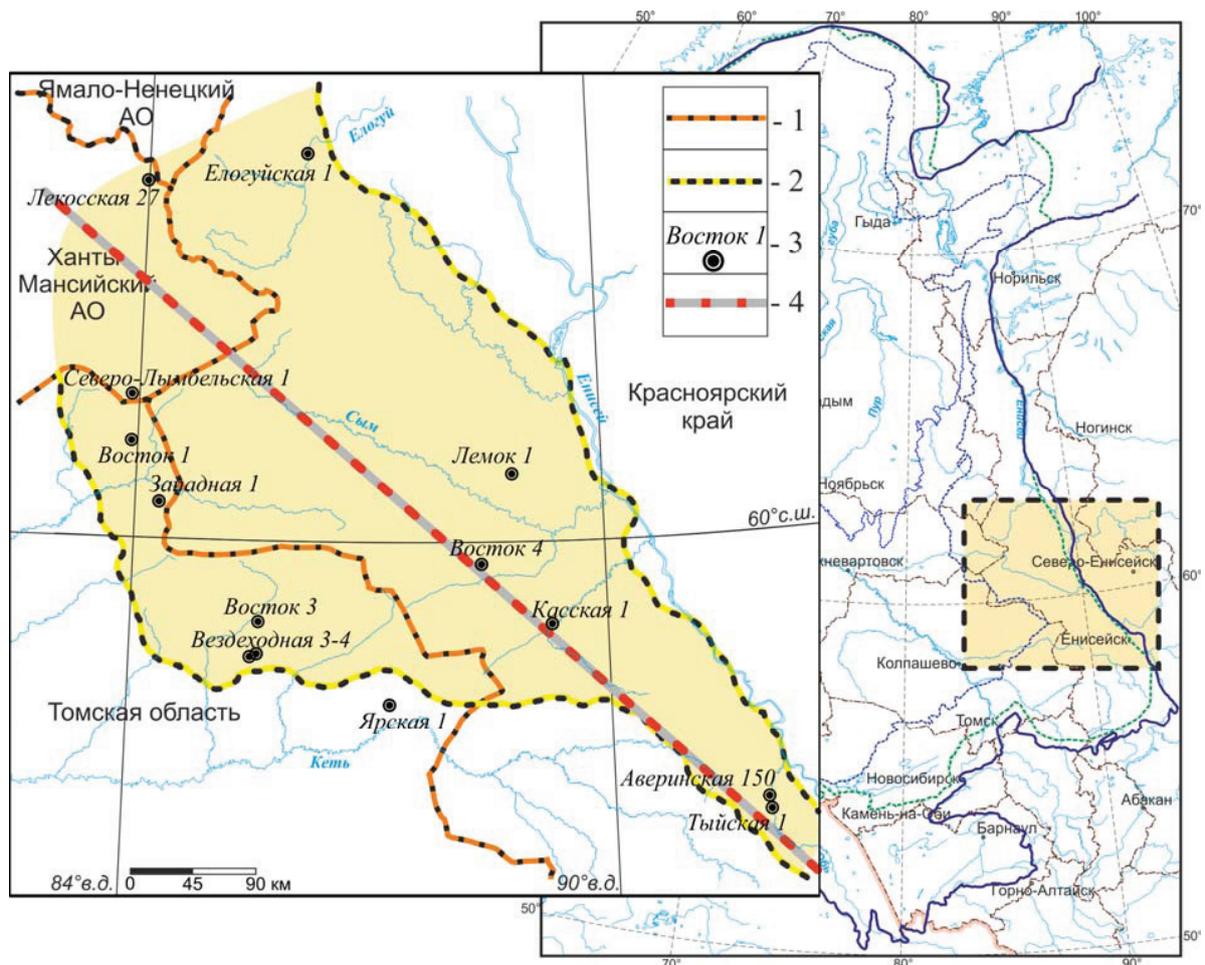
является лишь то, что синийские и нижнекембрийские нефтематеринские комплексы последнего (формации Доушаньто и Дэнъин, Цюнчжусы и Майдипин) испытали погружение и достигли зоны нефтеобразования лишь в триасовое и юрское время [5]. При этом перекрывающие их нижнепалеозойские карбонатные (рифогенные) толщи, в которых образовались скопления сгенерированных (и мигрированных) углеводородов, не были денудированы в последующие эпохи, а лишь испытали складчатые деформации. В Предъенисейском процессе генерации проходили уже в венде и раннем палеозое, при этом в триасе потенциальные залежи могли быть подвергнуты масштабной деструкции, а большая часть палеозойского разреза на поднятиях денудирована [2].

Пластовые температуры являются одним из основных факторов, определяющих степень реализации нефтегазогенерационного потенциала: преобразованности рассеянного органического вещества горных пород, протекания процессов газо- и нефтеобразования, миграции, аккумуляции и деградации УВ. С 1960-х гг. в мире активно развивается направление по изучению геотермических особен-

ностей осадочных бассейнов [7–10], применение геотермических данных и изучении гидродинамических особенностей разреза [11]. Велика роль геотермического блока исследований при реализации проектов альтернативной энергетики, связанных с термальными водами [12–15]. От температуры зависят физико-химические свойства и фазовое состояние газов, нефти и воды в пластовых условиях [16, 17]. Геотермические исследования в Западной Сибири ведутся более 60 лет. За этот период выполнено значительное число исследований, как теоретического характера, так и с целью прикладного использования геотермической информации для решения различных проблем гидрогеологии, тектоники и нефтяной геологии региона. Их результаты отражены в многочисленных трудах Г.Д. Гинсбурга, А.Д. Дучкова, Ю.Г. Зимина, Л.М. Зорькина, А.Э. Конторовича, В.А. Кошляка, Н.М. Кругликова, А.Р. Курчикова, Б.Ф. Маврицкого, И.И. Нестерова, Б.П. Ставицкого, Э.Э. Фотиади, Г.А. Череманского и многих других исследова-

телей. Первые региональные карты температур осадочного чехла на всю территорию Западно-Сибирского бассейна были построены в 1967 г. Ю.Г. Зиминим, А.Э. Конторовичем, Л.И. Швыдкой. Позднее такие построения выполнялись неоднократно (В.И. Ермаков, А.Э. Конторович, Н.М. Кругликов, Б.П. Ставицкий, В.А. Скоробогатов, и др.). Наиболее полные сводки содержатся в многочисленных работах А.Э. Конторовича, А.Р. Курчикова, И.И. Нестерова и других.

Изученность геотермических условий ПОБ крайне неоднородна. С начала 2000-х гг. в его пределах был реализован проект параметрического бурения «Восток», в результате которого было пробурено три скважины: Восток-1, Восток-3 и Восток-4, и вскрыты глубоководные горизонты верхнепротерозойских и нижнепалеозойских отложений. Новые геотермические материалы вместе с проведенными ранее исследованиями [18, 19] с обобщением геологоразведочных работ прошлых лет позволили по-новому взглянуть на геотермиче-



**Рис. 1.** Местоположение района исследований в пределах Западной Сибири. Границы: 1 – административные; 2 – Предьенисейского осадочного бассейна; 3 – название поисковой площадки и номер скважины; 4 – линия геотермического разреза (рис. 4)

**Fig. 1.** Location of the studied area within West Siberia. 1 are the administrative boundaries; 2 are the basin limits; 3 are the key wells; 4 is the geothermal section line (Fig. 4)

ские особенности недр изучаемого региона и впервые составить ее геотермическую модель. Фактический материал по Предъенисейскому бассейну и прилегающим территориям представлен результатами испытаний в 197 объектах 56 глубоких скважин, а также данными термометрии (ГИС), выполненной в рамках проекта «Восток». При геотермических исследованиях был привлечен весь имеющийся фактический материал по результатам испытания скважин южной части Западно-Сибирского осадочного бассейна.

В настоящем исследовании решались три задачи в соответствии с целями исследования – построение комплекта карт пластовых температур, построение карт геотермических градиентов и составление геотермической модели. При составлении карт пластовых температур по основным стратиграфическим уровням была принята методика, основы которой были заложены А.Э. Конторовичем, А.Р. Курчиковым, И.И. Нестеровым, Б.П. Ставицким в 60–70-е гг. прошлого столетия. Был создан банк всех имеющихся геотермических материалов, и выполнена их разбровка по степени достоверности. На основе имеющихся материалов были рассчитаны геотермические параметры (геотермический градиент и ступень) геологического разреза, которые были положены в основу геотермического районирования территории по величине геотермического градиента. Далее с использованием структурных карт по основным стратиграфическим горизонтам [1, 20] и регрессионных зависимостей геотермических параметров с глубиной были созданы сеточные модели (Grid) с использованием специализированных программных пакетов GridBuilder и GridMaster (разработка В.А. Лапковского, ИНГГ СО РАН), а также GS Surfer. Финальная корректировка карт современных температур пород мезозоя, палеозоя и верхней части протерозоя проводилась с учетом фактических замеров в скважинах.

Результаты проведенных в последние годы геолого-геофизических исследований (в том числе в рамках подпрограммы «Восток» разработанной в 2004 г. под руководством А.Э. Конторовича) свидетельствуют о том, что в левобережье Енисея на юго-востоке Западной Сибири под мезозойскими отложениями получил развитие мощный Предъенисейский неопротерозойско-нижнепалеозойский осадочный бассейн (рис. 1) [1]. Площадь его наиболее изученной южной части составляет около 190 тыс. км<sup>2</sup>, а объем осадочного выполнения – около 1 млн км<sup>3</sup>. Благодаря этим работам была существенно уточнена и детализирована геологическая модель, стратиграфия и геодинамическая эволюция бассейна [1, 2, 20–23].

#### Результаты исследований и их обсуждение

В структуре геотермического поля в основании осадочного чехла Западной Сибири установлена определенная геотермическая зональность. При детальном анализе выявлено несколько геотерми-

ческих зон, которые имеют непосредственную связь с возрастом консолидации доюрских комплексов Западно-Сибирской плиты. На одной из первых схем, составленной Н.Н. Ростовцевым с соавторами [24], выделены структурно-тектонические зоны, прошедшие разновозрастные эпохи складчатости: байкальскую, салаирскую, каледонскую и герцинскую. Также на схеме показаны докембрийские жесткие массивы, существование которых предполагается по геофизическим данным. Позже в работах В.С. Суркова с соавторами [25] была выделена приуральская область складчатости как продолжение структур Горного Урала, погребенных под чехлом Западно-Сибирской геосинеклизы, то есть восточная часть уралид (уральская ветвь герцинид). В этой же работе на основании геологических и геофизических материалов были установлены особенности строения основных структурно-тектонических зон и доказано существование мегацикличности в эволюции земной коры Западной Сибири (чередование деструктивной и конструктивной стадий).

Анализ показал, что по величине геотермического градиента Предъенисейский осадочный бассейн характеризуется пониженными значениями геотермического градиента (1,25–2,55 °С/100 м) по сравнению с центральными и в большей степени западными районами Западно-Сибирской геосинеклизы (рис. 2, а).

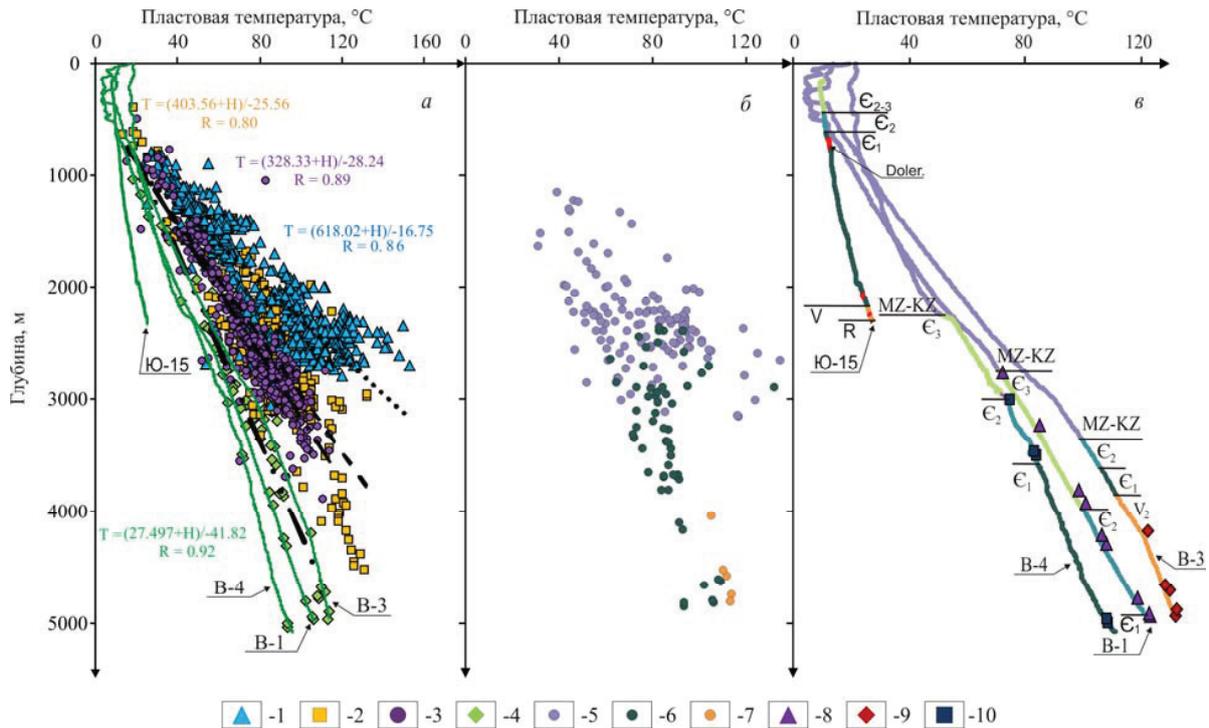
**Таблица.** Геотермическая характеристика Предъенисейского осадочного бассейна

**Table.** Geothermal characteristics of the Fore-Yenisei sedimentary basin

Стратиграфический интервал Stratigraphic level	Западные районы West region				Восточные районы East region			
	Тпл/Trpl, °С		Г/Gr, °С/100 м (м)	G, м (м)/°С	Тпл/Trpl, °С		Г/Gr, °С/100 м (м)	G, м (м)/°С
	от from	до to			от from	до to		
мезозой mesozoic	45	86	2,55	39,28	19	44	2,43	41,22
верхний кембрий upper cambrian	44	86	2,39	41,83	44	68	2,23	44,93
средний кембрий middle cambrian	68	104	2,24	44,68	68	74	1,62	61,78
нижний кембрий lower cambrian	74	95	1,93	51,83	74	95	1,52	65,60
верхний венд vendian	96	103	1,81	55,20	•	•	•	•
верхний неопротерозой–нижний венд upper neoproterozoic–low vendian	103	113	1,25	79,94	•	•	•	•

«•» отсутствие данных/lack of data

В разрезе осадочного чехла обособляются две геотермические зоны: мезозойская часть разреза является наиболее разогретой, а верхнепротерозойская – холодной (таблица, рис. 2, б). Для мез-



**Рис. 2.** Типы вертикальной геотермической зональности ряда геологических структур Западной Сибири и прилегающих районов Сибирской платформы (а), Предьенисейского осадочного бассейна (б) и изменение пластовых температур с глубиной в скважинах: Восток-1, Восток-3, Восток-4 и Юрубченская-15 (Сибирская платформа) (в). Замеры пластовых температур в пределах районов Западной Сибири: а) 1 – западных; 2 – юго-восточных; 3 – центральных; 4 – Предьенисейского осадочного бассейна; б) 5 – мезозоя, 6 – палеозоя, 7 – верхнего протерозоя; в) точечных замеров в скважинах: 8 – Восток-1; 9 – Восток-3; 10 – Восток-4

**Fig. 2.** Vertical geothermal patterns of: a) geologic structures in West Siberia and Siberian Craton adjacent areas; b) study area; c) change in formation temperatures with depth in the wells: Vostok-1, 3, 4 and Yurubchenskaya-15 (Siberian Craton). Formation temperature survey in the regions of West Siberia: a) 1 – western, 2 – southeastern, 3 – central, 4 – Fore-Yenisei sedimentary basin; b) 5 – Mesozoic, 6 – Paleozoic, 7 – Upper Proterozoic; c) spot measurements in the wells: 8 – Vostok-1, 3, 4

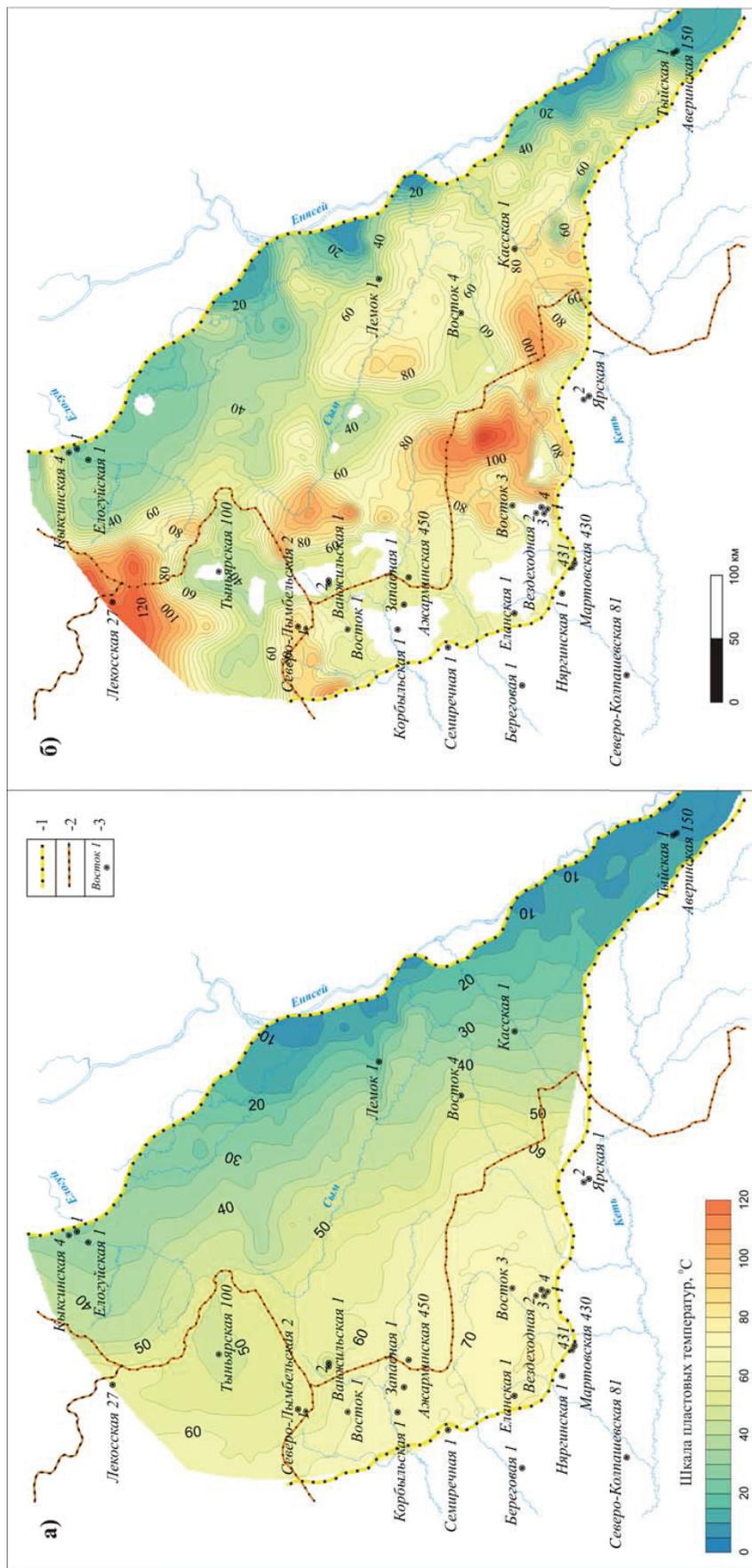
озойских отложений геотермические градиенты варьируют в интервале 2,20–2,55 °С/100 м. С глубиной их величина существенно снижается от 2,23–2,39 °С/100 м в отложениях верхнего кембрия до 1,25–1,81 °С/100 м – в венде.

Латеральное распределение пластовых температур и характеристик геотермического поля также подчиняется определённым закономерностям. Так, для положительных структур в западной части осадочного бассейна отмечаются повышенные значения геотермических градиентов, составляющие до 2,55 °С/100 м в мезозое и до 1,93 °С/100 м в отложениях нижнего кембрия. Другая зона, расположенная в центральной части бассейна, характеризуется пониженными значениями градиентов до 2,43 °С/100 м в мезозойской части разреза и до 1,52 °С/100 м в нижнем кембрии. В восточном направлении происходит значительное снижение величин теплового потока и характеристик геотермического поля.

В целом регион характеризуется переходным типом геотермического разреза между Западно-Сибирским и Тунгусским (Сибирская платформа) осадочными бассейнами. Этот факт подтверждается новыми геотермическими данными по скважи-

нам проекта «Восток», что значительно повышает достоверность нашей геотермической модели (рис. 2, в).

Для мезозойских отложений западных районов бассейна пластовые температуры изменяются от 45 до 86 °С, снижаясь до 19–45 °С в восточных (рис. 3, а). Геотермические градиенты варьируют от 2,55–2,95 °С/100 м в районе скважин Восток-1 и Восток-3 до 2,25–2,43 °С/100 м в районе скважины Восток-4. Для отложений верхнекембрийского уровня пластовые температуры варьируются от 44 до 90 °С и 44–70 °С соответственно (рис. 3, б). Геотермические градиенты снижаются от 2,4 °С/100 м на востоке бассейна до 2,2 °С/100 м на западе. Для среднекембрийских отложений также наблюдается тенденция уменьшения пластовых температур от 65–100 °С до 58–75 °С с запада к осевой части бассейна и геотермических градиентов от 2,2 до 1,6 °С/100 м соответственно. Анализ пластовых температур нижнекембрийского уровня показывает уменьшение геотермического градиента к подошве до значений 1,9 °С/100 м в районе скважин Северо-Лымбельской-2 и Вездеходной-4 и до 1,5 °С/100 м в районе скважин Аверинской-150 и Восток-4.



**Рис. 3.** Карты пластовых температур в кровле баженовской свиты (верхняя юра) (а) и подошве пыжинской свиты (верхний кембрий) (б). Границы: 1 – Предьенисейского осадочного бассейна, 2 – административные; 3 – название площадей и номер скважины  
**Fig. 3.** Maps of formation temperature at the top of the Bazhenov Formation (a) and bottom of the Pyzhino Formation (b). Boundaries of: 1 – Fore-Yenisei sedimentary basin; 2 – administrative; 3 – areas and well numbers

Глубокозалегающие толщи венда и верхнего протерозоя характеризуются еще более низкими градиентами. Для вендских отложений значения пластовых температур в западной части ПОБ варьируют в интервале от 95 до 105 °С, а геотермический градиент составляет 1,7–1,8 °С/100 м. Для восточных районов геотермические данные, характеризующие позднепротерозойские образования, отсутствуют, но на основе наших прогнозов, базирующихся на геотермической модели, можно ожидать величины геотермических градиентов в интервале 1,4–1,8 °С/100 м. Для отложений позднего неопротерозоя–венда в районе скважин Восток-1, Восток-3, Вездеходных 1, 2, 3, 4 и Северо-Лымбельской-2 геотермические градиенты изменяются в пределах 1,2–1,4 °С/100 м, а значения пластовых температур достигают 110–120 °С.

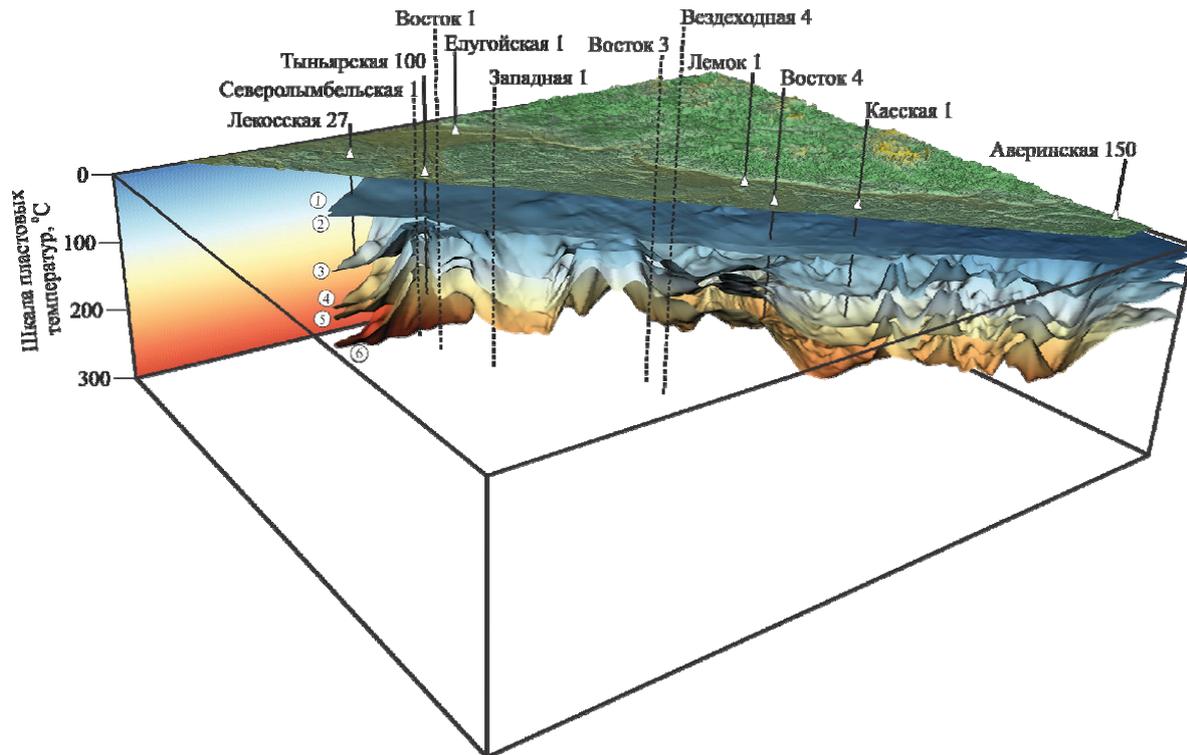
На базе структурных построений, геотермического районирования, полученных регрессионных зависимостей вариаций пластовых температур с глубиной (основная:  $T = -(27,497 + H)/41,82$ ) и другие) с использованием программных пакетов GridBuilder, GridMaster и Surfer были созданы сеточные модели (Grid) распределения пластовых температур по основным стратиграфическим уровням: 1) кровля баженовской свиты (поздняя юра),

2) подошва юрских отложений, 3) подошва пыжинской свиты (верхний кембрий), 4) кровля усольской (оксымской) свиты (нижний кембрий), 5) кровля тэтэрской (райгинской) свиты (граница кембрия и венда) и 6) подошва верхнепротерозойско-палеозойских субплатформенных отложений). Полученные сеточные модели были сведены в единую геотермическую модель Предъенисейского осадочного бассейна (рис. 4).

#### Заключение

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о весьма сложной структуре геотермического поля Предъенисейского осадочного бассейна, геотермические характеристики которого зависят от нескольких факторов, в первую очередь от особенностей геологического строения, его вещественного состава, геодинамической истории и т. д. Во-вторых, большое влияние оказывает отопляющее воздействие межпластовых перетоков подземных вод из более погруженных горизонтов в тектонически нарушенных зонах.

При анализе геотермического материала выявлена тенденция значительного уменьшения теплового потока и характеристик геотермического поля в направлении от западных районов к восточ-



**Рис. 4.** Геотермическая модель Предъенисейского осадочного бассейна. Основные стратиграфические горизонты: 1 – кровля баженовской свиты (верхняя юра), 2 – подошва юрских мезозойских отложений, 3 – подошва пыжинской свиты (верхний кембрий), 4 – кровля усольской (оксымской) свиты (нижний кембрий), 5 – кровля тэтэрской (райгинской) свиты (граница кембрия и венда), 6 – подошва верхнепротерозойско-палеозойских платформенных отложений

**Fig 4.** Geothermal model of the Fore-Yenisei sedimentary basin. Main stratigraphic intervals: 1 is the roof of the Upper Jurassic Bazhenov Fm.; 2 is the bottom of Jurassic sediments; 3 is the bottom of Upper Cambrian Pyzhino Fm.; 4 is the top of Lower Cambrian Usolye (Oksym) Fm.; 5 is the top of Cambrian-Vendian Tetera (Raiga) Fm.; 6 is the bottom of the Upper Proterozoic-Paleozoic cratonic sediments

ным. Значения пластовых температур для кровли доюрских отложений составляют 50–85 °С для положительных структур западной части осадочного бассейна, в то время как в осевой части они снижаются до 30–55 °С.

Установленная закономерность согласуется с особенностями геологического строения и геодинамическими реконструкциями бассейна. Согласно реконструкциям, как упоминалось выше, западные районы бассейна в венд-кембрийское время принадлежали к активной окраине материка и располагались в пределах задугового (окраинного) бассейна. На востоке, в тыльной своей части, он переходил в эпиплатформенный бассейн с корой континентального типа. Установленные особенности геотермического поля, по-видимому, являются следствием этой дифференциации и в целом характеризуют переходный тип геологического и геотермического разреза между доюрскими складчатыми сооружениями Западно-Сибирской геосинеклизы и платформенными отложениями Сибирского кратона.

Итогом наших исследований служит трехмерная геотермическая модель (рис. 4), показываю-

щая вертикальную зональность древнего и слабоизученного Предъенисейского осадочного бассейна, перекрытого мощной толщей мезозойско-кайнозойских осадков. Это позволяет рассматривать характер изменения пластовых температур с глубиной и прогнозировать тенденции изменения температуры на труднодоступных объектах, слабо обеспеченных фактическими данными.

*Исследования проводились при финансовой поддержке Проекта IX.131.3.2. «Геохимия, генезис и механизмы формирования состава подземных вод арктических районов осадочных бассейнов Сибири» Программы IX.131.3. «Эволюция гидрогеологических систем осадочных бассейнов Сибири» Приоритетного направления IX.131. «Геология месторождений углеводородного сырья, фундаментальные проблемы геологии и геохимии нефти и газа, научные основы формирования сырьевой базы традиционных и нетрадиционных источников углеводородного сырья» Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук Российской Федерации на 2013–2020 годы, Российского Фонда Фундаментальных исследований (проекты № 14–05–00868-а, 16–05–00945-а) и Министерства образования, науки и инновационной политики Новосибирской области в рамках научного проекта № 17–45–540086.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Предъенисейская нефтегазоносная субпровинция – новый перспективный объект поисков нефти и газа в Сибири / А.Э. Конторович, В.А. Конторович, Ю.Ф. Филиппов и др. // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2006. – № 5–6. – С. 9–23.
2. Филиппов Ю.Ф. Перспективы нефтегазоносности Предъенисейского осадочного бассейна // Геология нефти и газа. – 2016. – № 6. – С. 35–45.
3. Novikov D.A. Distribution of Cambrian salts in the western Siberian Craton (Yurubcheno-Tokhomo field, Russia) // Arabian Journal of Geosciences. – 2017. – V. 10. – № 1. – P. 1–8.
4. Дульцев Ф.Ф., Новиков Д.А. Геотермический режим недр Предъенисейского осадочного бассейна // ГЕО-Сибирь-2017: Сборник материалов XIII международного научного конгресса. – Новосибирск, 2017. – Т. 2. – № 1. – С. 111–115.
5. Formations, distribution resource potential, and discovery of Sinian-Cabrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China / C. Zou, J. Du, C. Xu, Z. Wang, B. Zhang, G. Wei, T. Wang, G. Yao, S. Deng, J. Liu, H. Zhou, A. Xu, Z. Yang, H. Jiang, Z. Gu // Petroleum exploration and development. – 2014 – V. 41. – № 3. – P. 306–325.
6. Tectonic features of Gaoshiti-Moxi paleo-uplift and its controls on the formation of a giant gas field, Sichuan Basin, SW China / G. Wei, W. Yang, J. Du, C. Xu, C. Zou, W. Xie, S. Wu, F. Zeng // Petroleum exploration and development. – 2015. – V. 42 (3). – P. 283–292.
7. Geothermal energy in sedimentary basins: What we can learn from regional numerical models / M. Cacace, B.O. Kaiser, B. Lewerenz, M. Scheck-Wenderoth // Chemie der Erde – Geochemistry. – 2010. – V. 70. – № 3. – P. 33–36.
8. Gray D.A., Majorowicz J., Unsworth M. Investigation of the geothermal state of sedimentary basins using oil industry thermal data: case study from Northern Alberta exhibiting the need to systematically remove biased data // Journal of geophysics and engineering. – 2012. – № 9. – P. 534–548.
9. Ongoing resource assessment of geothermal energy from sedimentary basins in Texas / R.J. Erdlac Jr., L. Armour, R. Lee, S. Snyder, M. Sorensen, M. Matteucci, J. Horton // Stanford Geothermal Workshop. – Stanford, CA, USA, 2007. – P. 1–8.
10. Palumbo F., Main I.G., Zito G. The thermal evolution of sedimentary basins and its effect on the maturation of hydrocarbons // Thermal evolution of sedimentary basins. – 1999. – № 139. – P. 248–260.
11. Vieira F.P., Hamza V.M., Alexandrino C.H. Obliteration of thermal springs by groundwater flows in sedimentary basins of Brazil // Hydrogeology Journal. – 2014. – V. 22. – P. 69–86.
12. Thermal waters of ‘tectonic origin’: the alkaline, Na-HCO<sub>3</sub> waters of the Rio Valdez geothermal area (Isla Grande de Tierra del Fuego, Argentina) / B. Capaccioni, M. Menichetti, A. Renzulli, A. Tassone, A.D. Huertas // Geofluids. – 2013. – № 13. – P. 21–31.
13. Bozdog A. Hydrogeochemical and isotopic characteristics of Kavak (Seydis, ehir- Konya) geothermal field, Turkey // Journal of African Earth Sciences. – 2016. – № 121. – P. 72–83.
14. Hydrochemistry and gas geochemistry of the northeastern Algerian geothermal waters / M. Belhai, Y. Fujimitsu, J. Nishijima, M. Bersi // Arabian Journal of Geosciences. – 2017. – V. 10. – № 8. – P. 1–15.
15. Geochemistry and geothermometry of non-volcanic hot springs in West Malaysia / H. Baioumy, M. Nawawi, K. Wagner, M.H. Arifin // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2015. – V. 290. – P. 12–22.
16. Гидродинамика и геотермия нефтяных структур / Г.В. Богомолов, Ю.В. Мухин, Ю.А. Балакирев и др. / под ред. академика АН СССР Г.В. Богомолова. – Минск: Наука и техника, 1975. – 239 с.
17. Кругликов Н.М., Нелюбин В.В., Яковлев О.Н. Гидрогеология Западно-Сибирского нефтегазоносного мегабассейна и особенности формирования залежей углеводородов. – Л.: Недра, 1985. – 279 с.
18. Курчиков А.Р. Гидрогеотермические критерии нефтегазоносности. – М.: Недра, 1992. – 231 с.
19. Новиков Д.А., Шварцев С.Л. Гидрогеологические условия Предъенисейской нефтегазоносной субпровинции // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. – № 10. – С. 1131–1143.

20. Филиппов Ю.Ф. Предъенисейский осадочный бассейн: сейсмо-геологическая модель и геодинамическая эволюция // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 3–4. – С. 455–471.
21. Филиппов Ю.Ф., Сараев С.В., Коровников И.В. Стратиграфия и корреляция кембрийских отложений Предъенисейского осадочного бассейна Западной Сибири // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 5–6. – С. 891–905.
22. Венд Предъенисейского осадочного бассейна (юго-восток Западной Сибири) Д.В. Гражданкин, А.Э. Конторович, В.А. Конторович, С.В. Сараев, Ю.Ф. Филиппов, А.С. Ефимов, Г.А. Карлова, Б.Б. Кочнев, К.Е. Наговицин, А.А. Терлеев, Г.О. Федянин // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – № 4. – С. 718–734.
23. Сараев С.В., Филиппов Ю.Ф., Батурина Т.П. Палеогеография Предъенисейского осадочного бассейна в венде и кембрии // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории: Материалы VII Всероссийского литологического совещания. – Новосибирск, 28–31 октября 2013. – Новосибирск: ИНГТ СО РАН, 2013. – Т. III. – С. 73–76.
24. Ростовцев Н.Н. Геологическое строение и нефтегазоносность Западно-Сибирской низменности. Труды ЗапСибНИГНИ. – М.: Недра, 1965. – Вып. 1. – 302 с.
25. Мегакомплексы и глубинная структура земной коры Западно-Сибирской плиты / под ред. В.С. Суркова. – М.: Недра, 1986. – 149 с.

Поступила 25.08.2017 г.

#### Информация об авторах

**Дульцев Ф.Ф.**, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

**Новиков Д.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук; доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

UDC 553.981/982:551.24.054

**GEOHERMAL ZONALITY OF FORE-YENISEI SEDIMENTARY BASIN****Fedor F. Dultsev**<sup>1</sup>,  
DultsevFF@ipgg.sbras.ru**Dmitry A. Novikov**<sup>1,2</sup>,  
NovikovDA@ipgg.sbras.ru<sup>1</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
3, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.<sup>2</sup> Novosibirsk State University,  
2, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the work is caused by the fact that the strata temperature is one of the major factors controlling the degree of transformation of scattered organic matter of rocks, gas and oil generation, formation and conservation of the deposits of hydrocarbons. It is the temperature on which the physicochemical properties and phase state of gases, oil and water depend under the in-situ conditions. Upper Precambrian-Paleozoic deposits of the Fore-Yenisei sedimentary basin are considered in recent years as one of the possible objects for the increment of the resource basis of hydrocarbons within the boundaries of the West Siberian oil-and-gas bearing province. At present, the region under investigation is insufficiently explored by drilling, so in the work we propose a geothermal model showing the character of changes in the strata temperature with depth and allowing us to predict the trends of temperature changes for difficultly accessible objects weakly provided with the actual data.

**The aim** of the work is to reveal the geothermal features of Upper Precambrian-Paleozoic sediments of the Pre-Yenisei sedimentary basin, zoning and compilation of the geothermal model of the sedimentary fill of the basin.

**Methods of investigation.** Geothermal parameters of the geological section were calculated; geothermal zoning of the territory was carried out on the basis of the geothermal gradient value. Using the structural maps over the major stratigraphical horizons and the regression dependences of the geothermal parameters with the depth, the grid models were developed with the help of GridBuilder and GridMaster software packages, as well as GS Surfer.

**Results.** It was determined that the sections of the Upper Precambrian-Paleozoic sediments of the Pre-Yenisei sedimentary basin are comparable with the western regions of the Siberian Platform, both in rock composition and in geothermal conditions, and are characterized by decreased geothermal gradients (1,25–2,55 °C/100 m). For the first time, the authors have developed the detailed geothermal model of sedimentary fill of the basin allowing us to predict the geothermal conditions of the sedimentary strata.

**Key words:**

Pre-Yenisei sedimentary basin, geothermal zonal, geothermal gradient, strata temperature, geothermal model.

The work was supported by the project IX.131.3.2. «Geochemistry, origin, and formation of groundwater composition of the Siberian Arctic sedimentary basins» of the program IX.131.3. «Evolution of hydrogeological systems in Siberian sedimentary basins» of the priority area IX.131. «Geology of hydrocarbon fields, fundamental problems of petroleum geology and geochemistry, scientific basics for traditional and non-traditional sources of hydrocarbons» of the Program of fundamental scientific researches of the Russian academy of Sciences for 2013–2020 and Russian Foundation of Basic Researches (projects 14–05–00868-a, 14–05–00945-a) and Ministry of Education, Science and Innovation policy of the Novosibirsk Region in the research project no. 17–45–540086.

**REFERENCES**

- Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Filippov Yu.F. The Pre-Yenisei oil and gas bearing subprovince as a new region for petroleum exploration in Siberia. *Geology, geophysics and the development of oil and gas fields*, 2006, no. 5–6, pp. 9–23. In Rus.
- Filippov Yu.F. Hydrocarbon potential of the Pre-Yenisei sedimentary basin. *Geology of oil and gas*, 2016, no. 6, pp. 35–45. In Rus.
- Novikov D.A. Distribution of Cambrian salts in the western Siberian Craton (Yurubcheno-Tokhomo field, Russia). *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, vol. 10, Iss. 1, pp. 1–8.
- Dultsev F.F., Novikov D.A. *Geotermicheskiy rezhim nedr predniseyskogo osadochnogo basseyna* [Geothermal regime of the Pre-Yenisey sedimentary basin]. *GEO-Sibir-2017: Sbornik materialov XIII mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa* [GEO-Siberia 2017. Proc. of the XIII International Exhibition and Scientific Congress]. Novosibirsk, 2017. Vol. 2, no. 1, pp. 111–115.
- Zou C., Du J., Xu C., Wang Z., Zhang B., Wei G., Wang T., Yao G., Deng S., Liu J., Zhou H., Xu A., Yang Z., Jiang H., Gu Z. Formations, distribution, resource potential, and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China, *Petroleum exploration and development*, 2014, vol. 41, no. 3, pp. 306–325.
- Wei G., Yang W., Du J., Xu C., Zou C., Xie W., Wu S., Zeng F. Tectonic features of Gaoshiti-Moxi paleo-uplift and its controls on the formation of a giant gas field, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum exploration and development*, 2015, vol. 42, no. 3, pp. 283–292.
- Cacace M., Kaiser B.O., Lewerenz B., Scheck-Wenderoth M. Geothermal energy in sedimentary basins: What we can learn from regional numerical models. *Chemie der Erde – Geochemistry*, 2010, vol. 70, no. 3, pp. 33–36.
- Gray D.A., Majorowicz J., Unsworth M. Investigation of the geothermal state of sedimentary basins using oil industry thermal data: case study from Northern Alberta exhibiting the need to systematically remove biased data. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2012, no. 9, pp. 534–548.
- Erdlac R.J. Jr., Armour L., Lee R., Snyder S., Sorensen M., Matteucci M., Horton J. Ongoing resource assessment of geothermal energy from sedimentary basins in Texas. *Stanford Geothermal*

- Workshop Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University*. Stanford, CA, USA, 2007. pp. 1–8.
10. Palumbo F., Main I.G., Zito G. The thermal evolution of sedimentary basins and its effect on the maturation of hydrocarbons. *Thermal evolution of sedimentary basins*, 1999, no. 139, pp. 248–260.
  11. Vieira F.P., Hamza V.M., Alexandrino C.H. Obliteration of thermal springs by groundwater flows in sedimentary basins of Brazil. *Hydrogeology Journal*, 2014, vol. 22, pp. 69–86.
  12. Capaccioni B., Menichetti M., Renzulli A., Tassone A., Huer-tas A.D. Thermal waters of ‘tectonic origin’: the alkaline, Na-HCO<sub>3</sub> waters of the Rio Valdez geothermal area (Isla Grande de Tierra del Fuego, Argentina). *Geofluids*, 2013, no. 13, pp. 21–31.
  13. Bozdogan A. Hydrogeochemical and isotopic characteristics of Kavak (Seydis, ehir- Konya) geothermal field, Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, 2016, no. 121, pp. 72–83.
  14. Belhai M., Fujimitsu Y., Nishijima J., Bersi M. Hydrochemistry and gas geochemistry of the northeastern Algerian geothermal waters. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, vol. 10, no. 8, pp. 1–15.
  15. Baioumy H., Nawawi M., Wagner K., Arifin M.H. Geochemistry and geothermometry of non-volcanic hot springs in West Malaysia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2015, vol. 290, pp. 12–22.
  16. Bogomolov G.V., Mukhin Yu.V., Balakirev Yu.A. *Gidrodinamika i geotermiya neftyanykh struktur* [Hydrodynamics and geothermics of oil structures]. Ed. by G.V. Bogomolov. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1975. 239 p.
  17. Kruglikov N.M., Nelyubin V.V., Yakovlev O.N. *Gidrogeologiya Zapadno-Sibirskogo neftegazonosnogo megabasseyina i osobennosti formirovaniya zalezhey uglevodorodov* [Hydrogeology of the West Siberian petroleum megabasin and features of formation of hydrocarbon reservoirs]. Leningrad, Nedra Publ., 1985. 279 p.
  18. Kurchikov A.R. *Gidrogeotermicheskie kriterii neftegazonosnosti* [Hydrogeothermal criteria for hydrocarbon potential]. Moscow, Nedra Publ., 1992. 231 p.
  19. Novikov D.A., Shvartsev S.L. Hydrogeological conditions of the Pre-Yenisei petroleum subprovince. *Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 10, pp. 1131–1143. In Rus.
  20. Filippov Yu.F. The Fore-Yenisei sedimentary basin: Seismic-geological model and geodynamic history. *Geology and geophysics*, 2017, vol. 58, no. 3–4, pp. 455–471. In Rus.
  21. Filippov Yu.F., Saraev S.V., Korovnikov I.V. The Cambrian sediments of the Cis-Yenisei basin (West Siberia): stratigraphy and correlation. *Geology and geophysics*, 2014, vol. 55, no. 5–6, pp. 891–905. In Rus.
  22. Grazhdankin D.V., Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Sarayev S.V., Filippov Yu.F., Efimov A.S., Karlova G.A., Kochnev B.B., Nagovitsin K.E., Terleev A.A., Fedyanin G.O. Vendian of the Fore-Yenisei sedimentary basin (southeastern West Siberia). *Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, no. 4, pp. 718–734. In Rus.
  23. Saraev S.V., Filippov Yu.F., Baturina T.P. *Paleogeografiya predeniseyskogo osadochnogo basseyna v Vende i Kembrii* [Paleogeography of the Predenisey sedimentary basin in the Vendian and Cambrian]. *Osadochnye basseyny, sedimentatsionnye i postsedimentatsionnye protsessy v geologicheskoy istorii. Materialy VII Vserossiyskogo litologicheskogo soveshchaniya* [Sedimentary basins, sedimentation and post-sedimentation processes in geological history: Proceedings of the VII All-Russian Lithological Conference]. Novosibirsk, October 28–31, 2013. Novosibirsk, IPGG SB RAS Publ., 2013. Vol. III, pp. 73–76.
  24. Rostovtsev N.N. Geologicheskaya struktura i neftegazonosnost Zapadno-Sibirskoy nizmennosti [Geological structure and hydrocarbon occurrences of the West Siberian lowland]. *Trudy ZapSibNIGNI* [Proceedings of ZapSibNIGNI]. Moscow, Nedra Publ., 1965. Iss. 1, 302 p.
  25. *Megakompleksy i glubinnaya struktura zemnoy kory Zapadno-Sibirskoy plity* [Megacomplexes and deep structure of the Earth’s crust of the West Siberian Plate]. Ed. by V.S. Surkov. Moscow, Nedra Publ., 1986. 149 p.

Received: 25 August 2017.

#### Information about the authors

**Fedor F. Dultsev**, post-graduate student, junior research scientist, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS.

**Dmitry A. Novikov**, Cand. Sc., head of the laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS; associate professor, Novosibirsk State University.

УДК 552.11:553.3/4:550.4:551.2

## МАГМАТИЗМ И ОРУДЕНЕНИЕ МУРЗИНСКОГО ЗЛОТОРУДНОГО ПОЛЯ (ГОРНЫЙ АЛТАЙ)

Гусев Анатолий Иванович<sup>1</sup>,  
anzerg@mail.ru

Табакаева Евгения Михайловна<sup>1</sup>,  
tabakaeva16@mail.ru

<sup>1</sup> Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М. Шукшина,  
Россия, 659333, г. Бийск, ул. Владимира Короленко, 53.

**Актуальность** исследования определяется необходимостью освещения новых данных по петрологии, геохимии и оруденению гранитоидов Мурзинского рудного поля Горного Алтая. С гранитоидами Мурзинского штока пространственно и парагенетически связаны различные типы оруденения меди и золота раннего этапа. С дайками пикродолеритов и долеритов связано позднее золото-ртутное оруденение.

**Цель исследования:** изучить петрологические, геохимические особенности пород и оруденения Мурзинского штока с использованием экспериментальных диаграмм, позволяющих выявлять генетические проблемы и физико-химические особенности петрогенезиса.

**Методы** исследования включали изучение состава горных пород с применением лазерно-абляционного анализа методом индуктивно-связанной плазмы на спектрометре «OPTIMA 4300» с высокой чувствительностью определения элементов в лабораториях Всероссийского научно-исследовательского геологического института (г. Санкт-Петербург) и Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (г. Москва).

**Результаты.** Главными рудогенерирующими объектами в рудном поле являются гранитоиды Мурзинского штока позднего девона и редкие дайки долеритов терехтинского комплекса поздней перми – раннего триаса. Гранитоиды Мурзинского массива отнесены к андезит-дацит-риолитовой серии, источником которой было плавление амфиболитов и граувакк нижней коры при относительно невысоком давлении (3...5 кбар). Проявление тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ М-типа в гранитоидах коррелировалось с концентрациями меди и золота. Образование ранних золото-медно-скарновых руд связано парагенетически с гранитоидами Мурзинского массива. Дайки пикродолеритов и долеритов формировались за счёт низкой степени частичного плавления шпинелевых лерцолитов и интерпретируются дериватами базальтов океанических островов. Оторванное по времени золото-ртутное оруденение связано с глубинным очагом, генерировавшим дайки пикродолеритов и долеритов. Интрузивно-связанные золото-медно-скарновые месторождения Мурзинского рудного поля следует относить к комплексным объектам («бипродуктам»), сформировавшимся в менявшихся условиях флюидного режима. Ранние этапы проходили с участием ювенильных магматогенных флюидов, а на заключительной стадии рудогенез протекал в условиях смешения ювенильных и разбавленных холодных растворов.

### Ключевые слова:

Геохимия, петрология, гранитоиды, дайки пикродолеритов, долеритов, частичное плавление, тетрадный эффект фракционирования РЗЭ, скарны, жилы, медь, золото, ртуть.

### Введение

Специфика Горного Алтая заключается в том, что на его территории широко распространены интрузивно связанные скарновые месторождения самого различного состава: Cu, Au, W, Mo, Fe. Наиболее востребованы в настоящее время скарновые объекты с золотом, к числу которых относятся известные Синюхинское и Ульменское золото-медно-скарновые, Чойское золото-теллуридно-скарновое месторождения. В них помимо скарнов присутствуют руды и других геолого-промышленных типов оруденения [1]. В настоящее время уделяется пристальное внимание изучению комплексных объектов, включающих в себя различные геолого-промышленные типы оруденения, так как такое совмещение разных типов оруденения приводит к формированию крупных месторождений. Так, в золоторудном месторождении Пэйтинг провинции Гуижоу (Китай) присутствуют руды типа Карлин и орогенного жильного [2]. На золото-урановом месторождении Ромпас (Северная Финляндия) совмещены уранинит-пиробитумное и самородное золото с галенитом, алтаитом, хунчитом, никели-

ном, кобальтином, мальдонитом, пиритом, пирроитом, халькопиритом, молибденитом [3].

В северной части Горного Алтая давно известен один из интереснейших золото-медно-скарновых объектов – Мурзинское рудное поле, в пределах которого разрабатываются и эндогенные, и гипергенные руды золота, а также характерно совмещение разных типов оруденения. *Цель исследования* – систематизировать сведения по магматизму, метасоматитам, геохимии и золотоносности Мурзинского рудного поля с использованием новых данных.

### Геологические особенности Мурзинского рудного поля

*Мурзинское рудное поле* площадью около 50 км<sup>2</sup> расположено в северной части Горного Алтая и включает известные золоторудные месторождения Мурзинское I, Мурзинское II, Мурзинское III, мелкие делювиально-элювиальные россыпи золота, а также оруденение золота в коре выветривания. Мурзинское рудное поле структурно приурочено к восточной области замыкания Ку-

руинско-Акимовской синклинали, срезанной и осложненной Акимовским взбросо-надвигом субмеридионального простирания. В строении рудного поля принимают участие терригенно-карбонатные отложения нижедевонской барагашской свиты, залегающие с базальными конгломератами на пестроцветных терригенных образованиях позднего силура (черноануйская свита). Тектонический блок к северу от дер. Мурзинка, а также северная надвиговая пластина Акимовского дизъюнктива сложены терригенными, нередко грубообломочными породами, отнесенными к нижеануйской серии раннего-среднего ордовика. К северо-западу от г. Мурзинка к одной из надвиговых пластин приурочена дайкообразная Мурзинская интрузия гранодиоритов усть-беловского комплекса. Наиболее поздними образованиями рудного поля являются дайки долеритов и базальтов, трассирующие разломы субширотной и северо-восточной ориентировки.

Породы висячего бока Акимовского надвига, расположенные к юго-востоку от Надеждинского разлома, отнесены к барагашской свите условно. Непосредственный контакт между образованиями лежащего и висячего боков Акимовского взбросо-надвига закрыт, но при переходе от первых ко вторым наблюдается резкая (скачкообразная) смена термальных изменений – эпидотизация и окварцевание, появление скарнов. Кроме того, породы фронтальной части лежащего бока интенсивно брекчированы, перемяты.

Мурзинский массив (площадью 0,9 км<sup>2</sup>) – типичная трещинная интрузия с неровными заливообразной формы контактами, имеет северо-восточную ориентировку и, предположительно, юго-восточное падение. Северо-западный его контакт подсорван. В составе массива выделены 3 фазы внедрения: кварцевые диориты, гранодиориты и меланограниты. Гранодиориты главной фазы здесь подвергнуты неравномерной эпидотизации. Темноцветные минералы (роговая обманка и пироксен) почти полностью замещены актинолитом, эпидотом и сфеном. Эпидот образует гнезда, пятна неправильной формы (до 10...15 % объема породы) размером от долей миллиметра до 6...8 мм, иногда в породах отмечается гранат. Эти породы могут быть отнесены к эндоскарнам. В юго-восточном экзо- и эндоконтакте интрузии наблюдается интенсивная турмалинизация в виде турмалин-кварцевых прожилков и равномерной тонкой вкрапленности (размер кристаллов ~ 1 мм). Но наблюдаются и участки, где гранодиориты преобразованы в черные кварц-турмалиновые (шерл) породы, образующие тела (при ширине выходов – до первых метров и протяженностью в первые десятки метров) вытянутой формы северо-восточного направления; реже это овальные в плане тела размером от 30...40 см до 4...6 м в поперечнике. Наиболее широкие поля скарнов, скарнированных пород и эпидозитов (до 0,3 км<sup>2</sup>) отмечаются в зоне интрузий гранодиоритов, полого погружающихся к юго-вос-

току, и срезаются главной ветвью Акимовского дизъюнктива. Маломощные тела скарнов прослеживаются и в северо-западном экзоконтакте массива. Состав скарнов: гранатовый, гранат-эпидотовый, пироксеновый и гранат-пироксеновый. Преобладают две первые разности, а также широко развиты эпидозиты.

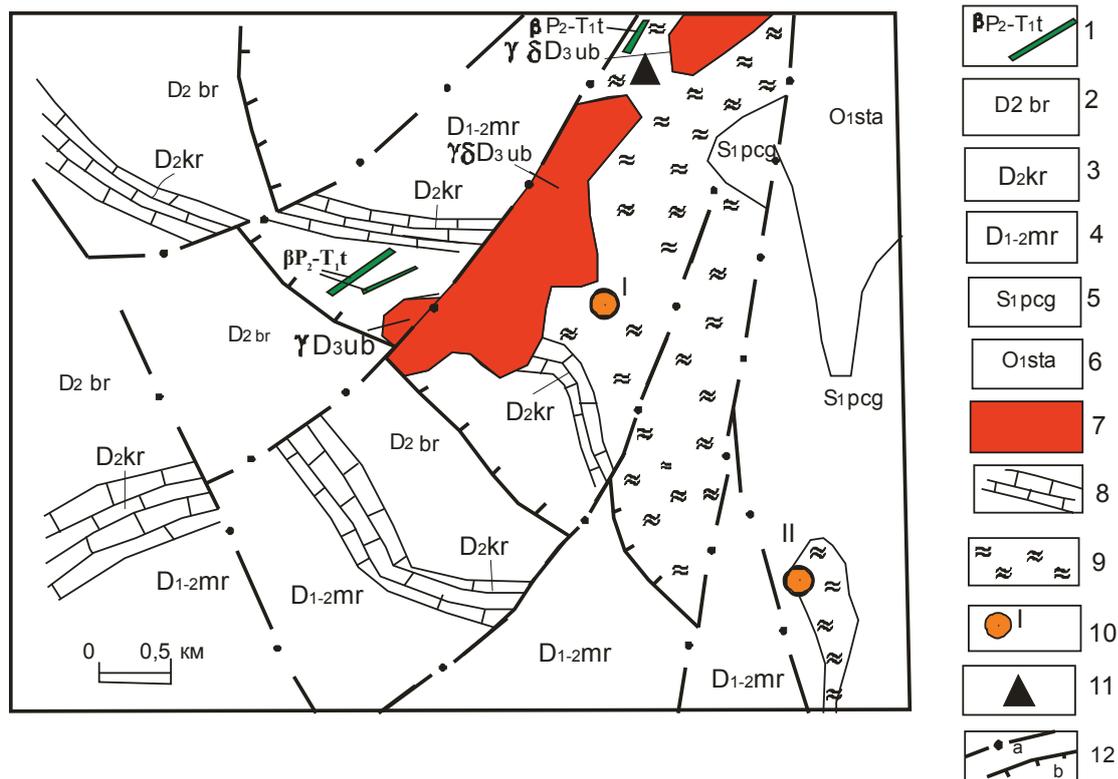
Шовная (главная) зона Акимовского дизъюнктива в пределах рудного поля имеет сложное внутреннее строение, субмеридионального простирания, а далее на север оно изменяется на север-северо-восточное. Здесь отмечается целый ряд параллельных разломов, которые в свою очередь осложнены большим количеством оперяющих разрывов преимущественно северо-восточной ориентировки. Ширина зоны на поверхности – первые сотни метров. В стенках карьера месторождения Мурзинское № 1, вскрывающего зону главного разлома, отчетливо наблюдается минерализация катаклазитов, тектонических брекчий с блоками скарнов и эпидозитов. Тектонические брекчии развиты по различным скарнам, эпидозитам, эпидотизированным породам, роговикам и ороговикованным сланцам. Цементом служит кварц и эпидот. Если с поверхности плоскость главного Акимовского разлома погружается на восток под углом 45...50°, то с глубиной (по данным бурения ООО «Поиск») крутизна его увеличивается до 60...70°. Уменьшается и мощность зоны брекчирования (первые десятки метров). С главной зоной Акимовского разлома и оперяющими его нарушениями связаны наиболее мощные, но не выдержанные по мощности и простиранию, золотоносные кварцевые жилы с сульфидами.

В рудном поле имеется оруденение, сформированное в плутоногенно-гидротермальную стадию, наложившуюся на дорудные метасоматические образования. Последние на месторождении Мурзинское I и проявлении Мурзинское II представлены гранат-диопсидовыми, гранатовыми и гранат-эпидотовыми скарнами и скарнированными породами, развитыми вдоль зоны главного Акимовского разлома, в экзоконтакте небольшого Мурзинского гранитоидного массива (рис. 1).

#### Интрузивные образования

В пределах Мурзинского рудного поля обнажены гранитоиды Мурзинского штока и редкие дайки долеритов терехтинского комплекса.

*Кварцевые диориты* Мурзинского штока составляют около 10 % от объема всех пород. Чаще всего они представляют собой светло-серые и серые среднезернистые породы массивной и шпирово-такситовой текстуры. Под микроскопом обнаруживают гипидиоморфнозернистую структуру с элементами и вариациями до пойкилофитовой и монзонитовой в связи с развитием крупных силовидных пойкилобластов калиевого полевого шпата, изредка кварца. Для петрографического состава данных пород характерно развитие зеленой обыкновенной роговой обманки (до 15...20 %) и, в



**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта Мурзинского рудного поля (составлена авторами с учётом данных Б.В. Сорокина): 1 – дайки долеритов терехтинского комплекса; 2 – барагашская свита – желтовато-серые песчаники, алевролиты, аргиллиты; 3 – курьинская свита – известняки, желтовато-серые алевролиты, песчаники; 4 – мурзинская свита – конгломераты, известняки, песчаники, алевролиты, аргиллиты; 5 – известково-глинистые сланцы, песчаники, алевролиты, конгломераты подчагырской свиты; 6 – зеленовато-серые, серые, лиловые песчаники, конгломераты, глинистые сланцы суеткинской свиты; 7 – гранодиориты, кварцевые диориты, меланограниты усть-беловского комплекса; 8 – известняки курьинской свиты; 9 – скарны гранатовые, гранат-пироксеновые; 10 – Мурзинские месторождения (Мурзинское I, Мурзинское II); 11 – Надеждинское проявление железа; 12 – разломы: а – сбросы, сбросо-сдвиги; б – надвиги

**Fig. 1.** Schematic geological map of Murzinsky ore field (composed by the authors with the discount data of B.V. Sorokin): 1 – dikes of dolerites of Terekhtinsky complex; 2 – Baragash suite – yellow-gray sandstones, aleurolites, argillites; 3 – Kurinskaya suite – limestones, yellow-gray aleurolites, sandstones; 4 – Murzinskaya suite – conglomerates, limestones, sandstones, aleurolites, argillites; 5 – limestone-clay schists, sandstones, aleurolites, conglomerates of Podchagirsky suite; 6 – green-gray, gray, lilac sandstones, conglomerates, clay schists of Suetkinskaya suite; 7 – granodiorites, quartz diorites, melanogranites of Ust-Belovsky complex; 8 – limestones of Kurinskaya suite; 9 – skarns garnet, garnet-pyroxene; 10 – Murzinsky deposits (Murzinskoe I, Murzinskoe II); 11 – Nadezhkhinskoe iron manifestation; 12 – faults: a – normal faults, normal faults-strike-slip faults; b – thrust faults

меньших и переменных количествах, биотита (до 5...10 %). Иногда в реликтовых зернах присутствует клинопироксен и ортопироксен (гиперстен). Плагиоклаз обычно наиболее идиоморфен и представлен нередко слабозональным андезином, в порфириовидных и порфириовых разностях образует фенокристаллы размером до 1 см. Также и интра-теллурические вкрапления корродируются кварцем, калиевым полевым шпатом и имеют прямую зональность: в ядре они представлены андезином № 45–47, а по периферии андезином № 32–34.

Постоянно присутствует слабоупорядоченный калиевый полевой шпат (10...20 %) – ксеноморфный или, при больших количествах, в виде крупных ситовидных пойкилобластов с образованием монцититовой микроструктуры.

Гранодиориты являются наиболее распространенной петрогеохимической разновидностью пород второй фазы (более 75 %), имеют подобный кварцевым диоритам состав и основные структурно-текстурные особенности, но уже с количественным преобладанием биотита над актинолитизированной роговой обманкой, в целом несколько меньшим количеством темноцветных минералов (15...20 %) и большим количеством кварца (до 20 %) при практически подобном, слабо варьирующем содержании калиевого полевого шпата. Среди акцессорных минералов кварцевых диоритов и гранодиоритов доминирует магнетит (в отдельных пробах до 1209 г/т), менее развит ильменит (до 40 г/т). Иногда в значительных количествах присутствует циркон (до 7...8 г/т) и сфен, характерны рутил, апатит, монацит, гранат, ортит, пирит.

**Таблица 1.** Химический состав гранитоидов Мурзинского массива (золото – мг/т)

**Table 1.** Chemical composition of granitoids of Murzinsky massif (gold – mg/t)

Компоненты Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO <sub>2</sub>	62,9	61,21	63,21	63,2	64,8	64,7	65,2	64,64	69,1	69,44
TiO <sub>2</sub>	0,61	0,65	0,65	0,8	0,5	0,52	0,61	0,63	0,55	0,53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,1	15,57	15,51	15,32	16,24	16,21	15,2	14,83	14,7	14,64
FeO*	6,2	6,95	6,62	7,1	5,15	5,2	5,4	5,89	4,5	4,4
MnO	0,11	0,13	0,12	0,14	0,11	0,12	0,10	0,11	0,1	0,09
MgO	3,01	2,94	2,65	1,8	1,97	1,95	2,08	2,3	1,5	1,44
CaO	5,1	5,54	3,58	4,2	4,6	4,53	4,77	4,38	3,4	3,36
Na <sub>2</sub> O	2,2	2,24	2,25	3,3	3,7	3,8	2,61	2,45	3,2	3,11
K <sub>2</sub> O	2,8	2,7	3,4	2,7	2,04	2,1	3,05	3,15	2,6	2,56
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,11	0,13	0,17	0,21	0,15	0,16	0,12	0,15	0,14	0,13
Be	1,6	1,42	1,92	1,77	1,09	1,2	1,02	1,51	1,5	1,44
Sc	21,4	21,31	19,8	28,2	23,9	24,2	13,7	18,23	12,1	11,4
V	135,8	140,5	144,7	104,8	99,7	100,5	100,4	112,67	76,2	75,4
Cr	83,8	86,63	54,6	36,5	41,8	42,6	44,8	66,56	25,2	22,5
Co	18,9	18,07	21,7	12,1	12,7	13,1	12,9	14,67	12,3	10,7
Ni	22,7	31,41	13,5	14,2	16,9	17,3	17,1	24,07	15,1	14,7
Ga	16,1	16,2	15,6	19,2	15,1	15,6	15,8	15,54	16,1	16,2
Rb	83,8	76,7	95,8	103,9	79,7	81,3	103,7	95,33	93,1	92,8
Sr	217,6	239,7	370,6	202,5	252,6	262,2	233,6	226,67	160,3	159,9
Y	25,8	25,2	25,1	74,2	17,5	16,1	25,5	30,16	29,2	15,5
Zr	154,7	143,9	172,6	243,5	194,9	195,3	171,4	184,67	181,2	178,4
Nb	9,8	9,4	9,8	14,4	9,8	9,9	9,9	10,24	10,1	8,9
Cs	1,99	3,2	3,4	4,4	2,6	2,9	6,5	3,76	4,5	4,2
Ba	383,8	377,6	581,3	461,5	361,3	365	413,1	448,67	335,1	332,5
La	23,8	20,4	16,8	21,2	29,8	30,1	31,8	21,91	20,1	42,1
Ce	47,1	42,4	48,1	51,4	21,0	21,2	61,1	48,44	42,2	39,2
Pr	5,3	4,97	5,1	7,1	3,2	3,3	7,02	5,80	4,6	4,6
Nd	21,2	19,8	22,2	33,2	10,1	10,3	24,2	22,51	20,2	19,0
Sm	4,4	4,1	4,6	9,6	2,4	2,5	4,4	4,78	4,3	3,7
Eu	0,91	0,95	1,2	1,6	0,49	0,5	0,93	1,05	1,02	0,86
Gd	4,5	4,2	5,2	10,8	0,33	0,4	3,6	4,86	4,5	0,93
Tb	0,71	0,72	0,81	2,13	2,6	2,7	0,69	0,86	0,7	2,45
Dy	4,42	4,34	4,5	12,6	2,47	2,5	3,9	5,07	4,7	2,4
Ho	0,91	0,9	0,88	2,7	0,9	0,93	0,78	1,07	0,99	0,87
Er	2,5	2,64	2,7	8,1	2,2	2,3	2,4	3,16	3,1	2,3
Tm	0,41	0,42	0,4	1,2	0,3	0,35	0,36	0,48	0,5	0,32
Yb	2,7	2,69	2,7	7,5	1,5	1,6	2,4	3,10	3,2	1,4
Lu	0,4	0,4	0,41	1,5	0,25	0,26	0,38	5,20	0,48	0,24
Hf	4,5	4,13	4,83	6,6	5,1	5,3	4,6	5,11	5,5	5,3
Ta	0,65	0,65	0,66	1,14	0,72	0,8	0,72	0,78	0,98	0,96
W	1,59	0,95	0,36	0,36	0,81	0,9	3,1	1,2	0,22	0,2
Th	9,2	7,6	7,3	6,5	10,6	11,2	10,8	9,36	11,2	10,1
U	1,44	1,55	1,26	1,51	3,1	3,2	3,2	2,01	3,1	2,8
Cu	10,7	12,7	15,9	14,9	98,8	101	16,2	15,7	8,9	87,1
Pb	34,5	43,5	32,9	21,8	54,8	55,1	34,1	23,5	25,9	43,7
Zn	15,8	16,8	17,1	14,1	20,1	20,6	16,8	18,3	17,4	19,2
Ag	3,3	4,6	3,7	2,1	8,7	9,1	3,4	2,7	4,1	7,7
Au	2,6	3,1	4,0	3,7	149	150	3,3	2,8	1,9	170
ΣREE	145	134	141	245	95	95	207	158	140	136
(La/Yb) <sub>N</sub>	5,8	5,0	3,9	1,9	5,7	12,4	8,8	4,7	4,1	4,2
Eu/Eu*	0,63	0,7	0,75	0,49	0,66	0,95	0,7	0,66	0,71	0,75
U/Th	0,16	0,2	0,17	0,23	0,29	0,28	0,3	0,21	0,27	0,28
Nb/Ta	15,1	14,5	14,8	12,6	13,6	12,4	13,7	13,1	10,3	9,3
TE <sub>1,3</sub>	0,98	1,0	1,06	1,03	1,8	1,6	1,03	0,96	0,98	1,7

Очень часто, и это очень характерно для пород массива, гранодиориты содержат мелкие (от первых сантиметров до первых десятков сантиметров) ксенолиты габброидов и габбродиоритов. Химический состав гранодиоритов характеризует их как высокоизвестковистые (коэффициент известковистости – 0,51), низкощелочные (коэффициент агаптитности – 0,48) и в целом низкокалиевые умеренноглиноземистые породы (индекс Шенда = 1,02).

**Меланограниты** (около 15 % от объема массива) чаще всего представляют собой самостоятельную фазу внедрения и имеют секущее положение относительно гранодиоритов. От последних отличаются более высоким (до 23...28 %) содержанием кварца и резким количественным преобладанием биотита (до 10...15 %) над роговой обманкой, всегда присутствующей хотя бы в отдельных единичных зернах, при практически том же уровне щелочности и калиевости. Для химического состава меланогранитов характерна повышенная глинозёмистость (индекс Шенда = 1,06), известковистость (0,38) и низкая агаптитность (0,54).

Определение абсолютного возраста из гранодиоритов соседнего петротипического Усть-Беловского массива U-Pb методом по циркону составляет 364±8 млн лет [4], соответствующее позднему девону.

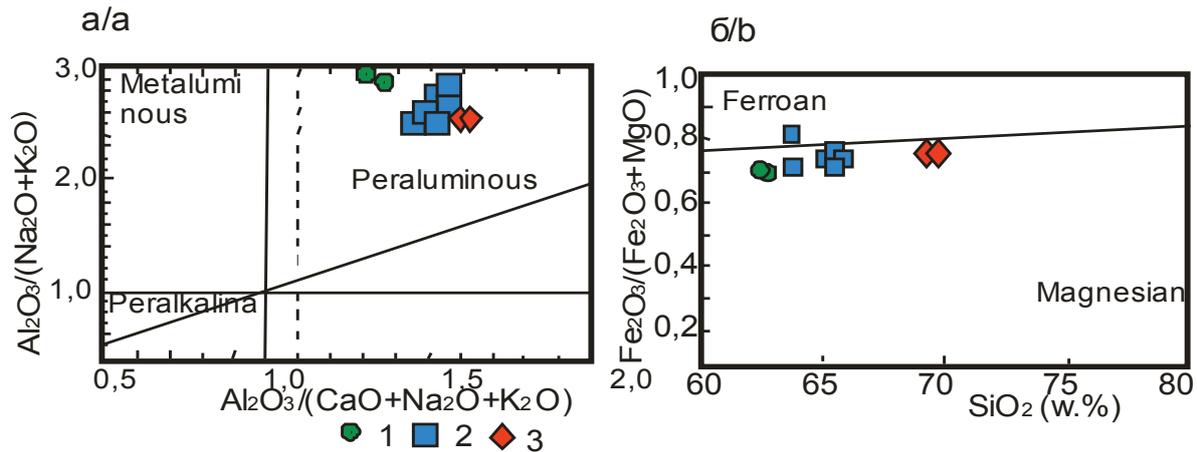
Представительные анализы пород штока приведены в табл. 1.

В целом породы относятся к низкощелочным разновидностям с суммой (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) от 4,94 до 6 с переменными соотношениями натрия и калия. Породы Мурзинского массива характеризуются относительно повышенными концентрациями V, Cr, Co, Ni, Nb. С другой стороны в них пониженные содержания Y, Yb, а в некоторых разновидностях весьма низкие, характерные для адакитовых гранитоидов. Отношения U/Th, указывающие на отсутствие значительных наложенных на них процессов, в породах <1. Отношение Eu/Eu\* также менее 1 и свидетельствует о меньших их величинах, чем в хондритах. Варьирование отношений (La/Yb)<sub>N</sub> в значительном диапазоне от 1,9 до 12,4 указывает на различную степень фракционирования редкоземельных элементов.

По соотношениям некоторых петрогенных компонентов породы массива относятся к пералюминиевому типу (рис. 2, а). Магнезиально-железистые показатели указывают на принадлежность

*Примечание.* FeO\* – суммарное железо. Eu\* = (Sm<sub>N</sub>\*Gd<sub>N</sub>)/2. Элементы нормированы по хондриту [5]. TE<sub>1,3</sub> – тетрадный эффект фракционирования РЗЭ, как среднее между первой и третьей тетрадами по [6]. 1, 2 – кварцевые диориты, 3–8 – гранодиориты, 9, 10 – меланограниты.

*Note.* FeO\* is the sum Fe. Eu\* = (Sm<sub>N</sub>\*Gd<sub>N</sub>)/2. Elements are chondrite normalized [5]. TE<sub>1,3</sub> is the tetrad effect of REE fractionation, as the average between the first and the third tetrads by [6]. 1, 2 are the quart diorites, 3–8 are the granodiorites, 9, 10 are the melanogranites.



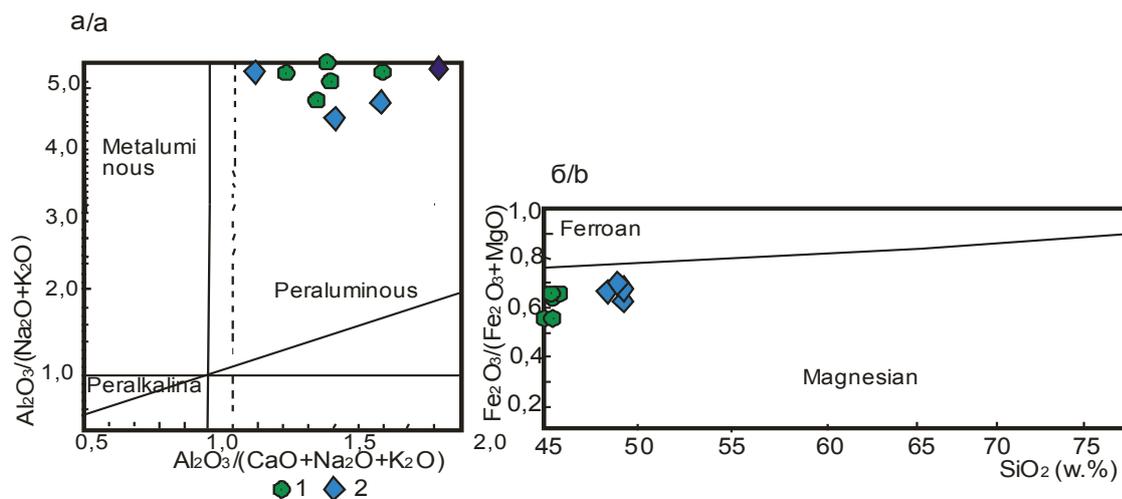
**Рис. 2.** Диаграммы  $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)-Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$  (а) по [7] и  $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+MgO)-SiO_2$  (б) по [8] для пород Мурзинского массива. 1 – кварцевые диориты, 2 – гранодиориты, 3 – меланограниты

**Fig. 2.** Classification plots a)  $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)-Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$  after [7]; b)  $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+MgO)-SiO_2$  after [8] for rocks of Murzinsky massif. 1 are the quartz diorites, 2 are the granodiorites, 3 are the melanogranites

пород преимущественно к магнезиальному типу и в единичных случаях – к железистому (рис. 2, б).

Дайки долеритов и габродолеритов терехтинского комплекса (P<sub>2</sub>-T<sub>1</sub>) представляют собой темно-зеленые микро-мелкозернистые массивные породы офитовой или пойкилоофитовой структуры и состоят из сосюритизированного и в различной степени альбитизированного лабрадора и зонального лабрадор-битовнита (45...55 %), интерстициального авгита и титан-авгита (0...40 %), в различной степени псевдоморфно замещенного магнезиальной роговой обманкой (до 40 %), кварца (до 10 %), биотита (2...6 %), титаномagnetита (4...6 %), вторичных хлорита, актинолита, эпидота, лейкоксена, акцессорных сфена и апатита. Долериты характеризуются присутствием низкожелезистого биотита и бурого титансодержащего амфибола, по результатам

микрондового анализа, относящегося к ряду керсутитов, а также наличием псевдоморфоз оливина и миндалинов, выполненных хлоритом (или хлоритосерпентином) и карбонатом, по минералогическому составу уклоняясь к пикродолеритам и долеритам. Электронно-микроскопическими исследованиями в данных долеритах, наряду с большим количеством титаномagnetита и рутила, определено присутствие ульвошпинели, апатита, барита, пентландита, халькопирита и цинксодержащего теннантита – зандбергита. Породы обнаруживают весьма высокую титанистость ( $TiO_2=3,2...3,8\%$ ). В целом терехтинские долериты характеризуются низкой глиноземистостью ( $al'=0,70$ ) и весьма низкой (даже при пересчете анализов на сухое вещество) кремнекислотностью ( $SiO_2=45,69\%$ ). Химический состав пород приведен в табл. 2.



**Рис. 3.** Диаграммы  $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)-Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$  (а) по [7] и  $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+MgO)-SiO_2$  (б) по [8] для даек пикродолеритов и долеритов терехтинского комплекса. 1 – пикродолериты, 2 – долериты

**Fig. 3.** Classification plots a)  $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)-Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$  after [7]; b)  $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+MgO)-SiO_2$  after [8] for dikes of picrodolerites and dolerites of terekhtinsky complex. 1 are the picrodolerites, 2 are the dolerites

**Таблица 2.** Химический состав даек пикродолеритов и долеритов терехтинского комплекса

**Table 2.** Chemical composition of picrodolerites and dolerites of Terekhtinsky complex

Компоненты Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO <sub>2</sub>	44,21	44,61	44,21	47,2	44,1	47,9	47,3	44,7	47,1
TiO <sub>2</sub>	2,95	3,01	2,49	3,55	3,55	3,4	3,7	3,2	3,62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,95	13,9	12,7	15,03	15,1	14,3	15,5	14,2	15,5
FeO*	13,71	13,83	12,8	13,2	13,9	12,65	14,1	13,5	14,2
MnO	0,21	0,18	0,18	0,15	0,18	0,16	0,15	0,17	0,15
MgO	9,65	8,65	9,95	5,9	7,0	6,1	5,98	7,62	5,9
CaO	7,8	5,3	6,95	6,55	6,95	9,1	5,1	6,8	5,1
Na <sub>2</sub> O	2,15	2,5	1,52	3,21	3,15	2,6	3,4	2,63	2,63
K <sub>2</sub> O	0,21	0,14	0,11	0,2	0,15	0,13	0,13	0,15	0,14
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,38	0,45	0,35	0,45	0,47	0,46	0,42	0,44	0,4
Be	1,11	1,12	1,1	1,2	1,31	0,96	1,7	1,12	1,1
Sc	24,6	24,7	29,8	21,9	29,8	21	25,8	24,7	26
V	287,7	243,4	258,4	304	301	291	280	282,7	290
Cr	437,8	321,3	615,5	68,9	172	120	56,9	255,3	58
Co	62,7	48,9	61,7	41,6	51	43	50,7	50,7	53
Ni	229	144	262,4	33	68,9	58	75	123,3	77
Ga	18,3	21,1	21	20,1	24,1	22	24	21,5	22
Rb	3,8	5,2	3,9	5,2	3,8	2,4	3,5	3,8	3,8
Sr	610	344,6	225	560	510	296	355	416	362
Y	26,9	28,5	24,7	27,6	29,2	28	27,5	27,1	28
Zr	224	248	200	265,1	253	258	263	248,1	255
Nb	23,8	25,3	21,7	28,4	29,2	27	28,4	25,8	27
Cs	1,3	0,76	0,29	0,69	0,54	0,29	0,36	0,6	0,35
Ba	118	251,2	58,8	103	120	67	75,9	114,4	80
La	19,4	24,5	21,2	22,2	25,5	23	25,1	22,8	25,5
Ce	45,1	56,6	45,1	51,3	57,1	52	55	51,7	57,1
Pr	6,9	7,7	5,91	7,71	8,2	7,9	7,8	7,40	7,7
Nd	28,8	34,3	26,8	32,2	35,9	32	34	31,54	33,9
Sm	6,4	7,7	6,4	6,90	8,4	6,8	7,7	7,2	7,6
Eu	2,0	2,5	2,1	2,21	2,6	2,2	2,8	2,40	2,7
Gd	6,3	7,7	6,3	7,1	8,4	6,9	7,8	7,1	7,9
Tb	0,95	1,15	0,95	1,1	1,2	1,08	1,11	1,1	1,2
Dy	5,2	5,92	5,2	5,5	6,4	5,6	5,6	5,62	5,62
Ho	0,9	1,1	0,9	1,1	1,03	0,99	1,03	0,98	1,1
Er	2,2	2,6	2,3	2,42	2,9	2,5	2,6	2,5	2,63
Tm	0,3	0,39	0,33	0,34	0,35	0,35	0,34	0,34	0,35
Yb	1,86	2,33	1,96	1,8	2,35	1,99	2,1	2,03	2,2
Lu	0,25	0,33	0,28	0,23	0,32	0,3	0,3	0,29	0,32
Hf	5,7	6,61	5,4	6,4	6,5	6	6,8	6,20	6,3
Ta	1,35	1,75	1,3	1,63	1,8	1,66	1,85	1,63	1,9
W	0,49	8,72	1,48	0,52	0,99	0,68	1,4	2,03	1,5
Th	1,8	2,33	1,96	2,21	2,3	2,1	2,2	2,13	2,3
U	0,55	0,95	0,63	0,71	0,95	0,6	0,71	0,73	0,72
Cu	22,7	32,7	25,2	34,5	78,9	98,7	56,2	55,7	48,9
Pb	14,1	13,5	12,1	11,4	14,8	15,2	14,3	13,5	15,0
Zn	65,9	76,8	77,1	84,1	90,1	90,6	86,8	88,3	97,4
Ag	13,1	14,6	15,7	12,1	18,7	19,1	13,4	12,7	14,1
Au	12,6	13,1	24,0	23,7	149,8	150,7	23,3	12,8	170,9
ΣREE	153,5	183,3	150,4	169,7	189,8	171,6	180,8	170,1	183,8
(La/Yb)N	6,9	6,9	7,2	8,2	7,2	7,7	7,9	7,5	7,6
Eu/Eu*	0,96	0,99	1,01	0,97	0,95	0,99	1,1	1,03	1,01
U/Th	0,31	0,41	0,32	0,32	0,41	0,29	0,32	0,34	0,31
Nb/Ta	17,6	14,4	16,7	17,4	16,2	16,3	15,3	15,8	14,2

Примечание. Пикродолериты: 1–3, 5, 8; долериты: 4, 6, 7, 9.

Notes. Picrodolerites: 1–3, 5, 8. Dolerites: 4, 6, 7, 9.

Все разновидности пород относятся к высокотитанистым образованиям, характеризующимся повышенными концентрациями Sc, V, Cr, Ni, Co. В некоторых разностях фиксируется повышенное содержание золота. Отношение Eu/Eu\* варьирует незначительно, слабо отклоняясь от такого же показателя в хондритах.

На канонических диаграммах фигуративные точки составов пикродолеритов и долеритов попадают в поля пералюминиевых и магнезиальных типов (рис. 3).

#### Оруденение Мурзинского рудного поля

На месторождении Мурзинское I известно золотое оруденение разных типов: золото-скарновое, золото-сульфидно-кварцевое, золотоносных метасоматитов и золотоносных кор выветривания. Общее количество добытого на месторождении золота не превышает 1000 кг. Средний процент извлечения его из руды около 45 %. Помимо золота ранее добывалась медь (из скарнового тела).

Золото-скарновый и золото-ртутный типы представлены линейными минерализованными зонами дробления с золотосодержащей медной минерализацией, наложенной на скарны. Последние в пределах таких зон хлоритизированы и окварцованы, содержат прожилки, вкрапленность и массивные выделения сульфидов: халькопирит, пирит, борнит, галенит, сфалерит, пирротин, арсенопирит. В таких образованиях содержания золота 0,1...60 г/т. Золото относительно крупное до 1...2 мм. А.С. Борисенко утверждает, что к золото-скарновому типу можно отнести только часть руд, в виде слабо проявленной постскарновой высокотемпературной сульфидной минерализации (халькопирит, пирит). Основные руды месторождения связаны с минерализованными зонами дробления и сопровождающими их метасоматитами. Они являются низкотемпературными и проявлены не только в скарнах, но и в сланцах, алевролитах и известняках. Здесь золото ассоциирует с киноварью, баритом, шеелитом, адуляром и другими низкотемпературными минералами. Все это позволяет отнести золотое оруденение Мурзинского месторождения к комплексному золото-скарновому и золото-ртутному типам.

Золото-сульфидно-кварцевый тип представлен жилами и жильными зонами среди роговиков и скарнов, наиболее интенсивно проявлен на уч. Лога Рудного. В вершине лога вскрыта мощная, более 30 м, кварцево-жильная зона, представленная несколькими кварцевыми жилами мощностью до 1,5 м и сопровождающим их кварцевым штокверком. Рудная минерализация представлена крупнозернистым пиритом, халькопиритом и галенитом. Содержание золота колеблется в значительных пределах от 0,1 г/т до ураганных (1500 г/т). На юг от этого участка прослежено шесть золоторудных кварцевых жил меридионального простирания. Протяженность жил до 800 м, падение СВ-В под углом 45...80°, мощность колеблется в широких

пределах 0,2...3,0 м. В окисленных кварцево-жильных рудах участка Южного, по архивным данным, отмечались содержания: золота до 1,5 кг/т, серебра – 5,2 кг/т и меди до 15 %. По материалам разных лет в рудных телах присутствует медь в количестве до 1,8 %, серебро – до 31 г/т, цинк – до 0,16 %, свинец – до 0,1 %. Средние содержания золота при подсчете запасов принимались: 1) по кварцевым жилам – 3,9...4,9 г/т; 2) по скарновым телам – 3,6...3,8 г/т. Пробность золота 850...905 ‰.

*Золотоносные коры выветривания* развиты по минерализованной зоне на глубину до 100 м. Представлены пористыми, рыхлыми золотоносными корами выветривания каолинит-гидрослюдистого типа. Из первичных минералов отмечаются золото, киноварь, барит, шеелит и гематит. Золото в корках выветривания тонкое – 80 % класса – 0,1 мм. Содержание золота в коре выветривания от следов до 8...10 г/т, среднее 2...3 г/т. Рудные тела участка Лога Рудного представляют собой крупные рудные тела мощностью до 50 м, протяженностью более 400 м и прослеженные на глубину до 100...150 м, а по отдельным пересечениям до 250 м.

В 1998 г. старательской артелью ООО «Поиск» представлен на рассмотрение территориальной комиссии по запасам (ТКЗ) оперативный подсчет запасов золота и серебра центрального участка Лога Рудный Мурзинского I месторождения. Подсчет запасов выполнен на материалах геологоразведочных работ, проведенных силами Рудно-Алтайской, Северо-Алтайской и Алтайской геофизической экспедиций. В результате этих работ была выявлена протяженная (более 1 200 м) линейная зона золоторудной коры выветривания – Лога Рудный. Авторами подсчета запасов (Н.И. Гончаров, А.В. Валуев и др.) на участке Лога Рудный выделен низкотемпературный золото-ртутный формационный тип оруденения (тип Карлин).

Разведанное оруденение, по которому произведен подсчет запасов, представлено золотоносной корой выветривания линейного типа, где основным полезным ископаемым является золото (с содержанием 0,2...7,8 г/т), с сопутствующим серебром (от 2,0 до 6,4 г/т).

Подсчет запасов произведен до глубины 22 м в двух вариантах – с бортовым содержанием условного золота 1 г/т (коэффициент перевода серебра в условное золото – 0,044) и с бортовым содержанием золота 0,5 г/т.

ТКЗ приняла оперативный подсчет запасов по категории  $C_2$  золота 934,3 кг и серебра 1 597,1 кг, подсчитанных по второму варианту для отработки месторождения методом кучного выщелачивания (протокол ТКЗ от 11 июня 1998 г., № 725).

Прогнозные ресурсы золота категории  $P_1$  составляют 10 т.

*Месторождение Мурзинское II* расположено на западном склоне горы Мурзинки в 300 м от вершины. В зоне разлома широтного простирания лока-

лизованы кварцевые жилы мощностью 0,5 м, пересекающие скарны и эпидозиты. Жилы сложены серым кварцем с вкрапленностью сульфидов – пирита, халькопирита, галенита и сфалерита. Кроме того, имеются скарновые руды, обычно раздробленные и содержащие прожилки, вкрапленники малахита, азурита, халькопирита, железной слюдки, лимонита и золота. По результатам работ разных лет в рудах содержится от «следов» до 232 г/т золота, 4,34...39,2 г/т серебра, 1,84...2,8 % меди, 0,07...0,42 % цинка и 0,01...0,06 % свинца. В протяженных зонах кварц-турмалиновых метасоматитов содержания золота достигают 1...2 г/т. Пробность эндогенного золота из оруденелых скарнов и кварцево-жильных зон варьирует в пределах 634...959 ‰. Данные о запасах и количестве добытой руды и металла отсутствуют. Прогнозные ресурсы золота категории  $P_1$  – 15,0 т.

*Месторождение Мурзинское III* находится севернее дер. Мурзинка в районе г. Сурчихи. Собственно месторождением, представляющим промышленный интерес, является «железная шляпа» сульфидного оруденения с убогим содержанием полиметаллов, расположенная среди отложений нижнеануйской серии нижнего-среднего ордовика. Первичные сульфидные руды встречены в одной из скважин на глубине 93,7...96,9 м и залегают среди вторичных кварцитов и песчаников. Руды сложены пиритом с редкими включениями халькопирита, халькозина, галенита и сфалерита. Граница оруденения с вмещающими породами нечеткая, переход постепенный. «Железная шляпа» имеет площадь 0,1 км<sup>2</sup>. Выделено 7 рудных тел линзообразной формы, залегающих согласно с вмещающими породами. Контуры рудных тел нечеткие. Мощность – 2...3 м, реже – 60 м. Длина по простиранию не превышает 160...200 м. Окисленные руды сложены бурым железняком, гематитом, смитсонитом, ярозитом, купритом. Из нерудных присутствуют опал, халцедон, хлорит и серицит, эпидот, кальцит. В «сыпучке» и буром железняке содержится до 0,17 % меди, до 3,36 % свинца, до 0,58 % цинка.

Содержания золота в окисленных рудах составляют 1,6...10,5 г/т, серебра до 56 г/т, свинца 0,1...0,24 %, цинка 0,5...1,59 %. При отработке отмечались высокие содержания золота – до 289,6 г/т. Наблюдается приуроченность обогащенной золотом «сыпучки» к границе с отбеленными породами. Золото очень мелкое и извлекалось только с применением амальгамации. Причем, извлечение его было довольно низким – 50...54,7 %. Добыто к 1944 г. 127 кг золота. Месторождение не изучено на глубину.

*Мурзинское рудное поле* фиксируется аномальной структурой геохимического поля (АСГП) площадью 54 км<sup>2</sup>, характеризующейся контрастными вторичными ореолами и потоками рассеяния золота интенсивностью 0,005...0,5 г/т, мышьяка 50...1500 г/т, серебра 0,01...1 г/т, сурьмы 50 г/т, меди 60...500 г/т, свинца 60...80 г/т, цинка

200...800 г/т, молибдена 3...5 г/т, висмута 1...5 г/т, марганца 1000...10000 г/т. Ранжированный ряд химических элементов группы накопления АСПИ имеет следующий вид:  $Au_9^{478}As_9^{351}Bi_3^{89}Cu_2^{94}$ . Средний коэффициент вариации 253 %, рудный объект является дифференцированным, следовательно, перспективным. Интенсивность АСПИ средняя. Для АСПИ характерны значимые коэффициенты корреляции золота с медью (0,87), серебром (0,83), свинцом, цинком (0,80), висмутом (0,74), марганцем (0,63), кобальтом (0,52), молибденом (0,46), титаном (0,33). Здесь прогнозируется золото-сульфидно-кварцевый и золото-скарновый типы оруденения. Прогнозные ресурсы золота категории  $P_3$ , оцененные по параметрам его вторичных ореолов рассеяния, составляют 43 т.

Кроме указанного геолого-промышленного типа золотого оруденения в пределах рудного поля возможно выявление руд золото-серебряной формации в среднедевонских вулканитах. В частности, в Ракитинской и Левоталицкой экстрюзиях

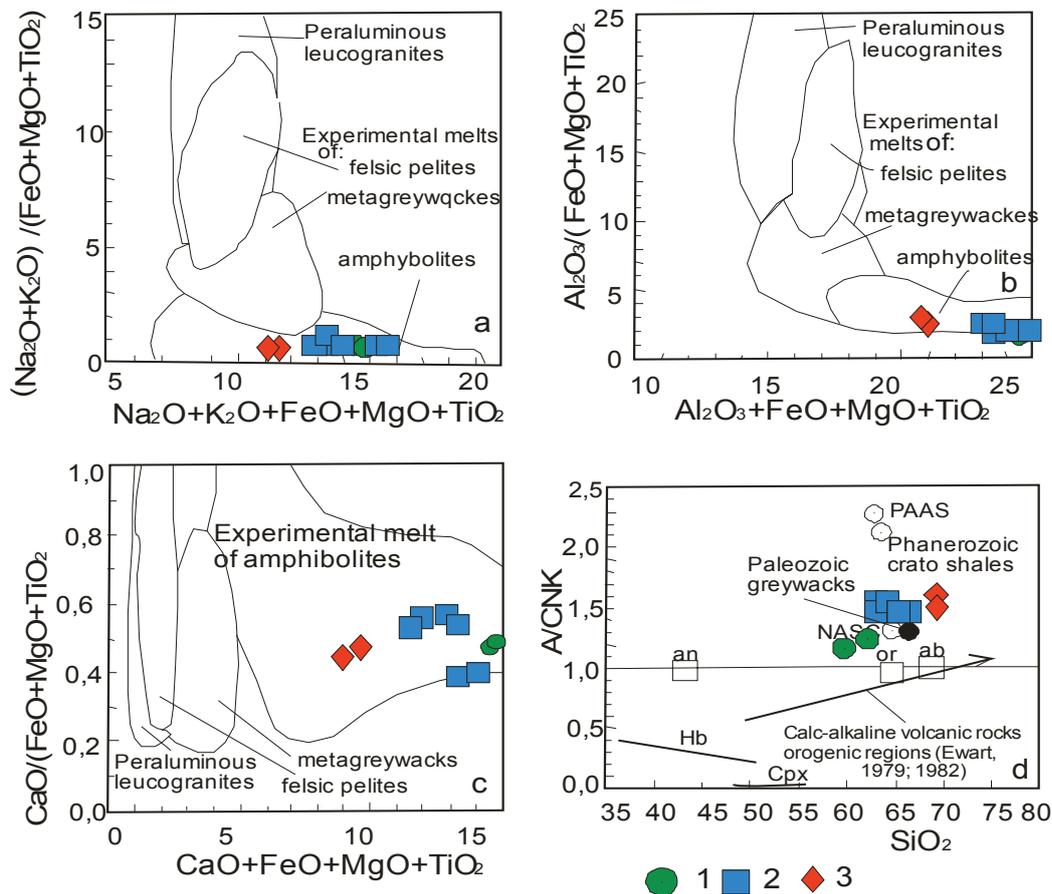
отмечается площадная березитизация и кремнеземность, где содержание пирита составляет 15 %. По данным бурения, кора выветривания по таким породам прослеживается до глубины 150...200 м.

Общая оценка запасов и прогнозных ресурсов рудного золота по Мурзинскому рудному полю составляет: запасы категорий  $C_1+C_2$  – 914 кг; ресурсы категории  $P_1$  – 10 т, категории  $P_2$  – 50 т.

#### Интерпретация результатов

Большое значение в понимании генезиса пород имеет источник плавления, за счёт которого образуются конкретные породные типы. На экспериментальных диаграммах, базирующихся на данных плавления различных источников, породы Мурзинского массива попадают в поле плавления амфиболитов (рис. 4, а, б, с).

Соотношение  $A/CNK-SiO_2$  в породах массива отвечает также плавлению и палеозойских граувак (рис. 4, d). Следовательно, имело место сме-



**Рис. 4.** Экспериментальные диаграммы: (а), (б), (с) – диаграммы композиционных экспериментальных расплавов из плавления фельзических пелитов (мусковитовых сланцев, метаграувак и амфиболитов) для пород Мурзинского массива; (d) – диаграмма  $SiO_2-A/CNK$  для пород Мурзинского массива. Тренд известково-щелочного фракционирования вулканических пород орогенных регионов, по [9, 10]. А –  $Al_2O_3$ , CNK – сумма CaO,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ . Остальные условные обозначения – на рис. 2

**Fig. 4.** Experimental diagrams: (a), (b), (c) are the diagrams of composite experimental melts from melting of felsic pelites (muscovites schists, metagraywackes, and amfibolites) for rocks of Murzinsky massif. Trend of calc-alkalic fractionation volcanic rocks orogenic regions, after [9, 10]. A –  $Al_2O_3$ , CNK – sum CaO,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ . Legend is in Fig. 2

шение расплавов разного состава с образованием гибридных пород. На экспериментальной диаграмме, позволяющей выявлять давление при плавлении родоначального субстрата и моделирующей составы расплавов, генерированные гибридизацией высоко-алюминиевых оливиновых толеитов с метаграувакками, фигуративные точки составов пород Мурзинского массива тяготеют к тренду низкого давления (рис. 5). Согласно экспериментальным данным, это давление составляло 3...5 кбар [11].

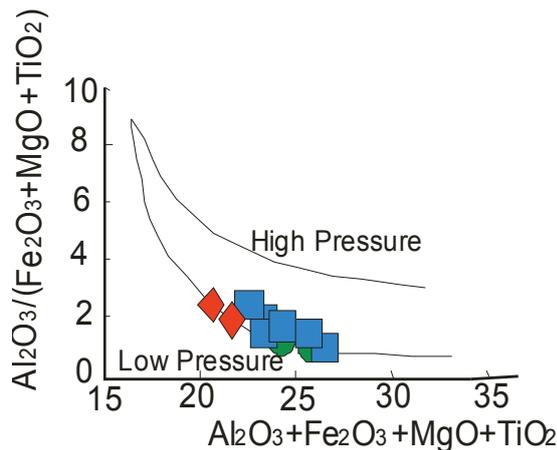


Рис. 5. Экспериментальная диаграмма соотношений  $Al_2O_3/(Fe_2O_3+MgO+TiO_2)-Al_2O_3+Fe_2O_3+MgO+TiO_2$  по [11] для пород Мурзинского массива. Условные обозначения – на рис. 2

Fig. 5. Experimental diagrams of ratio  $Al_2O_3/(Fe_2O_3+MgO+TiO_2)-Al_2O_3+Fe_2O_3+MgO+TiO_2$  after [11] for rocks of Murzinsky massif. Legend is in Fig. 2

Приоритетное значение придаётся в последнее время отношению Nb/Ta в островодужных магмах в процессе их генерации с участием процессов фракционирования минералов при различных температурах, фугитивности кислорода и насыщенности расплавов водой [12]. Считается, что плавление источника пород, содержащего Ti-обогащённые фазы (рутила, ильменита), будет генерировать расплавы с высоким отношением Nb/Ta (>25), в то время как плавление источника с амфиболом приводит к формированию расплавов с более низким отношением Nb/Ta (<25) [13, 14]. В породных типах Мурзинского массива отношения Nb/Ta варьируют от 9,3 до 15,1 и отвечают плавлению амфибол-содержащего источника.

На диаграммах Sr/Y–Y и La/Yb–Yb все породы попадают в поле нормальных андезитов-дацитов-риолитов, а фигуративные точки составов выстраиваются почти параллельно тренду кристаллизационного фракционирования (рис. 6, а, б).

Следовательно, формирование гранитоидов Мурзинского массива происходило по сложному сценарию. Источником плавления служили амфиболиты и граувакки при низком давлении (3...5 кбар), а дериваты глубинного очага от кварцевых диоритов до меланогранитов образовались в результате кристаллизационной дифференциации

расплавов.

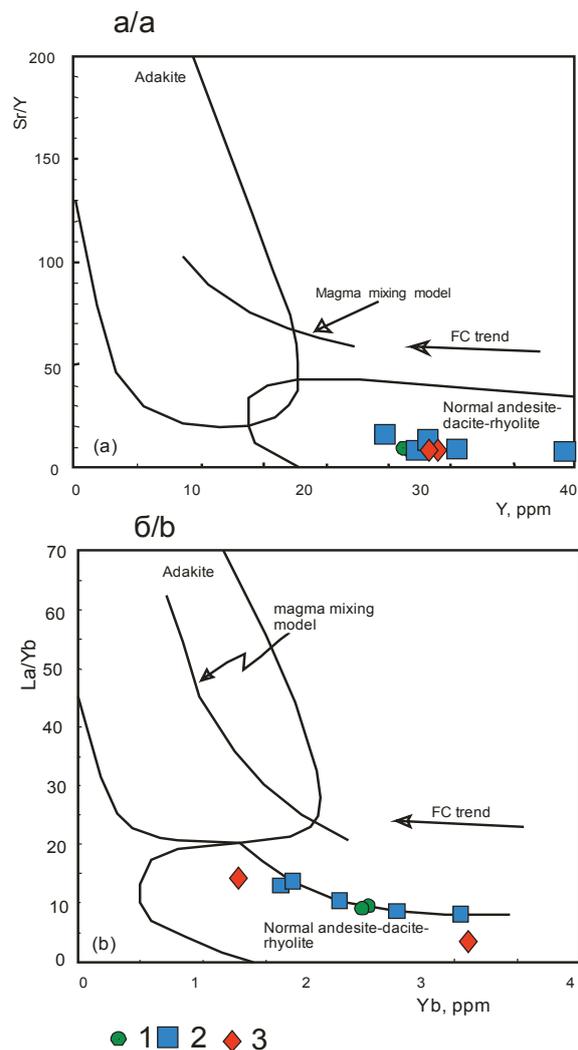


Рис. 6. Диаграммы: а) Sr/Y–Y; б) La/Yb–Yb по [15] для пород Точильного ареала. Поля пород: Adakite – адакитов, Normal andesite-dacite-rhyolite – нормальных андезитов-дацитов-риолитов. FC trend – тренд фракционной кристаллизации; модель магматического смешения по [16]. Остальные условные обозначения – на рис. 2

Fig. 6. Plots of: а) Sr/Y–Y; б) La/Yb–Yb after [15] for rocks of Tochilny areal. Fractional crystallization (FC) trend. Magma mixing modeling follows [16]. Legend is in Fig. 2

Проявление значимых величин тетрадного эффекта фракционирования (ТЭФ) РЗЭ М-типа в некоторых разностях пород Мурзинского массива свидетельствует о значительной роли флюидного режима и в особенности таких летучих компонентов, как F, Cl, H<sub>2</sub>O и других. Указанные летучие компоненты обеспечивали селекционирование металлов из расплавов и перенос их к местам рудоотложения. Для основных рудообразующих металлов – Cu и Au, построены диаграммы зависимостей концентраций золота и меди в породах от величин ТЭФ РЗЭ. Для обоих металлов наблюдаются тренды увеличения их концентраций с повышением величин ТЭФ РЗЭ (рис. 7, 8).

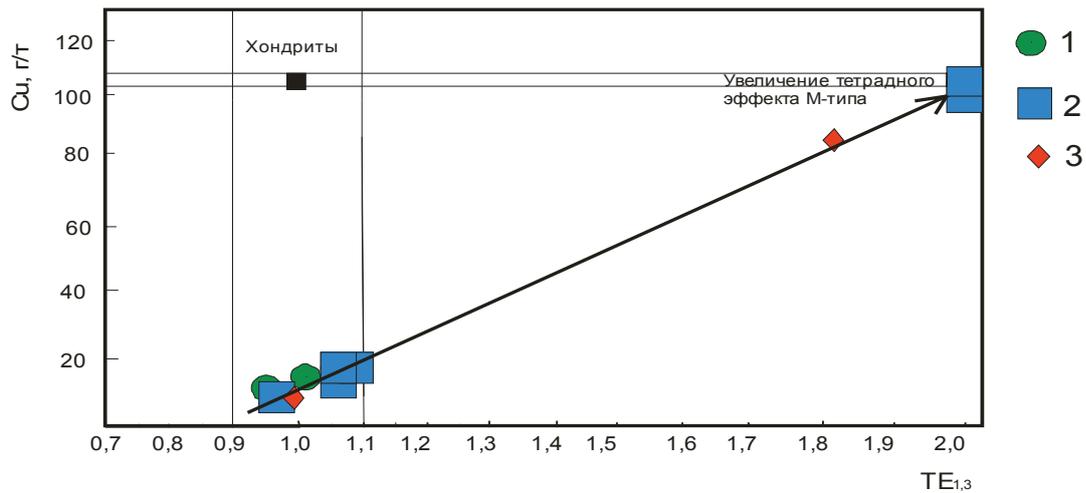


Рис. 7. Диаграмма  $Cu-TE_{1,3}$  по [17] для пород Мурзинского массива. Концентрации меди в хондритах по [18]. Условные обозначения – как на рис. 2

Fig. 7. Diagram  $Cu-TE_{1,3}$  after [17] for rocks of Murzinsky massif. Concentration of copper in chondrites is after [18]. Legend is in Fig. 2

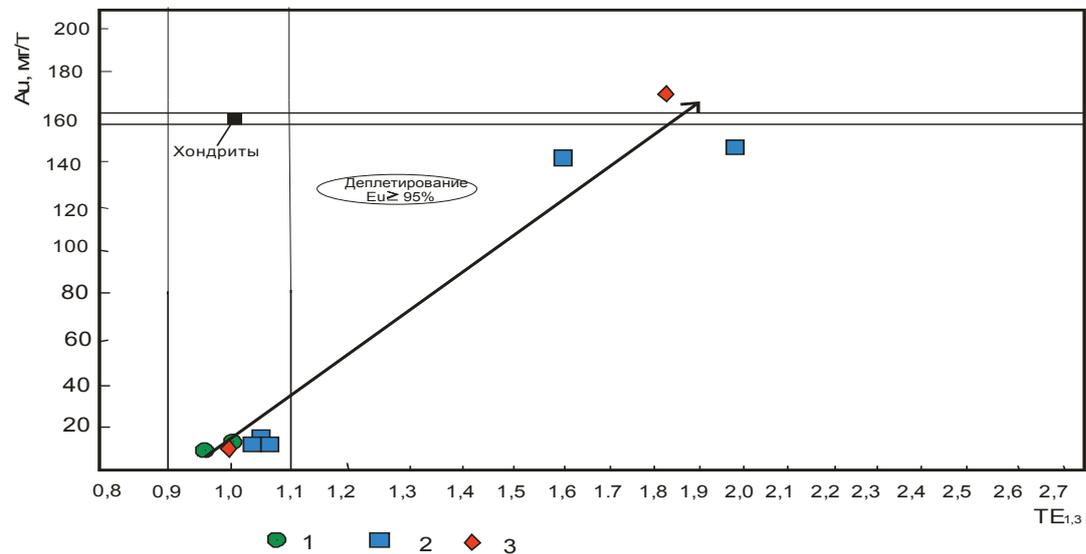


Рис. 8. Диаграмма  $Au-TE_{1,3}$  для пород Мурзинского массива. Концентрации золота в хондритах по [18]. Условные обозначения – как на рис. 2

Fig. 8. Diagram  $Au-TE_{1,3}$  for rocks of Murzinsky massif. Concentration of gold in chondrites is after [18]. Legend is in Fig. 2

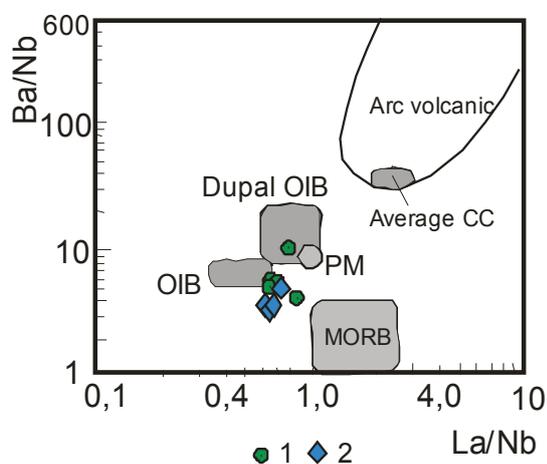
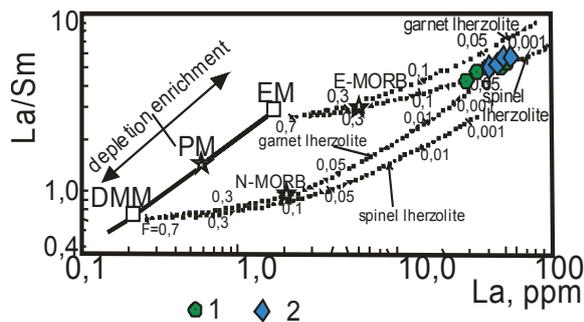


Рис. 9. Диаграмма  $Ba/Nb-La/Nb$  по [19] для даек пикродолеритов и долеритов терехтинского комплекса. Поля базальтоидов: Arc volcanic – вулканических дуг; Average CC – среднее для базальтов континентальной коры; Dupal OIB – базальтов океанических островов аномалии Dupal; PM – примитивной мантии; OIB – базальтов океанических островов; MORB – базальтов срединно-океанических хребтов. 1 – пикродолериты, 2 – долериты

Fig. 9. Diagram  $Ba/Nb-La/Nb$  after [19] for dikes of picrodolerites and dolerites of Terekhtinsky complex. Field of basalts: Arc volcanic; Average CC – Average for basalts of continental crust; Dupal OIB – basalts of oceanic islands of anomaly Dupal; PM – primitive mantle; OIB – basalts of oceanic island; MORB – basalts of middle-oceanic ridge. 1 – picrodolerites, 2 – dolerites

Дайки пикродолеритов и долеритов терехтинского комплекса по отношениям Ва/Nb – La/Nb тяготеют к полям базальтов океанических островов (ОИВ) и Дюпаль аномалии базальтов океанических островов (рис. 9).

Соотношение La/Sm – La позволяет рассматривать их производными обогащённой мантии. Фигуративные точки составов попадают на кривую плавления шпинелевых лерцолитов с низкой степенью частичного плавления 0,001...0,01 (рис. 10).



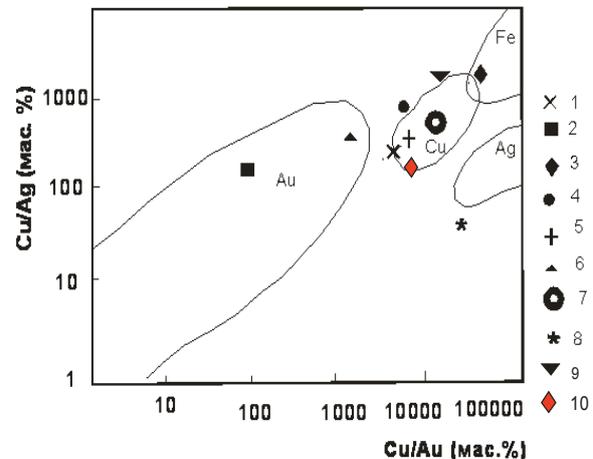
**Рис. 10.** Диаграмма La/Sm–La по [20] для пород даек терехтинского комплекса. DMM – деплетированный мантийный источник MORB; PM – примитивная мантия; EM – обогащённый мантийный источник; E-MORB и N-MORB – составы обогащённых (E) и нормальных (N) базальтов срединно-океанических хребтов; точечные линии – тренды плавления источников DMM и EM, засечки с цифрами на точечных линиях – степень частичного плавления для соответствующих мантийных источников. Остальные условные обозначения – на рис. 9

**Fig. 10.** Diagram La/Sm–La after [20] for rocks of dikes of Terkhtinsky complex. DMM is the depleted mantle source MORB; PM is the primitive mantle; EM is the enriched mantle source; E-MORB and N-MORB are the compositions of enriched (E) and normal (N) basalts of middle-oceanic ridges; point lines are the trends of melting sources DMM and EM, serifs with figures on the point lines are the degrees of partial melting for corresponding mantle sources. Legend is in Fig. 9

Изучение особенностей формирования рудных агрегатов на месторождении показало, что солёность включений в минералах уменьшается от скарнов к гидротермальному продуктивному этапу. Она менялась от весьма высокой (36...40 вес. % NaCl) в скарнах до низкой в пневмолито-гидротермальных скарновых изменениях (4,6...5,9 вес. % NaCl) и весьма низкой в продуктивной минерализации гидротермального этапа (0,5...4,8 вес. % NaCl). Такая картина снижения температур гомогенизации газовой-жидких включений и их солёности указывает на участие ювенильных флюидов магматогенного происхождения на первом этапе и смешение ювенильного и холодного, разбавленного раствора на заключительных этапах.

Единичные определения соотношений изотопов серы в сульфидах Мурзинского рудного поля дают незначительные отклонения от метеоритного стандарта. Для золото-медно-скарнового оруденения обоих месторождений в пирите II генерации  $\delta^{34}\text{S}$  (‰) составляет +3,2, в борните от +2,1 до +5,2.

На диаграмме соотношений Cu/Ag – Cu/Au Мурзинское I месторождение располагается вблизи Синюхинского (рис. 11) и должно относиться к комплексным объектам («бипродукты») [21].



**Рис. 11.** Диаграмма соотношений в рудах Cu/Ag–Cu/Au для скарновых месторождений Горного Алтая. Поля золотосодержащих скарнов по [21]: Au – золоторудные, Cu – меднорудные, Fe – железорудные, Ag – серебряные. Золотосодержащие скарновые месторождения Горного Алтая: 1 – Синюхинское, 2 – Чойское, 3 – Майское, 4 – Ульменское, 5 – Оюкское, 6 – Баянхинское, 7 – Лысухинское, 8 – Восточный Карагу, 9 – Кутерьбушинское, 10 – Мурзинское I

**Fig. 11.** Diagram of ratio in ores Cu/Ag–Cu/Au for skarn deposits of Gorny Altai. Fields of gold-bearing skarns after [21]: Au – gold ore deposits, Cu – copper ore deposits, Ag – silver ore deposits. Gold-bearing skarns deposits of Gorny Altai: 1 – Sinyukhinskoe, 2 – Choyskoe, 3 – Mayskoe, 4 – Ulmenskoe, 5 – Oyukskoe, 6 – Bayanikhinskoe, 7 – Lysukhinskoe, 8 – Vostochny Karagu, 9 – Kuterbushinskoe, 10 – Murzinskoe I

Самое позднее золото-ртутное оруденение парагенетически и пространственно связано с дайками пикродолеритов и долеритов терехтинского комплекса. На это указывают повышенные концентрации золота и серебра в некоторых разностях даек.

#### Заключение

Магматизм Мурзинского рудного поля включает гранитоиды массива и дайки пикродолеритов и долеритов. Гранитоиды Мурзинского массива относятся к нормальной андезит-дацит-риолитовой серии, формировавшейся за счёт плавления амфиболитов и граувакк нижней коры при относительно невысоком давлении (3...5 кбар). В породах проявлен тетрадный эффект фракционирования РЗЭ М-типа, с повышением величины которого происходит увеличение концентраций меди и золота. Образование ранних золото-медно-скарновых руд связано парагенетически с гранитоидами Мурзинского массива. Дайки пикродолеритов и долеритов близки к базальтоидам океанических островов, формировавшихся за счёт низкой степени частичного плавления шпинелевых лерцолитов.

Таким образом, золото-медно-скарновые месторождения Мурзинского рудного поля следует отно-

силь к комплексным объектам («бипродукты»), формирующимся в меняющихся условиях флюидного режима: на ранних этапах с участием ювенильных магматогенных флюидов, а на заключительном этапе – при смешении ювенильных и разбавленных холдных растворов. Оторванное по времени золоторудное оруденение связано с глубинным очагом, генерировавшим дайки пикродолеритов и долеритов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев А.И. Металлогения золота Горного Алтая и южной части Горной Шории. – Томск: Изд-во STT, 2003. – 308 с. DOI: 10.12731/nkras.ru/MZGA.2015.196.
2. Comparison of the native antimony-bearing Paiting gold deposit, Guizhou Province, China, with Carlin-type gold deposits, Nevada, USA / Z.-J. Xie, Y. Xia, J.S. Cline, B.-W. Yan, Z.-P. Wang, D.-T. Wei // Mineralium Deposita. – 2017. – V. 52. – № 1. – P. 69–84. DOI: 10.1007/s00126-016-0647-y.
3. Association of gold with uraninite and pyrobitumen in the meta-volcanic rock hosted hydrothermal Au-U mineralisation at Rompas, Peräpohja Schist Belt, northern Finland / F. Molnár, H. Oduro, N. D. J. Cook, E. Pohjolainen, Á. Takács, H. O'Brien, L. Pakkanen, B. Johanson, R. Wirth // Mineralium Deposita. – 2016. – V. 51. – № 5. – P. 681–702. DOI: 10.1007/s00126-015-0636-6.
4. Основные возрастные рубежи интрузивного магматизма Кузнецкого Алатау и Калбы (по данным U-Pb изотопного датирования) / А.Г. Владимиров, М.С. Козлов, С.П. Шокальский, В.А. Халилов, С.Н. Руднев, Н.Н. Крук, С.А. Выставной, С.М. Борисов, Ю.К. Березиков, А.Н. Мещер, Г.А. Бабин, А.Н. Мамлин, О.М. Мурзин, Г.В. Назаров, В.А. Макаров // Геология и геофизика. – 2001. – № 8. – С. 1157–1178.
5. Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: meteoritic and solar // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1989. – V. 53. – № 1. – P. 197–214. DOI: 10.1016/0016-7037(89)90286-X.
6. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu\*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1999. – V. 63. – № 3–4. – P. 489–508. DOI: 10.1016/S0016-7037(99)00027-7.
7. Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids // Geological Society of America Bulletin. – 1989. – V. 101. – № 5. – P. 635–643. DOI: 10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TD0G>2.3.CO;2.
8. Villaseca C., Barbero L., Herreros V. A re-examination of the tectonics of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts // Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences. – 1998. – V. 89. – № 2. – P. 113–119. DOI: 10.1017/S0263593300007045.
9. Ewart A. A review of the mineralogy and chemistry of Tertiary-Recent dacitic, latitic, rhyolitic, and related salic volcanic rocks // Developments in petrology. V. 6 «Trondhjemites, Dacites, and Related Rocks». – Amsterdam, 1979. – P. 13–121. DOI: 10.1016/B978-0-444-41765-7.50007-1.
10. Ewart A. The mineralogy and petrology of Tertiary-Recent orogenic volcanic rocks: with a special reference to the andesitic-basaltic compositional range // Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks. – Chichester: Wiley, 1982. – P. 25–95. DOI: 10.1002/esp.3290080112.

#### Информация об авторах

**Гусев А.И.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры естественно-научных дисциплин, безопасности жизнедеятельности и туризма Алтайского государственного гуманитарно-педагогического университета им. В.М. Шукшина.

**Табакаева Е.М.**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник управления научно-исследовательской деятельности Алтайского государственного гуманитарно-педагогического университета им. В.М. Шукшина.

Значительный объём золота на Мурзинских месторождениях приходится и на гипергенный тип (коры выветривания).

*Работа выполнена при поддержке регионального гранта РФФИ «Петрология магматизма и генезис оруденения Мурзинского месторождения Алтайского края» (номер проекта: 17-45-220052, код и название и конкурса: р. а, региональный конкурс проектов фундаментальных научных исследований).*

11. Patiño Douce A.E., Beard J.S. Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar // Journal of Petrology. – 1995. – V. 36. – № 3. – P. 707–738. DOI: 10.1093/petrology/36.3.707.
12. Li L., Xiong X.L., Liu X.C. Nb/Ta Fractionation by Amphibole in Hydrous Basaltic Systems: Implications for Arc Magma Evolution and Continental Crust Formation // Journal of Petrology. – 2017. – V. 58. – № 1. – P. 3–28. DOI: 10.1093/petrology/egw070.
13. Foley S., Tiepolo M., Vannucci R. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones // Nature. – 2002. – V. 417. – № 6891. – P. 837–840. DOI: 10.1038/nature00799.
14. Mechanisms of Archean crust formation inferred from high-precision HFSE systematics in TTGs / J.E. Hoffmann, C. Münker, T. Næraa, M.T. Rosing, D. Herwartz, D. Garbe-Schönberg, H. Svahnberg // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2011. – V. 75. – № 15. – P. 4157–4178. DOI: 10.1016/j.gca.2011.04.027.
15. Richards J.P., Kerrich R. Adakite-like rocks: their diverse origins and questionable role in metallogenesis // Economic Geology. – 2007. – V. 102. – № 4. – P. 537–576. DOI: 10.2113/gsecongeo.102.4.537.
16. The generation of high Sr/Y plutons following Late Jurassic arc-arc collision, Blue Mountains province, NE Oregon / J.J. Schwartz, K. Johnson, E.A. Miranda, J.L. Wooden // Lithos. – 2011. – V. 126. – № 1–2. – P. 22–41. DOI: 10.1016/j.lithos.2011.05.005.
17. Гусев А.И. Кузнецовская магмо-рудно-метасоматическая система Западного Алтая // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2016. – № 1. – С. 104–114.
18. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. The Solar System: chemistry as a key to its origin – Compositions of chondrites // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences. – 1988. – V. 325. – № 1587. – P. 535–544. DOI: 10.1098/rsta.1988.0066.
19. Erratum to «Flood basalt-related Fe-Ti oxide deposits in the Emeishan large igneous province, SW China» [Lithos 119 (2010) 123–136] / K.-N. Pang, M.-F. Zhou, L. Qi, G. Shellnutt, C.Y. Wang, D. Zhao // Lithos. – 2013. – V. 162–163. – P. 331. DOI: 10.1016/j.lithos.2012.12.009.
20. Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey / E. Aldanmaz, J.A. Pearce, M.F. Thirlwall, J.G. Mitchell // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2000. – V. 102. – № 1–2. – P. 67–95. DOI: 10.1016/S0377-0273(00)00182-7.
21. Gold-bearing skarns / T.G. Theodore, G.J. Orris, J.M. Hammarstrom, J.D. Bliss // US Geological Survey Bulletin. – 1991. – № 1930. – P. 1–61.

Поступила 28.08.2017 г.

UDC 552.3:550.4:550.42:550.93

**MAGMATISM AND ORE DEPOSITS OF MURZINSKOE GOLD ORE FIELD (GORNYY ALTAI)**Anatoliy I. Gusev<sup>1</sup>,  
anzerg@mail.ruEvgeniya M. Tabakaeva<sup>1</sup>,  
tabakaeva16@mail.ru<sup>1</sup> Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University,  
53, Vladimir Korolenko street, Biysk, 659333, Russia.

**The relevance** of the discussed issue is caused by the need of researching petrology, geochemistry and ore mineralization of Murzinskoe ore field of Gornyy Altai. Different types of copper and gold mineralization at early stage are related in space and paragenetically to granitoids of Murzinsky stock. The late gold-mercury mineralization is related to dikes of picrodolerites and dolerites.

**The main aim** of the research is to study petrology, geochemical features of rocks and ore mineralization of Murzinsky stock using the experimental diagrams, which allow determining the genetic problems and the physico-chemical features of petrogenesis.

**The methods used in the study.** Rare and scattered elements were determined in rocks by inductively coupled plasma method on the mass spectrometer «OPTIMA-4300», the rest elements, including REE, were determined by La-ISP-MS methods in the Laboratory VSEGEI (Saint-Petersburg) and OIGaG SO RAN (Novosibirsk). The absolute age of forming rocks was determined by U-Pb SIMS (ion microprobe SHRIMP-II) method on zircon in the Laboratory VSEGEI (Saint-Petersburg) and IMGRE (Moscow).

**Results.** The paper introduces the data on geochemistry and petrology of granitoids of Murzinsky stock of Late Devonian and rare dikes of dolerites of Terekhtinsky complex of Late Permian-Early Triassic. Granitoids of Murzinsky massif refer to andesite-dacite-rhyolites of suite. The source of the granitoids is melting of amphibolites and graywackes of lower crust at considerably low pressure (3–5 kbar). Manifestation of tetrad effect fractionation of REE M-type in granites was correlated with concentration of copper and gold. Forming of early gold-copper-skarn ores is paragenetically related to granitoids of Murzinsky massif. Dikes of picrodolerites and dolerites were formed due to the low degree of partial melting of spinel lherzolites. These dikes are interpreted by oceanic island basalt derivatives. Time isolated gold-mercury ore mineralization is related to the deep spot generating dikes of picrodolerites and dolerites. Intrusive-connected gold-copper-skarn deposits of Murzinskoe ore field should be referred to the complex objects («biproductions»), formed in changing conditions of fluid regime. In early stages the juvenile magmatic fluids participated, but on the end stage ore-genesis took place under conditions of mixing juvenile and diluted cool solutions.

**Key words:**

Geochemistry, petrology, granitoids, dikes of picrodolerites, dolerites, partial melting, tetrad effect of REE fractionation, skarns, lodes, copper, gold, mercury.

The research was supported by the regional grant of RFBR «Petrology of magmatism and genesis of mineralization of Murzinskoe deposit in Altai Territory» (no. 17-45-220052, code and title of the competition: p\_a, regional competition of projects in fundamental scientific researches).

**REFERENCES**

- Gusev A.I. *Metallogeniya zolota Gornogo Altaya i yuzhnoy chasti Gornoy Shorii* [Metallogeny of gold in the Altai Mountains and the southern part of the Mountain Shoria]. Tomsk, STT Press, 2003. 308 p. DOI: 10.12731/nkras.ru/MZGA.2015.196.
- Xie Z.-J., Xia Y., Cline J.S., Yan B.-W., Wang Z.-P., Wei D.-T. Comparison of the native antimony-bearing Paiting gold deposit, Guizhou Province, China, with Carlin-type gold deposits, Nevada, USA. *Mineralium Deposita*, 2017, vol. 52, no. 1, pp. 69–84. DOI: 10.1007/s00126-016-0647-y.
- Molnár F., Oduro H., Cook N.D.J., Pohjola E., Takács Á., O'Brien H., Pakkanen L., Johanson B., Wirth R. Association of gold with uraninite and pyrobitumen in the metavolcanic rock hosted hydrothermal Au-U mineralisation at Rompas, Peräpohja Schist Belt, northern Finland. *Mineralium Deposita*, 2016, vol. 51, no. 5, pp. 681–702. DOI: 10.1007/s00126-015-0636-6.
- Vladimirov A.G., Kozlov M.S., Shokalskiy S.P., Khalilov V.A., Rudnev S.N., Kruk N.N., Vystavnoy S.A., Borisov S.M., Berezhkov Yu.K., Metsner A.N., Babin G.A., Mamlin A.N., Murzin O.M., Nazarov G.V., Makarov V.A. Osnovnye vozrastnye rubezhi intruzivnogo magmatizma Kuznetskogo Alatau i Kalby (po dannym U-Pb izotopnogo datirovaniya) [The main age boundaries of the intrusive magmatism of the Kuznetsk Alatau and Kalba (according to U-Pb isotope dating data)]. *Russian Geology and Geophysics*, 2001, no. 8, pp. 1157–1178.
- Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, vol. 53, no. 1, pp. 197–214. DOI: 10.1016/0016-7037(89)90286-X.
- Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu\*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, vol. 63, no. 3–4, pp. 489–508. DOI: 10.1016/S0016-7037(99)00027-7.
- Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, vol. 101, no. 5, pp. 635–643. DOI: 10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2.
- Villaseca C., Barbero L., Herreros V. A re-examination of the tectonics of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 1998, vol. 89, no. 2, pp. 113–119. DOI: 10.1017/S0263593300007045.
- Ewart A. A review of the mineralogy and chemistry of Tertiary-Recent dacitic, latitic, rhyolitic, and related salic volcanic rocks. In: *Developments in petrology*, V. 6: Trondhjemites, Dacites, and Related Rocks. Amsterdam, 1979. Ed. by F. Barker. pp. 13–121. DOI: 10.1016/B978-0-444-41765-7.50007-1.
- Ewart A. The mineralogy and petrology of Tertiary-Recent orogenic volcanic rocks: with a special reference to the andesitic-basaltic compositional range. In: *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. Chichester, Wiley, 1982. Ed. by R.S. Thorpe. pp. 25–95. DOI: 10.1002/esp.3290080112.

11. Patiño Douce A.E., Beard J.S. Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar. *Journal of Petrology*, 1995, vol. 36, no. 3, pp. 707–738. DOI: 10.1093/ptrology/36.3.707.
12. Li L., Xiong X.L., Liu X.C. Nb/Ta Fractionation by Amphibole in Hydrous Basaltic Systems: Implications for Arc Magma Evolution and Continental Crust Formation. *Journal of Petrology*, 2017, vol. 58, no. 1, pp. 3–28. DOI: 10.1093/ptrology/egw070.
13. Foley S., Tiepolo M., Vannucci R. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones. *Nature*, 2002, vol. 417, no. 6891, pp. 837–840. DOI: 10.1038/nature00799.
14. Hoffmann J.E., Münker C., Næraa T., Rosing M.T., Herwartz D., Garbe-Schönberg D., Svahnberg H. Mechanisms of Archean crust formation inferred from high-precision HFSE systematics in TTGs. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, vol. 75, no. 15, pp. 4157–4178. DOI: 10.1016/j.gca.2011.04.027.
15. Richards J.P., Kerrich R. Adakite-like rocks: their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Economic Geology*, 2007, vol. 102, no. 4, pp. 537–576. DOI: 10.2113/gsecongeo.102.4.537.
16. Schwartz J.J., Johnson K., Miranda E.A., Wooden J.L. The generation of high Sr/Y plutons following Late Jurassic arc–arc collision, Blue Mountains province, NE Oregon. *Lithos*, 2011, vol. 126, no. 1–2, pp. 22–41. DOI: 10.1016/j.lithos.2011.05.005.
17. Gusev A.I. Kuznetsovskaya magmo-rudno-metasomaticheskaya sistema Zapadnogo Altaya [The Kuznetsovskaya magma-metasomatic ore-bearing system in the western Altai Mountains]. *Geology and Mineral Resources of Siberia*, 2016, no. 1, pp. 104–114.
18. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. The Solar System: chemistry as a key to its origin – Compositions of chondrites. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences*, 1988, vol. 325, no. 1587, pp. 535–544. DOI: 10.1098/rsta.1988.0066.
19. Pang K.-N., Zhou M.-F., Qi L., Shellnutt G., Wang C.Y., Zhao D. Erratum to «Flood basalt-related Fe-Ti oxide deposits in the Emeishan large igneous province, SW China» [Lithos 119 (2010) 123–136]. *Lithos*, 2013, vol. 162–163, p. 331. DOI: 10.1016/j.lithos.2012.12.009.
20. Aldanmaz E., Pearce J.A., Thirlwall M.F., Mitchell J.G. Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2000, vol. 102, no. 1–2, pp. 67–95. DOI: 10.1016/S0377-0273(00)00182-7.
21. Theodore T.G., Orris G.J., Hammarstrom J.M., Bliss J.D. Gold-bearing skarns. *US Geological Survey Bulletin*, 1991, no. 1930, pp. 1–61.

Received: 28 August 2017.

#### Information about the authors

**Anatoliy I. Gusev**, Dr. Sc., professor, Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University.

**Evgeniya M. Tabakaeva**, Cand. Sc., researcher, Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University.

УДК 504.55.054:622(470.6)

## ПОГАШЕНИЕ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА ИЗОЛЯЦИЕЙ С СОХРАНЕНИЕМ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Голик Владимир Иванович<sup>1</sup>,  
v.i.golik@mail.ru

Разоренов Юрий Иванович<sup>1</sup>,  
yiri1963@mail.ru

<sup>1</sup> Северо-Кавказский государственный технологический университет,  
Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью сочетания принципов экономической эффективности управления состоянием массива при погашении образованных горными работами пустот и безопасности окружающей среды в районе добычи минеральных ресурсов в условиях увеличения объемов добычи минерального сырья для нужд населения.

**Цель:** разработка технологии добычи руды без заполнения пустот материалами, которые сохраняли бы земную поверхность от разрушения в случае выхода зоны обрушения пород до уровня наносов в течение неопределенно длительного времени после погашения выработок.

**Методы исследования:** критический анализ опыта разработки аналогичных по условиям локализации руд месторождений, физическое и математическое моделирование параметров технологий добычи и прогнозирование путей развития технологии и экспериментальное определение величины предельного по условию устойчивости пролета выработки.

**Результаты.** Показано, что устойчивость земной поверхности над погашаемым участком месторождения после его отработки обеспечивается предотвращением возможности возникновения деформационных явлений. Доказано, что месторождение с объемом пустот 2 млн м<sup>3</sup> может быть погашено без заполнения пустот закладочным материалом. Обоснована необходимость более полного учета геомеханических факторов при оценке эколого-экономической эффективности добычи минерального сырья. Приведена модель оценки эффективности подземной разработки месторождений в зависимости от использования свойств рудовмещающих массивов.

**Выводы.** Целенаправленное использование свойств рудовмещающих массивов во многом определяет показатели эффективности подземной разработки месторождений. Одним из основных вопросов эксплуатации является выбор параметров разработки, обеспечивающих сохранность земной поверхности.

### Ключевые слова:

Массив, порода, руда, технология добычи, погашение, выработка, моделирование, параметры, земная поверхность.

### Актуальность и цель исследования

Из земных недр извлекается около 200 видов полезных ископаемых, годовой объем мировой добычи минерального сырья достигает 17–18 млрд т горной массы [1].

Целью развития минерально-сырьевой базы экономик стран мира является удовлетворение возрастающих потребностей своего населения.

Подземным способом добывают две трети руд цветных и редких металлов, более половины минералов для химического производства, около 2/3 угля, почти 100 % калийных солей.

Несмотря на совершенствование техники и технологии подземной разработки месторождений полезных ископаемых, добыча ресурсов недр характеризуется снижением качества добываемых руд, увеличением потерь руды и разубоживания и ухудшением технико-экономических показателей [2].

Это относится к маломощным рудным телам месторождений руд редких, благородных и цветных металлов пологого залегания. Разработка пологих рудных тел мощностью от 0,6–0,8 до 15 м с углом падения до 25° и породными включениями характеризуется ухудшением качества руды при добыче до 25–35 %, а малая мощность является причиной низкой производительности труда из-за сложности использования техники [3].

Для создания устойчивого состояния массива в таких условиях требуется большая площадь обнажения пород кровли с целью развития напряжений при соответствующих им деформациях.

При добыче металлических руд стараются уменьшать потери в охранных целиках за счет поддержания устойчивости пород кровли с помощью крепления, но это не всегда бывает надежно и эффективно, потому что при воздействии взрывной волны и механизмов крепь часто не работает в заданном режиме.

В этой связи совершенствование параметров существующих технологий разработки пологих маломощных рудных тел должно учитываться на основе закономерностей взаимодействия горнотехнических, геологических и геомеханических факторов.

Погашение выработанного пространства после выемки руды в рамках таких месторождений отличается ненадежностью управления напряжениями при усадке пород заполнения, трудностью контроля состояния погашенной выработки и развитием напряжений в окрестностях погашаемой выработки.

Метод изоляции чаще всего применяют при локализации месторождения в не представляющих ценности для хозяйства участках земной поверх-

ности. Опасность этого метода подтверждается практикой массовых обрушений вплоть до катастроф типа горного удара.

Трудности ретроспективной корректировки результатов управления горным давлением повышает важность объективного принятия решения по выбору метода погашения выработанного пространства, с учетом дальнейшей эксплуатации месторождений данного типа.

При подземном способе разработки уменьшаются выбросы в окружающую среду, сокращается отвлечение земли под инфраструктуру предприятий, обеспечиваются лучшие показатели извлекаемого из недр сырья, однако возрастают затраты на поддержание рудовмещающих массивов и земной поверхности над ними при выходе зоны влияния горных работ на земную поверхность. Положительные аспекты управления с сохранением земной поверхности усиливаются при использовании технологий с выщелачиванием, при которых выщелоченные руды остаются в выработке и заменяют собой искусственные массивы.

Поэтому оценка геомеханических особенностей пород и массивов и их поведение при техногенном воздействии становится важным аспектом горного производства.

Теоретические основы управления состоянием массива: варианты поведения массивов при разработке и управление геомеханикой массива, в первую очередь погашением пустот, формулируются на геомеханической основе. Технологии управления состоянием пустот и методы их оптимизации совершенствуются из условий обеспечения большей безопасности при меньших затратах [4].

В качестве основного условия обеспечения безопасности выступает обоснование систем разработки и порядка ведения горных работ, способов управления горным давлением и параметров технологических процессов, при которых деформации в массиве и на земной поверхности не будут критическими.

Когда-то обрушение земной поверхности при добыче минерального сырья считалось неизбежным. Развитие природоохранных тенденций во второй половине XX в. породило необходимость использования технологий с закладкой пустот сухой, гидравлической, глиняной и, наконец, твердеющей смесью.

Вместе с тем большая часть пологих месторождений малой и средней мощности по экономическим соображениям не может быть отработана дорогостоящими технологиями и требует совершенствования технологий с погашением изоляцией пустот без опасности для земной поверхности.

Ужесточение экологических стандартов к существующим технологиям превращает требование к сохранности поверхности земли в приоритетное, особенно когда массив расположен под участком с интенсивным земледелием, охраняемыми объектами, рекреационными зонами и т. п.

Основной целью сохранения устойчивого состояния массива горных пород в таких условиях является выбор технологий разработки месторождений, которые обеспечили бы сохранность рудовмещающего массива и земной поверхности от разрушения в случае непредвиденного распространения зоны влияния.

Большинство металлических месторождений залегают в неоднородных скальных массивах сложной структуры, где проблема сохранения окружающей среды от негативного влияния горных разработок решается путем назначения безопасных параметров очистных выработок с сохранением земной поверхности в районе разработок [5].

Вопросам повышения качества полноты извлечения сырья из месторождений посвящены труды М.И. Агошкова, Д.М. Бронникова, В.Р. Именитова, А.А. Борисова и др.

Управлению состоянием массивов с обеспечением сохранности земной поверхности над ними заполнением пустот твердеющими смесями посвящены труды Д.М. Бронникова, Ф.Ф. Рычик, М.И. Цыгалова, Л.А. Крупника, А.П. Требукова.

Условия устойчивости выработок могут быть найдены исходя из гипотез горного давления, учитывающих остаточную несущую способность пород: В. Риттера, П.М. Цимбаревича, М.М. Протодьяконова, В.Д. Слесарева, А.А. Борисова, С.В. Ветрова и др.

Условия устойчивости выработок, как результирующего показателя прочности массива, могут быть найдены исходя из гипотез, представляющих массив, состоящим из породных блоков, путем создания устойчивых систем.

К управлению состоянием массива привлекаются свойства разрушенных и магазинированных в пределах очистных выработок руд, из которых металл извлекается растворением. В урановой отрасли объем добычи выщелачиванием увеличен до 30–40 % по объему с извлечением около 70 %. Пока активно выщелачиваются, кроме урана, медь, золото, цинк. Но динамика развития горного производства позволяет прогнозировать вовлечение в переработку и других металлов.

#### Методы исследований

Методы исследования затронутой проблемы основаны на изучении прочностных свойств породных конструкций с помощью законов динамического и кинематического подобия протекающих процессов в горном массиве и на бетонных моделях [6].

На моделях и в натуральных условиях измеряли деформации, которые затем по формулам теории упругости переводили в напряжения. Центробежное моделирование с использованием эквивалентных материалов использовали при изучении устойчивости кровли камер и опорных целиков. Структурные и физико-механические свойства горных пород массивов изучают с помощью мощных СВЧ [7].

Напряженное состояние массивов исследовали методами оптико-поляризационного моделирования и на эквивалентных материалах. Для оценки напряженного состояния массива пород моделируют на плоских и объемных моделях. На фотомеханических моделях исследовали как общее поле распределения вблизи торца скважины с керном, так и области наибольших концентраций напряжений, трещинообразования и разрушения керна.

Лабораторные исследования включали оценку напряженного состояния массива по поведению породных кернов на прессе.

Устойчивость кровли очистных выработок определяется величиной их эквивалентных пролетов. Для того чтобы создать заклинивание блоков с сохранением плоской формы кровли без образования свода, необходимо соблюдать условие:

$$L_{\text{факт}} \leq L_{\alpha}^{\circ},$$

где  $L_{\text{факт}}$  – фактической эквивалентный пролет кровли выработки, м;  $L_{\alpha}^{\circ}$  – предельно допустимый эквивалентный пролет плоской кровли при заданном угле наклона горной выработки, м.

Плоская кровля устойчивая до того времени, пока прочность заклинивания кусков породы несущего слоя достаточно высока и способна поддерживать давящиеся на нее горные породы в своде естественного обрушения.

При выборе безопасных параметров погашения выработанного пространства исходят из того, что заклинившийся слой не потеряет прочность, а кровля при этом превратится из плоской в сводчатую. Важным критерием безопасного погашения выработанного пространства является область его опасного влияния – часть массива пород, где над выработками возможно развитие опасных напряжений и деформаций [8].

Полученные результаты являются основанием для принятия решений по управлению состоянием массива.

### Результаты

Несущая способность рудовмещающих массивов корректируется технологией разработки на стадиях подготовки и выемки очистных блоков и погашения пустот и назначением размеров очистных выработок при различных вариантах развития добычных работ во времени и в пространстве не только в процессе выемки, но и при погашении, когда последствия технологии скорректировать практически невозможно [9].

В практике распространена схема управления массивом с разделением его на участки, прочность в которых определяется напряжениями только в нижнем слое структурных блоков.

Погашение пустот изоляцией применяется сравнительно редко, причем известные случаи относятся к разработке небольших рудных тел, залегающих в породах крепких и средней крепости. Таким способом погашали пустоты на Миргалимсайском, Джезказганском, Гюмушлутском, Сум-

сарском и Хайдарканском месторождениях СНГ, а также в США, Канаде, ЮАР и т. д.

При разработке месторождений с относительно малыми запасами пока еще предпочтительнее схемы с выемкой руд без заполнения пустот, но с составлением в качестве средства управления напряжениями рудных целиков. Частным случаем технологии является создание в погашаемых пустотах искусственных сооружений для разделения отработанного рудного поля на безопасные пролеты.

Выбор технологии для отработки пологопадающих месторождений малой и средней мощности осложняется противодействием факторов управления. Так, погашение пустот с закладкой твердеющими смесями удорожает стоимость товарной продукции вплоть до дискредитации технологии, а использование малозатратных технологий ухудшает качественные показатели из-за разрушения массива вплоть до разрушения земной поверхности.

Для выбора рациональных способов погашения выработанного пространства способом изоляции при разработке месторождений рассматриваемого типа может быть интересен опыт Ишимского месторождения (Северный Казахстан) (рис. 1).

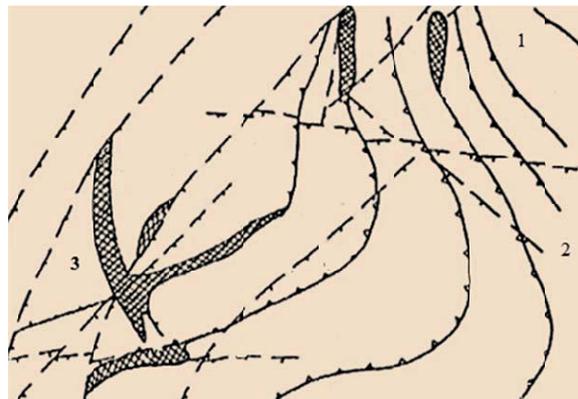


Рис. 1. Месторождение Ишимское, план и разрез: 1 – тектонические нарушения; 2 – послойные залежи; 3 – рудные тела

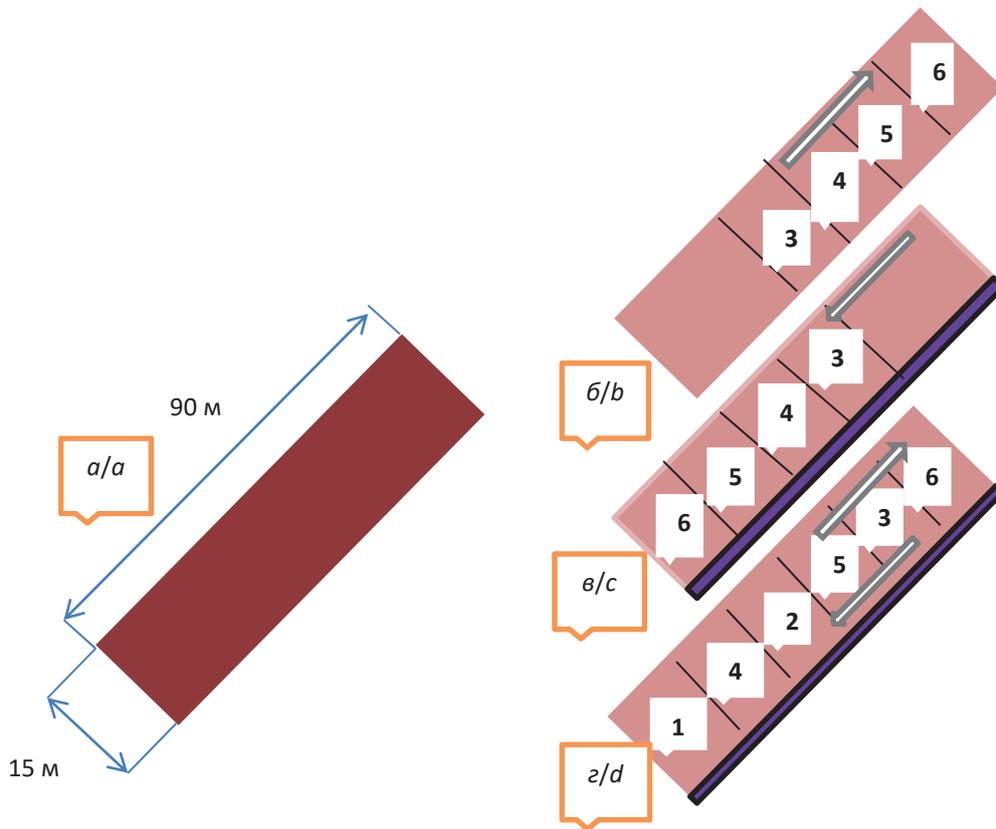
Fig. 1. The Ishim deposit, plan and section: 1 is the tectonic faults; 2 are the stratified deposits; 3 is the ore body

Урановое месторождение сложено рудными телами в виде плоских лент неправильной формы шириной от 2 до 15, редко 25 м, мощностью от сантиметров до 10 м, в среднем 2 м, расположенных в трещиноватых породах блочной структуры.

Угол падения залежей от горизонтального до 15–25°, глубина залегания от 60 до 600 м. Коэффициент крепости руд, по М.М. Протодяконову, в пределах 8–14 и вмещающих пород – 8–10.

На объемных моделях из эквивалентных материалов исследовали влияние порядка выемки руд на состояние массива: сплошной, в отступающем порядке и двухстадийный (рис. 2).

Масштаб моделирования 1:200. Породы и руды в модели представлены песчано-цементной смесью с соотношением 15:1 при водоцементном отноше-



**Рис. 2.** Схемы отработки в объемных моделях из эквивалентных материалов: а) размеры модели; б) сплошная выемка; в) сплошная выемка в отступающем порядке; г) двухстадийная выемка

**Fig. 2.** Scheme of testing in volumetric models of equivalent materials: а) dimensions; б) long walling; в) long walling on retreat; д) two-stage mining

нии 1,7. Расход компонентов: песок – 170 кг, цемент М400 – 12 кг, вода – 20 л на одну порцию, имитирующую 1 м<sup>3</sup>.

В основании стенда установлены деформометры, регистрирующие величину и порядок перераспределения горного давления в процессе выемки руд. Темпы сдвижения оценивали по смещению реперов, устанавливаемых в процессе изготовления модели над камерами с помощью индикаторов.

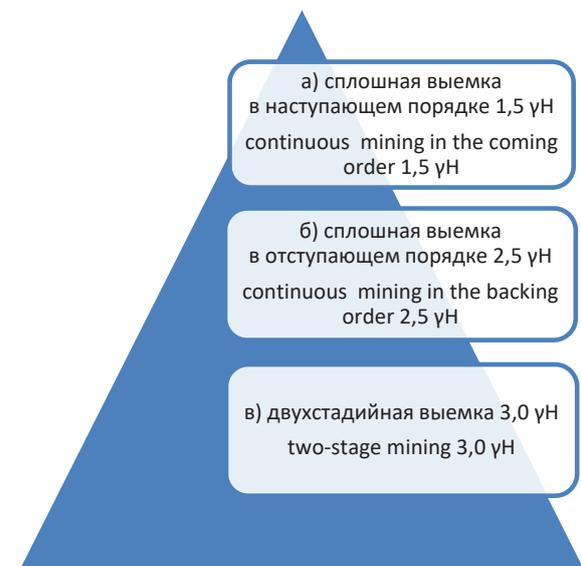
Исходные данные для моделирования:

- глубина работ 390 м;
- объемный вес пород 2,8 т/м<sup>3</sup>;
- прочность пород на сжатие 960 кг/см<sup>2</sup>;
- угол падения залежи 20°;
- высота выработки 3 м.

Порядок отработки оценивали по напряженности пород в забое (рис. 3).

Ненарушенность массива выработками в модели «а» способствует более равномерному распределению опорного давления. В модели «б» работы производятся в условиях повышенного давления, инициированного проходкой нарезных выработок. Концентрация напряжений, по сравнению с моделью «а», увеличивается на 20–30%. Наименее благоприятна ситуация в модели «в», где концентрация напряжений увеличивается под влиянием системы

целиков до максимальных размеров. Уменьшение размеров целиков в последней стадии работ до 2 м способствует развитию опасных напряжений.



**Рис. 3.** Концентрация напряжений в массиве при вариантах выемки

**Fig. 3.** Stress concentration in the array at excavation

Особенности проявления геомеханических явлений в таких массивах обусловлены интенсивностью разрывных структур, характеризующихся акустической жесткостью от 0,11 до 0,18 МПа/с, коэффициентом удароопасности 0,98 и изменением коэффициента ослабления пород с 0,25–0,35 до 0,04–0,15. В этих условиях сохранность земной поверхности зависит от соотношения напряжений в элементах геомеханической системы, которые регулируются технологически величиной пролетов обнажений. При равенстве напряжений в приконтурной зоне и прочности несущего слоя пород выработанное пространство может погашаться с меньшими затратами.

Оценку устойчивости горного массива осуществляли обследованием выработок, при этом проводили регистрацию состояния массива вмещающих пород с последующим картированием местности. При принятии проектных и эксплуатационных решений месторождение дифференцируют по устойчивости руд и пород.

Практика свидетельствует, что массивы скальных месторождений способны сохранить устойчивость в пределах консолидированных по величине напряжений породных конструкций [10].

Оперативный контроль развития напряжений в массиве осуществляется геофизическими методами. На разных стадиях развития горных работ измеряют частоту звукометрических импульсов. Так, с увеличением длины нарезного штрека с 3 до 10 м импульсы увеличиваются до 2–5 в минуту и уменьшаются до 1–3 в минуту после крепления штрека.

Предельный по устойчивости пролет выработки определен путем увеличения ее ширины прирезками в бок вплоть до обрушения кровли (рис. 4).

Устойчивость земной поверхности над погашаемым участком месторождения после его отработки характеризуется предотвращением возможности возникновения провалов или зон плавных сдвижений:

$$H > H_p = 55 \ell_{\text{экр}} f^{-1,3} = K \ell_{\text{экр}},$$

$$\ell_{\text{экр}} = \frac{L \cdot \ell'}{\sqrt{L^2 + (\ell')^2}},$$

где  $H$  – глубина верхней границы выработанного пространства, м;  $H_p$  – расчетная глубина, где деформация поверхности не опасна, м;  $\ell_{\text{экр}}$  – эквивалентный пролет, м;  $f$  – коэффициент крепости пород по М.М. Протодяконову;  $L$  – размер выработанного пространства по простиранию;  $\ell'$  – горизонтальная проекция выработанного пространства вкрест простирания;  $K$  – коэффициент запаса надежности.

Условие, при котором земная поверхность претерпевает сдвижения и деформации без воронок и провалов:

$$\frac{H \cdot S}{V} > 6,$$

где  $S$  – площадь выработанного пространства, м<sup>2</sup>;  $V$  – объем выработанного пространства, м<sup>3</sup>.

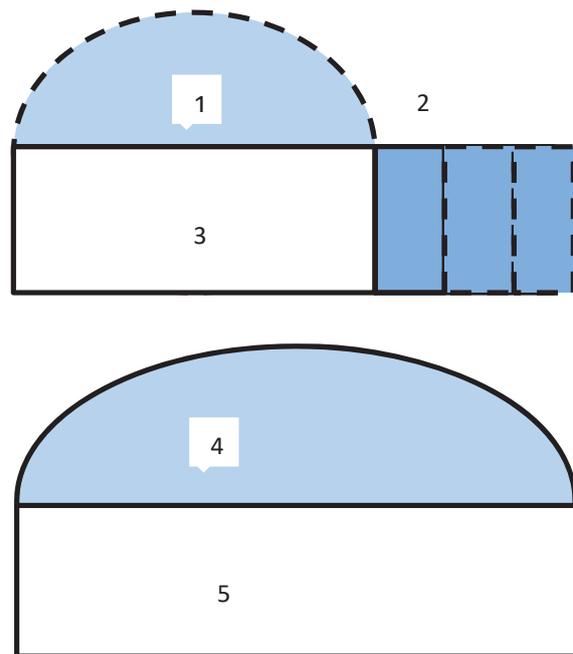


Рис. 4. Определение величины предельного пролета выработки: 1 – исходный свод естественного равновесия; 2 – отбиваемые породные прирезки; 3 – исходный пролет выработки; 4 – свод обрушения пород при достижении предельного пролета выработки; 5 – свод предельного пролета выработки

Fig. 4. Determination of the working limit span value: 1 is the initial set of ecological balance; 2 are the broken-up rock cutbacks; 3 is the original span of the production; 4 is the arch of rock collapse, when the maximum span development; 5 is the arch of the mining limited span

Для скальных месторождений характерно развитие деформаций в форме обрушения пород с высотой свода:

$$h = \frac{1,5m}{K_p - 1},$$

где  $m$  – мощность рудного тела, м;  $K_p$  – коэффициент разрыхления пород с учетом их прочности на одноосное сжатие ( $\sigma=100$  МПа,  $K_p=1,26$ ).

Рассматриваемое месторождение с объемом пустот 2 млн м<sup>3</sup> было погашено без заполнения пустот закладочным материалом. Расчетами параметров устойчивости установлено, что породы над пустотами в подавляющем большинстве находятся в исключительном разрушенном состоянии, отношение  $\frac{H' \cdot S_{\text{пл}}}{V}$  больше 6, т. е. деформирование земной поверхности происходит без образования воронок и провалов.

Эффективность погашения пустот изоляцией определяется сравнением приведенных затрат при этой технологии и при альтернативных технологиях.

Экономический эффект технологии погашения пустот изоляцией:

$$\Delta_n = (S_n C_n + L_o C_{o2} + Q_a C_a) / Q_n,$$

где  $S_n$  – площадь изымаемых из пользования земель, м<sup>2</sup>;  $C_n$  – стоимость изымаемых из пользова-

ния земель,  $p/m^2$ ;  $L_0$  – периметр ограждения изымаемой площади, м;  $C_{o2}$  – стоимость ограждения изымаемой площади,  $p/m$ ;  $Q_3$  – объем заполнения пустот,  $m^3$ ;  $C_3$  – стоимость заполнения пустот,  $p/m^3$ ;  $Q_n$  – объем погашаемых выработанных пространств изоляцией перемычками,  $m^3$ .

В условиях Ишимского месторождения площадь изымаемых из пользования земель  $5200 m^2$ ; стоимость изымаемых из пользования земель  $1,1 p/m^2$ ; периметр ограждения изымаемой площади  $896 m$ ; стоимость изымаемой площади  $0,75 p/m$ ; объем пустот, погашаемых с разделяющей закладкой,  $19900 m^3$ ; стоимость заполнения пустот  $10 p/m^3$ ; объем погашения пустот изоляцией  $1290000 m^3$ . Стоимость погашения  $1 m^3$  пустот изоляцией (в ценах 1990 г.):

$$\vartheta_n = (S_n C_n + L_0 C_{o2} + Q_3 C_3) / Q_n = \\ = (5200 \cdot 1,1 + 896 \cdot 0,75 + 19900 \cdot 10) / 1290000 = 0,18 p/m^3.$$

Затраты при погашении обрушением пород даже без полного учета его влияния на окружающую среду составили  $0,92 p/m^3$ . При погашении с закладкой пустот твердеющей смесью ее стоимость экспертно оценивается в пределах  $6–15 p/m^3$ .

Можно прогнозировать, что развитие ресурсосберегающих тенденций в мировом горном производстве способствует более полному учету геомеханических факторов при оценке эколого-экономической эффективности добычи минерального сырья [11].

Перспективы развития методов управления массивом на основе рационального использования механизма взаимодействия слагающих массивы пород используются при анализе устойчивости предприятий горнодобывающей промышленности [12].

Прогноз поведения рудовмещающих массивов при понижении горных работ на глубину основывается на теоретических концепциях механики горных пород [13] и горной практики [14].

Показатели эффективности подземной разработки месторождений во многом зависят от целенаправленного использования свойств рудовмещающих массивов, поэтому выбор неразрушающих сохранность земной поверхности параметров является одним из основных вопросов эксплуатации недр [15]. В последние годы это направление усиливается требованием охраны земной поверхности от разрушения в течение неопределенно дли-

тельного времени после погашения выработок [16–18].

Результаты исследования проблемы охраны земной поверхности от разрушения в природных и лабораторных условиях, выполненные в России и за рубежом, согласуются и утверждаются с учетом устойчивости земной поверхности, расположенной над погашаемым участком после отработки месторождения [19–21]. Подтверждается также необходимость учета геомеханических факторов при оценке эколого-экономической эффективности добычи руд на основе использования свойств рудовмещающих массивов [22, 23].

Результаты настоящего исследования корреспондируют с концепцией взаимосвязи численности населения Земли, объемами добычи полезных ископаемых и совершенствованием технологий их добычи [24].

Рассматриваемая проблема эффективности технологий добычи руд со сложными условиями локализации соседствует с глобальными проблемами природо- и ресурсосбережения [25].

#### Выводы

1. По мере увеличения населения Земли объемы добычи полезных ископаемых увеличиваются, технологии добычи совершенствуются, а проблема обеспечения промышленности минеральным сырьем обостряется.
2. Главным критерием эффективности технологий добычи минерального сырья становится соответствие их принципам природо- и ресурсосбережения.
3. Со временем горно-геологические и экономико-географические условия разработки месторождений усложнятся, а международное соперничество за обладание минеральными ресурсами усилится.
4. В этих условиях возрастает актуальность экономических технологий с управлением массивом способом изоляции на основе рационального использования механизма взаимодействия слагающих массивы пород.
5. Экономическая эффективность разработки подземным способом маломощных месторождений зависит от возможности сохранения плоской формы кровли очистных выработок путем обеспечения геомеханической сбалансированности участков рудовмещающих породных массивов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Myga-Piątek U. Landscape management on post-exploitation land using the example of the Silesian region, Poland // *Environmental & Socio-economic Studies*. – 2014. – V. 2 (1). – P. 1–8.
2. Harris J.M., Roach B. *Environmental and Natural Resource Economics. A Contemporary Approach*. – New York, Armonk: M.E. Sharpe, Inc., 2013. – 189 p.
3. Zoback M.L., Zoback M.D., Adams J. Global patterns of tectonic stress nature // *Nature*. – 1989. – V. 341. – № 6240. – P. 291–298.
4. Голик В.И., Комащенко В.И. Отходы обогащения железистых кварцитов как сырье для доизвлечения металлов и использования в качестве закладочных смесей // *Горный журнал*. – 2017. – № 3. – С. 43–47.
5. Wang Li, Zhang Xiu-feng. Correlation of ground surface subsidence characteristics and mining disasters under super-thick overlying strata // *Journal of China Coal Society*. – 2009. – V. 34. – № 8. – P. 1048–1051.
6. Enhancement of lost ore production efficiency by usage of canopies / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, V. Zaalishvili // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015. – № 4. – P. 325–329.

7. Голик В.И. Оптимизация технологии разработки маломощных пологих рудных тел на геомеханической основе // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2016. – № 4. – С. 139–152.
8. Повышение полноты использования недр путем глубокой утилизации отходов обогащения угля / В.И. Голик, В.И. Комащенко, С.Г. Страданченко, С.А. Масленников // Горный журнал. – 2012. – № 9. – С. 91–95.
9. Плешко М.С., Насонов А.А. Внедрение эффективных геотехнологий на основе комплексного мониторинга всех стадий жизненного цикла горнодобывающего предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 11. – С. 69–76.
10. Freeman A.M., Herriges J.A., Kling C.L. The measurement of environmental and resource values. Theory and methods. – New York, USA: RFF Press, 2014. – 235 p.
11. Shabanimashcool M., Li C. Analytical approaches for studying the stability of laminated roof strata // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2015. – № 79. – P. 99–108.
12. Onica I. Introduction in the Numerical Methods Used in the Mining Excavations Stability Analysis (in Romanian). – Petrosani: Universitat Publishing House, 2001. – 156 p.
13. Study on rock mechanics in deep mining engineering / He Manchao, Xie He-ping, Peng Su-ping et al. // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. – 2005. – № 16. – P. 2804–2813.
14. Capilla A.V., Delgado A.V. The Destiny of the Earth's Mineral Resources. – London: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015. – 256 p.
15. Оценка геодинамического состояния массива горных пород при отработке участков в охранных целиках / А.А. Еременко, В.А. Еременко, Л.Н. Гахова, А.П. Ерусланов, А.С. Смелик, С.А. Прохвятилов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 7. – С. 123–128.
16. Батугина И.М., Юй Лицзян, Батугин А.С. Воздействие горных работ на геозологическую ситуацию и комплексное управление им на примере шахты Хуафэн в Китае // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 7. – С. 123–129.
17. Woodward K., Wesseloo J. Observed spatial and temporal behaviour of seismic rock mass response to blasting // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2015. – V. 115. – № 11. – P. 1044–1056.
18. Ястребинский М.А. Экономическое обоснование рыночного критерия приведенных затрат и результатов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 6. – С. 178–184.
19. Комащенко В.И. Разработка взрывной технологии, снижающей вредное воздействие на окружающую среду // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2016. – № 1. – С. 34–43.
20. Протосеня А.Г., Куранов А.Д. Методика прогнозирования напряженно-деформированного состояния горного массива при комбинированной разработке Кошвинского месторождения // Горный журнал. – 2015. – № 1. – С. 67–71.
21. Пучков Л.А. Прогноз минерально-энергетического потребления при бескризисном развитии экономики // Горный журнал. – 2014. – № 7. – С. 45–48.
22. Экологические проблемы разработки рудных месторождений КМА / В.И. Голик, О.Н. Полухин, А.Н. Петин, В.И. Комащенко // Горный журнал. – 2013. – № 4. – С. 91–98.
23. Язиков В.Г. Перспективы развития урановой промышленности Республики Казахстан // Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов. – М.: Руда и Металлы, 2005. – Т. 1: Уран. – С. 67–76.
24. Стратегия снижения риска опасного загрязнения окружающей среды на открытых разработках / Б.Р. Ракишев, Д.М. Сиваракша, С.К. Молдабаев, Н.А. Шулаева // Горный журнал Казахстана. – 2010. – № 6. – С. 36–39.
25. Каплунов Д.Р. Теоретические основы проектирования освоения недр: становление и развитие // Горный журнал. – 2014. – № 7. – С. 49–51.

Поступила 31.08.2017 г.

#### Информация об авторах

**Голик В.И.**, доктор технических наук, профессор кафедры горного дела Северо-Кавказского государственного технологического университета.

**Разоренов Ю.И.**, доктор технических наук, профессор, ректор Северо-Кавказского государственного технологического университета.

UDC 504.55.054:622(470.6)

## GOAF FILLING WITH ISOLATION PRESERVING EARTH SURFACE

Vladimir I. Golik<sup>1</sup>,  
v.i.golik@mail.ru

Yuri I. Razorenov<sup>1</sup>,  
yiri1963@mail.ru

<sup>1</sup> North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy,  
44, Nikolaev street, Vladikavkaz, 362021, Russia.

**The relevance** of the work is caused by the need to combine the principles of economic efficiency of array state control while filling the cavities formed when mining and safety of the environment in the area of mineral resource extraction with the increase in volumes of extraction of mineral raw materials for the needs of the growing population.

**The aim** of the research is to develop the parameters of ore extraction technique without filling the cavities with the material. These materials would preserve the earth surface from destruction in the case of rock caving zone yield to the level of pumps for indefinitely long period of time after filling the workings.

**Research methods:** critical analysis of the experience in development of deposits similar in ore localization conditions, physical and mathematical modelling of the production technologies and forecasting the ways of development of technology, experimental determination of the value of a span limited in stability condition.

**Results.** It is shown that the earth surface stability over the filled deposit area after its performance is provided with preventing the possibility of deformation phenomena occurrence. It is proved that the field with the void volume of 2 million m<sup>3</sup> can be repaid without filling voids with backfill material. The authors have substantiated the necessity of a more complete accounting of geomechanical factors in assessment of environmental and economic efficiency of extraction of mineral raw materials. The paper introduces the model of estimation of underground mining efficiency depending on the use of properties of ore-bearing massifs.

**Conclusions.** Purposeful use of the properties of ore-bearing massifs largely determines the performance indicators of underground mining. One of the main operational issues is the choice of development options to ensure the safety of the earth surface.

**Key words:**

Solid, rock, ore, mining technology, filling, working, modeling, parameters, earth surface.

## REFERENCES

1. Myga-Piątek U. Landscape management on post-exploitation land using the example of the Silesian region, Poland. *Environmental & Socio-economic Studies*, 2014, vol. 2 (1), pp. 1–8.
2. Harris J.M., Roach B. *Environmental and Natural Resource Economics. A Contemporary Approach*. New York, Armonk, M.E. Sharpe, Inc., 2013. 189 p.
3. Zoback M.L., Zoback M.D., Adams J. Global patterns of tectonic stress nature. *Nature*, 1989, vol. 341, no. 6240, pp. 291–298.
4. Golik V.I., Komashchenko V.I. Waste enrichment of ferruginous quartzite as raw material for recovering metals and use as a filling mixtures. *Mining journal*, 2017, no. 3, pp. 43–47. In Rus.
5. Wang Li, Zhang Xiu-feng. Correlation of ground surface subsidence characteristics and mining disasters under superthick overlying strata. *Journal of China Coal Society*, 2009, vol. 3, no. 8, pp. 1048–1051.
6. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Zaalishvili V. Enhancement of lost ore production efficiency by usage of canopies. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no. 4, pp. 325–329.
7. Golik V.I. Optimization of technology of development of low-power flat ore bodies on a geomechanical basis. *News of the Tula state university. Sciences about Earth*, 2016, no. 4, pp. 139–152. In Rus.
8. Golik V.I., Komashchenko V.I., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Increasing the efficiency of the subsoil by deep disposal of waste coal. *Mining journal*, 2012, no. 9, pp. 91–95. In Rus.
9. Pleshko M.S., Nasonov A.A. Introduction of effective geotechnologies on the basis of complex monitoring of all stages of life cycle of the mining enterprise. *The Mountain information and analytical bulletin*, 2013, no. 11, pp. 69–76. In Rus.
10. Freeman A.M., Herriges J.A., Kling C.L. *The measurement of environmental and resource values. Theory and methods*. New York, USA, RFF Press, 2014. 235 p.
11. Shabanimashcool M., Li C. Analytical approaches for studying the stability of laminated roof strata. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, no. 79, pp. 99–108.
12. Onica I. *Introduction in the Numerical Methods Used in the Mining Excavations Stability Analysis* (in Romanian). Petroșani, Universitas Publishing House, 2001. 156 p.
13. He Man-chao, Xie He-ping, Peng Su-ping. Study on rock mechanics in deep mining engineering. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, no. 16, pp. 2804–2813.
14. Capilla A.V., Delgado A.V. *The Destiny of the Earth's Mineral Resources*. London, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015. 256 p.
15. Eremenko A.A., Eremenko V.A., Gakhova L.N., Eruslanov A.P., Smelik A.S., Prokhvatilov S.A. Evaluation of the geodynamic state of rock massif when mining sites in the security pillars. *The Mountain information and analytical bulletin*, 2013, no. 7, pp. 123–128. In Rus.
16. Batugina I.M., Yu Lijiang, Batugin A.S. The impact of mining operations on the geocological situation and integrated management on the example of mine Huafeng in China. *Mining information-analytical Bulletin*, 2013, no. 7, pp. 123–129. In Rus.
17. Woodward K., Wesseloo J. Observed spatial and temporal behaviour of seismic rock mass response to blasting. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2015, vol. 115, no. 11, pp. 1044–1056.
18. Yastrebinskij M.A. The economic rationale of market criteria given inputs and outputs. *GLAB*, 2014, no. 6, pp. 178–184. In Rus.
19. Komashchenko V.I. Development of explosive technology that reduces harmful influence on the environment Wednesday. *Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*, 2016, no. 1, pp. 34–43. In Rus.
20. Protosenya A.G., Kuranov A.D. Methods of predicting the stress-strain state of rock mass in the combined development of the Koshvinsky field. *Mining journal*, 2015, no. 1, pp. 67–71. In Rus.

21. Puchkov L.A. The forecast of mineral and power consumption at acritical development of economy. *Mining journal*, 2014, no. 7, pp. 45–48. In Rus.
22. Golik V.I., Polukhin O.N., Petin A.N., Komashchenko V.I. Environmental problems of development of ore fields of KMA. *Mining journal*, 2013, no. 4, pp. 91–98. In Rus.
23. Yazikov V.G. Perspektivy razvitiya uranovoy promyshlennosti Respubliki Kazakhstan [Prospects of development of the uranium industry of the Republic of Kazakhstan]. *Podzemnoe i kuchnoe vyshchelachivanie urana, zolota i drugikh metallov* [Underground and compact leaching of uranium, gold and other metals]. Moscow, Ruda i matally Publ., 2005. Vol. 1, pp. 67–76.
24. Rakishev B.R., Sivaraksha D.M., Moldabayev S.K., Shulayeva N.A. Strategy of decrease in risk of dangerous environmental pollution on open-cast mining. *The Mountain magazine of Kazakhstan*, 2010, no. 6, pp. 36–39. In Rus.
25. Kaplunov D.R. Theoretical bases of design of development of a subsoil: formation and development. *Mining journal*, 2014, no. 7, pp. 49–51. In Rus.

*Received: 31 August 2017.*

#### **Information about the authors**

**Vladimir I. Golik**, Dr. Sc., professor, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy.

**Yuri I. Razorenov**, Dr. Sc., professor, rector, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy.

УДК 577.4:546.212:504.4.054

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ВОДЫ ОБЪЕКТОВ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ТЕРРИТОРИИ БЫВШЕГО СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Есильканов Гани Мухтарович<sup>1</sup>,  
gme1@tpu.ru

Лукашенко Сергей Николаевич<sup>2</sup>,  
lukashenko@nnc.kz

Рихванов Леонид Петрович<sup>1</sup>,  
rikhvanov@tpu.ru

Койгельдинова Мадина Талгатовна<sup>2</sup>,  
koigeldinova@nnc.kz

Мухамедияров Нурлан Жумагазыевич<sup>2</sup>,  
mukhamediyarov@nnc.kz

Шакенов Ербол Зеилгазинович<sup>2</sup>,  
shakenov@nnc.kz

Темиржанова Арай Еркековна<sup>2</sup>,  
temirzhanova@nnc.kz

Яковенко Юлия Юрьевна<sup>2</sup>,  
yakovenko@nnc.kz

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>2</sup> Институт радиационной безопасности и экологии,  
Казахстан, 071100, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 2.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью получения современных данных о концентрации химических элементов в воде объектов водопользования бывшего Семипалатинского испытательного полигона. Данная информация требуется для выявления потенциально опасных элементов, которые могут влиять на здоровье населения, проживающего на данной территории.

**Цель работы:** изучение особенностей элементного состава вод объектов водопользования, используемых населением, проживающим на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона.

**Методы исследования.** Элементный состав воды определялся методами масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (Elan 9000 «Perkin Elmer SCIEX»), атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой («iCAP 6300 Duo» Thermo Scientific). Анализ таких показателей, как общая минерализация, содержание сульфатов, гидрокарбонатов, хлоридов, кальция, магния и натрия, проводился титриметрическими, колориметрическими, потенциометрическими методами в соответствии с ГОСТ.

**Результаты.** Вода объектов водопользования бывшего Семипалатинского испытательного полигона разнообразна по химическому составу. Из всех исследуемых проб воды 26 % гидрокарбонатно-натриево-магниевый состав, 58 % сульфатно-натриево-магниевый и сульфатно-натриево-кальциевый состав, 15 % хлоридно-натриево-магниевый состав. При изучении макрокомпонентного состава воды было выявлено, что гидрокарбонатные воды близки по составу к подземным водам зоны гипергенеза. Исследуемые сульфатные и хлоридные воды сходны по составу с водами зоны континентального засоления. Для выявления особенностей элементного состава подземных вод бывшего Семипалатинского испытательного полигона построены убывающие ряды превышений средних концентраций элементов в воде по отношению к составу вод зон гипергенеза и континентального засоления:  $U_{15} > Mo_{13} > Sr_{10}$  (зона гипергенеза),  $Mo_3 > U_5 > Sr_3$  (зона континентального засоления). Из этого следует, что для подземных вод бывшего Семипалатинского испытательного полигона выявлены специфические элементы, такие как U, Mo, Sr. В воде 51 % всех исследуемых объектов водопользования бывшего Семипалатинского испытательного полигона обнаружены повышенные содержания U от 1 до 8 ПДК (ПДК<sub>U</sub> = 15 мкг/л). Обнаруженные повышенные содержания Sr в подземных водах могут быть объяснены наличием на территории Казахстана стронциевой гидрогеохимической провинции. Таким образом, выявленные повышенные содержания молибдена, урана и стронция в водах объектов водопользования бывшего Семипалатинского испытательного полигона связаны с природно-климатическими особенностями региона.

### Ключевые слова:

Семипалатинский испытательный полигон, вода, подземные воды, объекты водопользования, тяжелые металлы, химический состав.

## Введение

В настоящее время территория бывшего Семипалатинского испытательного полигона (СИП) представляет собой место постоянного или периодического проживания населения, основной деятельностью которого является скотоводство. По этой причине важна информация о безопасности проживания населения на данной территории. Ранее проведенные исследования посвящены изучению преимущественно радиоактивного загрязнения СИП. Однако требуется информация о нерадикационных факторах воздействия на здоровье людей (концентрация тяжелых металлов и токсичных элементов) во избежание формирования некорректных выводов о влиянии СИП на население, проживающее в его пределах.

## Изучение состава воды, используемой в хозяйственно бытовых целях

Оценка качества вод объектов водопользования СИП по радиационным параметрам в течение долгого времени проводилась Институтом радиационной безопасности и экологии [1–3]. В исследованных подземных водах не были обнаружены превышения активности техногенных радионуклидов ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^3\text{H}$ ).

Проведенные в 2008 г. АО «Волковгеология» исследования природных вод территории СИП выявили, что средняя активность по  $^{238}\text{U}$  в природных водах составила 0,5 Бк/л, что не превышает значений уровня вмешательства [4].

Целью данного исследования было изучение особенностей элементного состава вод объектов водопользования, используемых населением, проживающим на территории бывшего СИП.

## Объекты и методы исследования

Пробоотбор воды в объектах водопользования на территории СИП проводился в летний период 2015 г. (июнь–август). Объектами опробования являлись колодцы, скважины и родники, возле действующих зимовок и летников. Общее количество проб составило около 100. Картограмма отбора проб представлена на рис. 1.

Объекты водопользования расположены на территории СИП крайне неоднородно. Исследуемые объекты условно поделены на следующие территориальные субъединицы (зоны): 1) Северная и Северо-Западная части; 2) Южная и Юго-Западная части; 3) Юго-Восточная часть. Следует отметить, что в центральной части СИП эксплуатируемые объекты водопользования не встречались.

Отбор и консервирование проб воды осуществлялось согласно общепринятым методикам [5]. При отборе проб воды из скважин проводилась предварительная откачка погружным насосом двух–трех объемов столба воды в скважине. При работе с колодцами, не оборудованными ручными и глубинными насосами, проводился отбор воды с помощью погружного пробоотборника.

При отборе проб воды проводились следующие операции: фильтрация воды с целью удаления механических примесей через бумажный фильтр «синяя лента»; консервация пробы добавлением концентрированной азотной кислоты ( $\text{HNO}_3$ ) марки «о.с.ч» из расчёта 3 мл  $\text{HNO}_3$  на 1 л пробы воды. Фильтрация и консервация проводились на месте отбора проб. Измерение pH и Eh воды проводилось на месте пробоотбора с помощью pH-метра Марк 901.

Для проведения общехимического анализа воды проводился отбор проб воды объемом 1,5 л. Пробы не консервировались и отправлялись на анализ в лабораторию. Анализ таких показателей, как общая минерализация, содержание сульфатов, гидрокарбонатов, хлоридов, кальция, магния и натрия, проводился титриметрическими, колориметрическими, потенциометрическими методами [6].

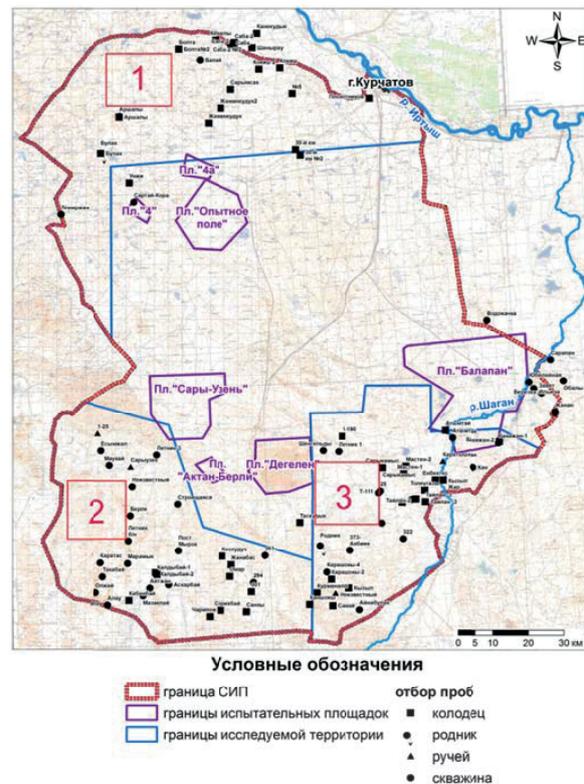


Рис. 1. Точки отбора проб воды из объектов водопользования СИП: 1 – Северная Северо-Западная часть; 2 – Южная Юго-Западная часть; 3 – Юго-Восточная часть

Fig. 1. Points of water sampling at the Semipalatinsk test site (STS) objects of water use: 1 is the Northern and Northwestern territory; 2 is the Southern and Southwestern territory; 3 is the Southeastern territory

В исследовании применялись методы масс-спектрометрии (Elan 9000 фирмы «Perkin Elmer SCIEX») и атомно-эмиссионной спектрометрии («iCAP 6300 Duo» фирмы Thermo Scientific) с индуктивно-связанной плазмой. Непосредственно перед анализом пробы воды разбавлялись 1:10 в 1 %  $\text{HNO}_3$ .

Для построения калибровочных графиков использовались мультиэлементные стандартные растворы, зарегистрированные в реестре ГСИ РК под № KZ.03.02.00901–2010, KZ.03.02.00902–2010. Для определения изотопного состава урана методом ИСП-МС применены растворы, приготовленные на основе ГСО 7115–94 состава ионов урана (300 мг/л).

Контроль качества измерений осуществлялся путём измерения калибровочного раствора через каждые 10 проб. При неудовлетворительном результате калировки (отклонение калибровочного графика на 8–10 %) проводилась перекалировка прибора, при которой учитывались новые параметры фона.

Анализ проведен согласно методике ISO 17294–2?2003 (E) «Качество воды. Применение масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (МС-ИСП). Часть 2: Определение 62 элементов» (номер гос. регистрации 022/10505 от 27.12.05 г.) [7].

Пробы воды были проанализированы на содержание таких элементов, как Li, Be, Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Sr, Nb, Mo, Cd, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Bi, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Th, U, Pb.

## Результаты исследования

Особенности общехимического состава воды объектов водопользования

Данные по макрокомпонентному составу представлены в табл. 1. Классификация воды объектов водопользования по химическому составу проводилась по О.А. Алекину [8].

Вода изученных объектов водопользования СИП разнообразна по химическому составу и уровню минерализации. Из всех исследуемых объектов водопользования 26 % являются пресными со средней минерализацией 0,4 г/л гидрокарбонатно-натриево-магниевого состава. Подземные воды сульфатно-натриево-магниевого и сульфатно-натриево-кальциевого состава более распространены на изученной территории (58 %) и относятся преимущественно к солоноватым водам (средняя минерализация – 1,7 г/л). Хлоридные воды менее распространены на территории СИП, из всех исследуемых подземных вод только 15 % являются солеными со средней минерализацией 3,7 г/л хлоридно-натриево-магниевого состава.

Величина pH изменяется в диапазоне 6,5–8,5; среднее значение для всех преобладающих типов

Таблица 1. Общехимический состав воды объектов водопользования СИП

Table 1. General chemical composition of water of the STS objects of water use

Элемент Element	Единица измерения Unit of measurement	Тип воды/Water type			Среднее для СИП Average for the STS $\bar{X} \pm S$ (min-max)	Среднее содержание в подземных водах Mean concentration in underground water	
		Гидрокарбонатные Hydrocarbonate, n=26 $\bar{X} \pm S$ (min-max)	Сульфатные Sulphate, n=58 $\bar{X} \pm S$ (min-max)	Хлоридные Chloride, n=15 $\bar{X} \pm S$ (min-max)		зона гипергенеза hypergenesis zone [4]	зона континентального засоления continental salification zone [4]
pH	–	$7,7$ (6,5–8,5)	$7,7$ (6,8–8,4)	$7,7$ (7–8,3)	$7,7$ (6,5–8,5)	6,9	7,5
Eh	мВ mV	$0,2$ (от –0,9 до +11)	$-0,2$ (от –0,5 до –0,3)	$-0,2$ (от –0,5 до +0,07)	$-0,1$ (от –0,9 до +11)	–	–
M	г/л g/l	$0,4 \pm 0,1$ (0,19–0,95)	$1,7 \pm 0,3$ (0,4–18)	$3,7 \pm 0,6$ (0,6–7,8)	$1,7 \pm 0,3$ (0,19–18)	0,5*	1,3*
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		$270 \pm 40$ (88–490)	$270 \pm 40$ (100–680)	$260 \pm 40$ (120–400)	$280 \pm 42$ (88–680)	187	349
Cl <sup>-</sup>		$31 \pm 5$ (3,4–100)	$230 \pm 35$ (20–2900)	$1300 \pm 195$ (50–3200)	$340 \pm 51$ (3,4–3200)	59,7	258
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		$110 \pm 17$ (0–290)	$800 \pm 120$ (180–8900)	$960 \pm 144$ (150–1800)	$650 \pm 98$ (0–8900)	70,7	304
Ca	мг/л mg/l	$60 \pm 11$ (27–140)	$110 \pm 17$ (40–400)	$180 \pm 27$ (40–320)	$110 \pm 17$ (27–390)	39,2	86,4
Mg		$70 \pm 11$ (6–1300)	$46 \pm 7$ (12–214)	$110 \pm 17$ (19–207)	$60 \pm 9$ (6–1300)	18,2	46,2
Na		$72 \pm 11$ (6–214)	$300 \pm 45$ (100–2500)	$490 \pm 74$ (97–811)	$266 \pm 40$ (6–2500)	67,6	260
K		$6,2 \pm 1$ (0,6–37)	$3,6 \pm 1$ (0,7–19)	$19 \pm 3$ (2,1–136)	$6,6 \pm 1$ (0,6–136)	5,15	18,4

M – общая минерализация, \* – сумма макрокомпонентов воды.

M – total dissolved solids, \* – total content of water macrocomponents.

вод составляет 7,7. Значения Eh воды слабо изменяется и колеблется в пределах от -0,9 до +11 мВ. Среднее значение Eh для подавляющего числа объектов водопользования составляет -0,2 мВ. Из табл. 1 видно, что средние показатели pH и Eh слабо изменяются в зависимости от химического типа воды. В среднем по установленным уровням pH и Eh воды изученных объектов водопользования можно отнести к слабощелочным с умеренными окислительно-восстановительными условиями.

Особенности пространственного распределения объектов водопользования по типу вод представлены на рис. 2.

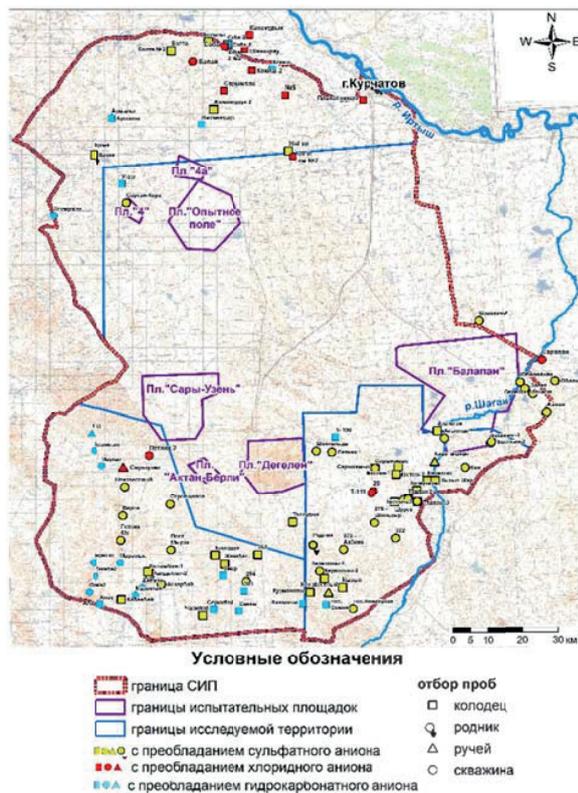


Рис. 2. Пространственное распределение объектов водопользования по химическому типу вод

Fig. 2. Spatial distribution of objects of water use by chemical type of water

При сравнительном анализе макрокомпонентного состава воды (табл. 1) со средним составом подземных вод зоны гипергенеза и континентального засоления было выявлено, что гидрокарбонатные воды имеют схожий состав с подземными водами зоны гипергенеза. Исследуемые сульфатные и хлоридные воды сходны по макрокомпонентному составу с водами зоны континентального засоления.

Из рис. 2 видно, что сульфатные воды, как преобладающие на СИП, распределены по всей его территории. Гидрокарбонатные и хлоридные воды имеются в каждом выделенном участке, но стоит отметить, что слабоминерализованные гидрокарбонатные воды (16 водоисточников) в большин-

стве своем встречаются в Юго-Западной части СИП. Преобладающая часть объектов водопользования с хлоридным типом вод расположена в Северо-Западной части СИП.

Элементный состав воды объектов водопользования

Данные по элементному составу воды объектов водопользования представлены в табл. 2.

Для выявления особенностей элементного состава подземных вод СИП построены убывающие ряды превышений средних концентраций элементов в воде:

- $U_{15} > Mo_{13} > Sr_{10}$  (по отношению к подземным водам зоны гипергенеза);
- $Mo_3 > U_5 > Sr_3$  (по отношению к подземным водам зоны континентального засоления).

Из убывающих рядов видно, что для подземных вод СИП выявлены специфичные элементы, такие как U, Mo, Sr. Вероятно, одной из причин относительно высоких концентраций данных элементов в воде является засушливый климат исследуемой территории. Согласно работам [9–13, 14, 15] в подземных водах регионов с аридным климатом, по сравнению с гумидным, зафиксированы в повышенных концентрациях такие элементы, как U, Mo, Sr, V, As, Ba, Cr, Cu, Li, Ni и Zn. Аналогичная картина выявлена и для подземных вод СИП, в частности для таких элементов, как U, Mo и Sr. Особенности распределения данных элементов в воде объектов водопользования рассмотрены ниже.

**Уран.** В изученных водах концентрация данного элемента варьирует в зависимости от химического типа вод. Так, в гидрокарбонатных водах среднее содержание урана составляет 8 мкг/л, в сульфатных и хлоридных – 23 мкг/л.

Максимальная концентрации урана обнаружена в сульфатных водах – 120 мкг/л, что в 27 раз превышает среднее содержание в подземных водах зоны континентального засоления. На рис. 3 показана карта пространственного распределения урана в воде объектов водопользования.

Как видно из гистограммы (рис. 3, б), в водах 51 % всех исследуемых объектов водопользования СИП выявлены повышенные содержания урана от 1 до 8 ПДК (ПДК<sub>в</sub>=15 мкг/л) [16]. В Юго-Восточной СИП расположено максимальное количество водопунктов (32 объекта) с концентрацией урана в воде выше ПДК (рис. 3, а).

**Молибден.** Содержание Mo также изменяется относительно химического типа вод. Средняя концентрация молибдена для гидрокарбонатных вод составляет 9,6 мкг/л, сульфатных – 28 мкг/л, хлоридных – 16 мкг/л. В сульфатных водах обнаружена максимальная концентрация молибдена – 240 мкг/л, что в 58 раз выше среднего содержания для вод континентального засоления. Особенности пространственного распределения молибдена в воде объектов водопользования представлены на рис. 4.

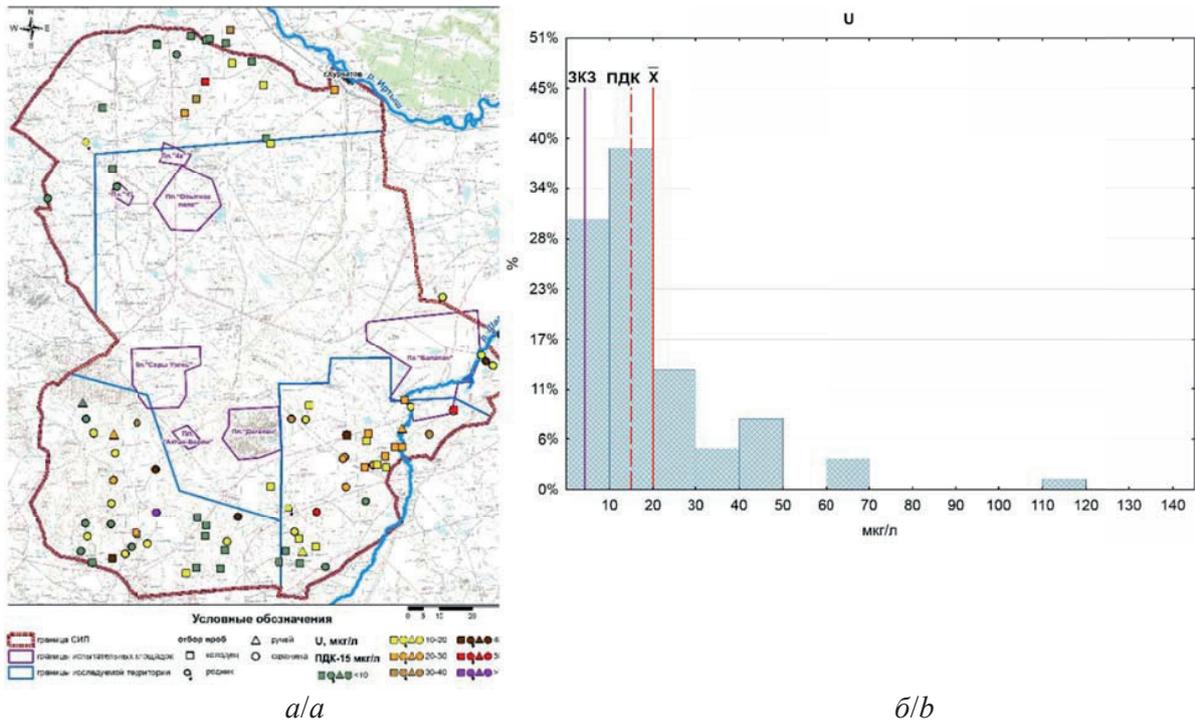
**Таблица 2.** Элементный состав воды объектов водопользования СИП, мкг/л

**Table 2.** Ultimate composition of water of the STS objects of water use, µg/l

Элемент Element	Тип воды/Type of water			Среднее содержание в подземных водах Mean concentration in underground water		
	Гидрокарбонатные Hydrocarbonate, n=26 $\bar{X} \pm S$ (min-max)	Сульфатные Sulphate, n=58 $\bar{X} \pm S$ (min-max)	Хлоридные Chloride, n=15 $\bar{X} \pm S$ (min-max)	Среднее для СИП Average for the STS $\bar{X} \pm S$ (min-max)	зона гипергенеза hypergenesis zone [9]	зона континентального засоления continental salification zone [9]
Li	17±3 (4-40)	25±4 (4-144)	30±5 (13-46)	24±4 (4-144)	13	39,7
Be	0,08±0,01	0,12±0,01 (0,10-0,14)	<0,01	0,10±0,01 (0,08-0,14)	0,33	0,19
Al	115±17 (5-200)	120±18 (20-280)	70±10 (16-130)	120±18 (5-280)	226	370
V	3±1 (0,4-9)	5±1 (0,3-24)	8±1 (0,4-23,5)	5±1 (0,3-24)	1,34	2,65
Cr	5±1 (1,9-17,3)	6±1 (1,9-14)	7±1 (2,7-16)	6±1 (1,9-17)	3,03	4,03
Mn	42±6 (6-360)	54±80 (2-560)	300±45 (11-2200)	86±13 (2-2200)	54,5	135
Fe	500±75 (12-6200)	250±38 (19-990)	1600±240 (26-21000)	520±78 (12-21000)	481	710
Co	0,30±0,05 (0,04-0,9)	0,40±0,06 (0,03-1,4)	1,9±0,3 (0,3-13)	0,6±0,1 (0,03-13)	0,39	0,62
Ni	8,8±1,3 (1,2-50)	8,7±1,3 (1-28)	13±2 (1-60)	10±2 (1-60)	3,58	5,47
Cu	3,0±0,5 (0,8-17)	6±1 (1,7-47)	7±1 (4,4-9)	6±1 (0,8-47)	5,58	11,9
Zn	44±7 (4-280)	98±15 (5-1900)	38±6 (15-126)	75±11 (4-1900)	41,4	85,6
As	3,0±0,5 (0,3-20)	1,4±0,2 (0,3-7)	4,2±0,6 (0,5-10)	2,2±0,3 (0,3-20)	1,46	1,93
Sr	730±110 (90-1600)	1800±270 (130-8000)	3400±510 (900-6900)	1800±270 (90-8000)	183	560
Mo	9,6±1,4 (3-24)	28±4 (3-240)	16±2 (3-76)	22±3 (3-240)	1,75	4,12
Cd	0,10±0,02 (0,03-0,2)	0,10±0,02 (0,02-0,6)	0,20±0,02 (0,02-0,3)	0,10±0,02 (0,02-0,6)	0,24	0,42
Cs	0,030±0,005 (0,004-0,1)	0,030±0,005 (0,004-0,1)	0,020±0,005 (0,004-0,1)	0,030±0,005 (0,004-0,1)	0,26	0,6
Ba	18±3 (4-50)	28±4 (5-111)	50±8 (15-100)	27±4 (4-110)	18,3	33,6
La	0,10±0,02 (0,03-0,6)	0,20±0,03 (0,02-3,2)	0,30±0,05 (0,02-0,6)	0,2±0,02 (0,02-3,2)	0,67	-
Ce	0,7±0,1 (0,1-1,2)	0,6±0,1 (0,1-3,4)	0,9±0,1 (0,1-1,4)	0,7±0,1 (0,1-3,4)	-	-
Pr	0,02±0,003 (0,02-0,12)	0,03±0,003 (0,02-0,17)	0,17±0,1 (0,15-0,2)	0,06±0,01 (0,02-0,20)	-	-
Nd	<0,01	0,05±0,004 (0,02-0,9)	0,52±0,1 (0,48-0,56)	0,40±0,05 (0,01-0,9)	-	-
Sm	0,01±0,002 (0,02-0,12)	0,03±0,003 (0,02-0,19)	0,1±0,1 (0,02-0,15)	0,07±0,01 (0,02-0,2)	-	-
Eu	0,01±0,002 (0,02-0,13)	0,02±0,003 (0,02-0,24)	<0,01	0,05±0,01 (0,02-0,24)	-	-
Th	0,10±0,02 (0,01-1,3)	0,10±0,02 (0,01-0,9)	0,10±0,02 (0,01-0,1)	0,10±0,02 (0,01-1,3)	0,24	0,8
U	7±1 (0,4-30)	23±4 (3-120)	23±4 (0,4-61)	20±3 (0,4-120)	1,31	4,32
Pb	1,1±0,2 (0,3-4)	1,3±0,2 (0,3-6)	2,9±0,4 (0,4-19)	1,5±0,2 (0,3-19)	2,97	6,12

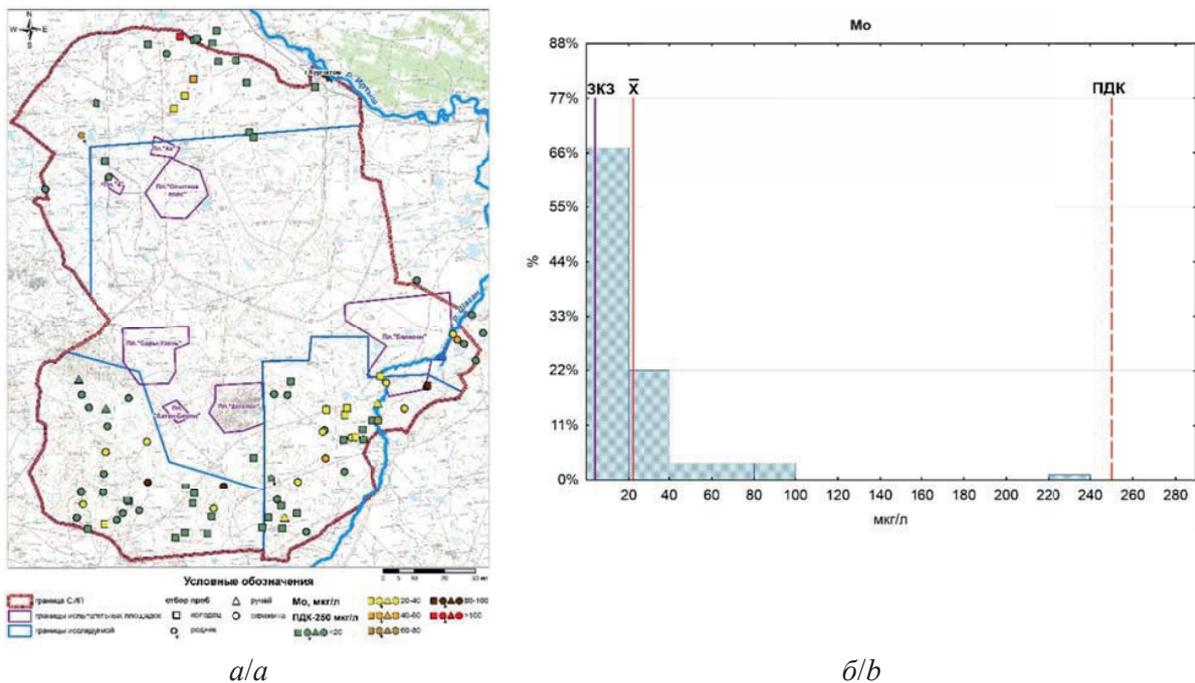
Примечание: «-» нет данных.

Note: «-» not available.



**Рис. 3.** Пространственное распределение (а) и гистограмма распределения концентрации урана в водах объектов водопользования СИП (б): ЗКЗ – среднее содержание в зоне континентального засоления; X – среднее содержание урана в воде

**Fig. 3.** Spatial distribution (a) and histogram of uranium distribution in waters of the STS objects of water use (b): ЗКЗ is the mean concentration in the continental salification zone; X is the mean uranium concentration in water



**Рис. 4.** Пространственное распределение (а) и гистограмма распределения концентрации молибдена в водах объектов водопользования СИП (б): ЗКЗ – среднее содержание в зоне континентального засоления; X – среднее содержание молибдена в воде

**Fig. 4.** Spatial distribution (a) and histogram of molybdenum concentration distribution in water of the STS objects of water use (b): ЗКЗ is the mean concentration in the continental salification zone; X is the mean molybdenum concentration in water

Из рис. 4 видно, что практически все воды объектов водопользования СИП имеют концентрацию молибдена ниже уровня ПДК (250 мкг/л) [17]. На территории полигона 67 % объектов водопользования, которые расположены в основном в Северо-Западной и Юго-Западной части СИП, содержат молибден в воде на уровне менее 20 мкг/л (рис. 4). Около 30 % вод объектов водопользования полигона имеют концентрацию молибдена в воде от 20 до 100 мкг/л. Следует отметить, что значительная часть колодцев и скважин (19 объектов) с концентрацией молибдена в воде от 20 до 100 мкг/л находится в Юго-Восточной части СИП.

Молибден является элементом, сопутствующим урану, благодаря схожим химическим свойствам [18, 19]. Выявлена положительная корреляционная связь между ураном и молибденом в гидрокарбонатных и сульфатных водах (рис. 5).

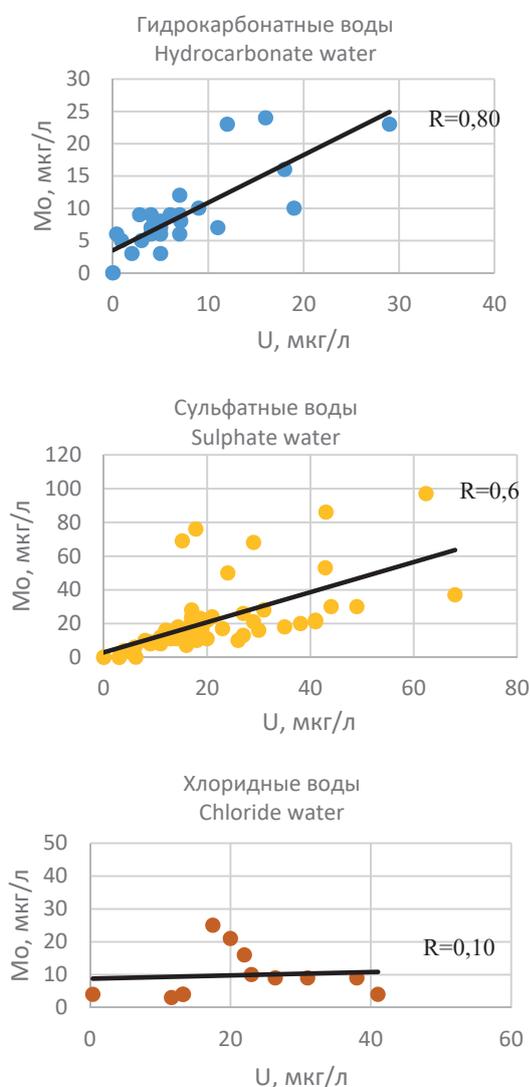


Рис. 5. Корреляционная зависимость урана и молибдена в воде объектов водопользования СИП

Fig. 5. Correlation dependence of uranium and molybdenum in water of the STS objects of water use

Выявлено отсутствие корреляционной связи между ураном и молибденом для хлоридных вод (рис. 5). Предположительно, в различных типах вод СИП на взаимосвязь урана и молибдена влияет содержание гидрокарбонат-иона и уровень общей минерализации. Так, средняя концентрация  $\text{HCO}_3^-$  составляет 260 мкг/л для всех типов вод, но в минерализованных хлоридных водах его доля среди анионов минимальна.

**Стронций.** Среднее содержание Sr в гидрокарбонатных водах составляет 730 мкг/л, в сульфатных – 1800 мкг/л, в хлоридных – 3400 мкг/л. Максимальная концентрация обнаружена в сульфатных водах – 8000 мкг/л, что в 14 раз превышает среднюю концентрацию в водах зоны континентального засоления. Превышение уровня ПДК (7000 мкг/л) для воды по стронцию в изучаемых объектах водопользования обнаружено только в одной пробе [19]. Особенности пространственного распределения стронция в объектах водопользования представлено на рисунке (рис. 6).

Общее число объектов водопользования на территории СИП с концентрацией Sr в воде до 1000 мкг/л составляет 42 % (рис. 6). Количество водоисточников с содержанием данного элемента в воде от 1000 до 3000 мкг/л достигает 41 %. В основном эти водоисточники расположены в Юго-Восточной части СИП (23 объекта).

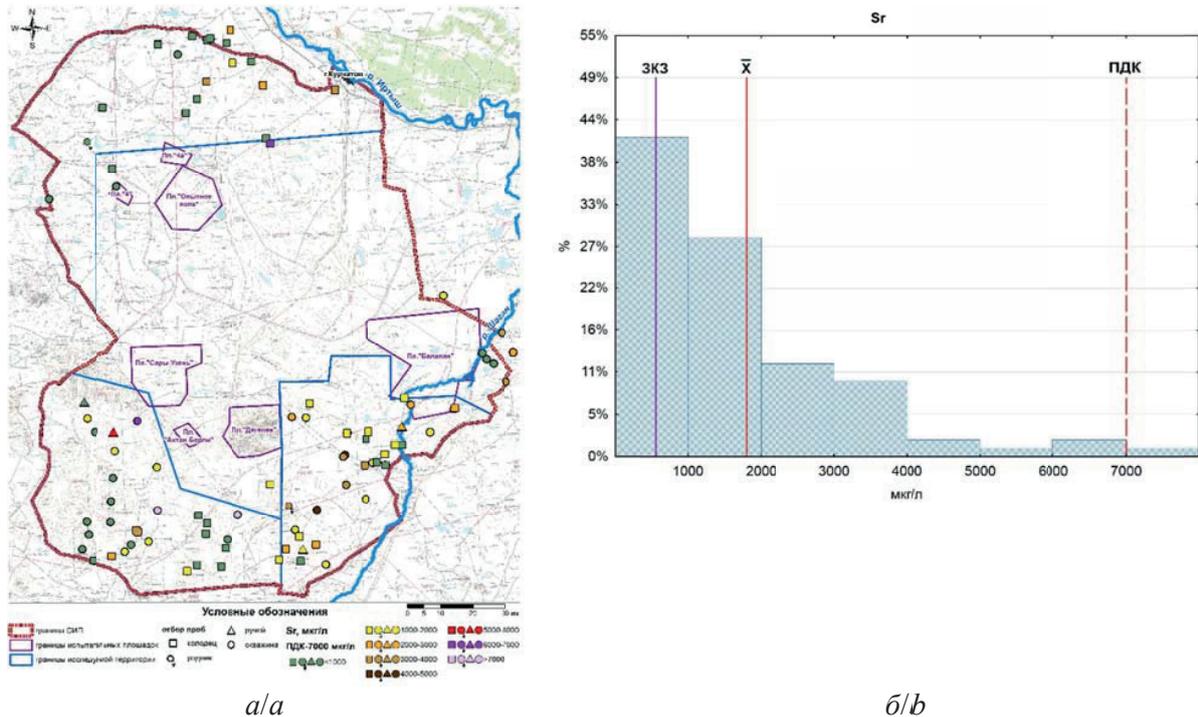
Полученные данные о повышенной средней концентрации Sr в воде объектов водопользования полигона по сравнению с водами континентального засоления были ожидаемы для исследуемой территории. В связи с тем, что территория Казахстана (включая СИП) относится к гидрогеохимической провинции, где общая минерализация грунтовых вод может достигать несколько граммов на литр, содержание стронция может увеличиваться до 10000 мкг/л [19, 20].

#### Заключение

Вода в объектах водопользования на территории СИП имеет разнообразный химический состав, на всех изученных участках встречаются воды как гидрокарбонатного, так сульфатного и хлоридного типов. Большинство водоисточников имеют слабощелочные воды сульфатного типа.

Результаты проведенных исследований показали, что воды объектов водопользования полигона характеризуются неоднородным микроэлементным составом. Выявлены повышенные содержания U, Mo и Sr в воде объектов водопользования относительно средней концентрации этих элементов в подземных водах зоны гипергенеза и континентального засоления. При этом для Юго-Восточной части СИП установлено наибольшее число колодцев и скважин с относительно высокими концентрациями данных элементов в воде.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантового финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан (5032/ГФ4 «Выявление механизмов формирования уровня загрязнения химическими токсикантами объектов водопользования бывшего Семипалатинского испытательного полигона»).



**Рис. 6.** Пространственное распределение (а) и гистограмма распределения концентрации стронция в водах объектов водопользования СИП (б): ЗКЗ – среднее содержание в зоне континентального засоления;  $\bar{X}$  – среднее содержание стронция в воде

**Fig. 6.** Spatial distribution (a) and histogram of strontium concentration distribution in water of the STS objects of water use (b): ЗКЗ is the mean concentration in the continental salification zone;  $\bar{X}$  is the mean strontium concentration in water

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стрильчук Ю.Г., Тоневицкая О.В., Яковенко Ю.Ю. Радиоэкологическое состояние «западной» части территории СИП // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2010 / под рук. С.Н. Лукашенко. – Павлодар: Дом печати, 2011. – Т. 2. – Вып. 3. – С. 81–164.
2. Радиоэкологическое состояние «юго-восточной» (район с. Саржал) части территории СИП / Ю.Г. Стрильчук, С.Н. Лукашенко, В.В. Каширский и др. // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2011–2012 г. / под рук. С.Н. Лукашенко. – Павлодар: Дом печати, 2013. – Т. 1. – Вып. 4. – С. 15–117.
3. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Радиоэкологическое состояние «северной» части территории Семипалатинского испытательного полигона / под рук. С.Н. Лукашенко. – Павлодар: Дом печати, 2010. – Вып. 1. – 234 с.
4. Отчет по РБП 011 «Изучение радиационной обстановки на территории Республики Казахстан. Обеспечение радиационной безопасности: Восточно-Казахстанская область». Т. II. – Алматы: АО «Волковгеология», 2008. – 117 с.
5. ГОСТ Р 51592–2000. Вода. Общие требования к отбору проб. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 8 с.
6. ГОСТ 26449.1–85. Установки дистилляционные опреснительные стационарные. Методы анализа соленых вод. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 101 с.
7. Water quality. Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) P. 2: Determination of 62 elements. ISO 17294-2:2003 (E). – Switzerland, 2003. – 30 p. URL: <https://www.iso.org/standard/36127.html> (дата обращения 26.08.2017).
8. Алекин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 444 с.
9. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the earth // Geochemistry International. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
10. Ayotte J., Gronberg J., Apodaca L. Trace elements and radon in groundwater Across the United States, 1992–2003: Scientific Investigation report. – Virginia, Reston, 2011. – 115 p. URL: [https://pubs.usgs.gov/sir/2011/5059/pdf/sir2011-5059\\_report-covers\\_508.pdf](https://pubs.usgs.gov/sir/2011/5059/pdf/sir2011-5059_report-covers_508.pdf) (дата обращения 26.08.2017).
11. Geochemistry and hydrology of perched groundwater springs: assessing elevated uranium concentrations at Pigeon Spring relative to nearby Pigeon Mine, Arizona (USA) // K.R. Beisner, N.V. Parretti, F.D. Tillman et al. / Hydrogeology Journal. – 2017. – V. 25. – № 2. – P. 539–556.
12. Water quality and hydrogeochemistry of a basin and range watershed in a semi-arid region of northern New Mexico / B. Linhoff, P. Longmire, M. Rearick et al. // Environ Earth Sci. – 2016. – V. 75. – P. 640.
13. Alkinani M., Kanoua W., Merkel B. Uranium in groundwater of the Al-Batin Alluvial Fan aquifer, south Iraq // Environ Earth Sci. – 2016. – V. 75. – 869. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-5685-3> (дата обращения 26.08.2017).
14. Geochemical characterization of groundwater from an arid region in India / T. Keesari, U.P. Kulkarni, A. Deodhar et al. // Environ Earth Sci. – 2014. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-013-2878-x> (дата обращения 26.08.2017).
15. Lebid H., Errih M., Boudjemline D. Contribution of strontium to the study of groundwater salinity. Case of the alluvial plain of Sidi Bel Abbes (Northwestern Algeria) // Environ Earth Sci. – 2016. – V. 75. – 947. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-5704-4> (дата обращения 26.08.2017).

16. Guidelines for Drinking-water Quality. Vol. 1. 2<sup>nd</sup> ed. – Geneva: World Health Organization, 2004. – 540 p. URL: [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/GDWQ2004web.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/GDWQ2004web.pdf) (дата обращения 26.08.2017).
17. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения: СанПиН 3.02.002.04. Утверждены приказом и.о. Министра здравоохранения Республики Казахстан от 28 июня 2004 года № 506. – Астана: Адлет, 2004. – 160 с.
18. Основные черты геохимии урана / под ред. академика А.П. Виноградова. 2-е издание, стереотипное и исправленное. – Томск: СТТ, 2013. – 374 с.
19. Крайнов С.Р., Рыженко В.М., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. – 672 с.
20. Байганов Ж.К. Отчет о НИР (аналитический): «Эколого-геоботаническая характеристика территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона». – Семипалатинск, 1998. – 37 с.

*Поступила 28.08.2017 г.*

#### **Информация об авторах**

**Есильканов Г.М.**, аспирант кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Лукашенко С.Н.**, доктор биологических наук, директор Института радиационной безопасности и экологии.

**Рихванов Л.П.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Койгельдинова М.Т.**, кандидат биологических наук, начальник лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии.

**Мухамедияров Н.Ж.**, инженер Института радиационной безопасности и экологии.

**Шакенов Е.З.**, инженер Института радиационной безопасности и экологии.

**Темиржанова А.Е.**, инженер Института радиационной безопасности и экологии.

**Яковенко Ю.Ю.**, начальник лаборатории геоинформационных технологий Института радиационной безопасности и экологии.

UDC 577.4:546.212:504.4.054

## PECULIARITIES OF WATER ELEMENTAL COMPOSITION AT WATER USE OBJECTS LOCATED AT THE TERRITORY OF THE FORMER SEMIPALATINSK TEST SITE

**Gani M. Yessilkanov<sup>1</sup>,**  
gme1@tpu.ru

**Sergey N. Lukashenko<sup>2</sup>,**  
lukashenko@nnc.kz

**Leonid P. Rikhvanov<sup>1</sup>,**  
rikhvanov@tpu.ru

**Madina T. Koygeldinova<sup>2</sup>,**  
koigeldinova@nnc.kz

**Nurlan Zh. Mukhamediyarov<sup>2</sup>,**  
mukhamediyarov@nnc.kz

**Erbol Z. Shakenov<sup>2</sup>,**  
shakenov@nnc.kz

**Aray E. Temirzhanova<sup>2</sup>,**  
temirzhanova@nnc.kz

**Yuliya Yu. Yakovenko<sup>2</sup>,**  
yakovenko@nnc.kz

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> Institute of Radiation Safety and Ecology,  
2, Krasnoarmeyskaya Avenue, Kurchatov, 071100, Kazakhstan.

**Relevance** of the work is determined by the necessity of obtaining reliable data on concentrations of chemical elements in water of the former Semipalatinsk test site water objects. This information is needed to reveal potentially-hazardous objects, those can affect the health of people inhabiting this territory.

**The aim** of the work is to study the peculiarities of water ultimate composition in the water objects used by the people living at the territory of the former Semipalatinsk test site.

**The methods.** Water ultimate composition was determined by inductively coupled plasma mass-spectrometry (Elan 9000 «Perkin Elmer SCIEX»), inductively coupled plasma atomic emission spectrometry («iCAP 6300 Duo» Thermo Scientific). To analyze such characteristics as total salt content, content of sulphates, hydrocarbonates, chlorides, calcium, magnesium and sodium, the titrimetric, colorimetric, and potentiometric methods of measurement were used.

**Results.** Chemical composition of water of the former Semipalatinsk test site water object is not uniform. 26 % of all the samples studied have hydrocarbonate-sodium-magnesium composition, 58 % – sulphate-sodium- magnesium, sulphate-sodium-magnesium and sulphate-sodium-calcium composition, 15 % – chloride-sodium-magnesium composition. Comparing the macrocomponent composition of water with an average composition of ground water of hypergenesis zone and continental salification zone, it was found that hydrocarbonate water is similar in composition with hypergenesis water. The studied sulphate and chloride water types are similar in macrocomponent composition with water of continental salification zone. To find the peculiarities in the former Semipalatinsk test site water ultimate composition, the authors have built the descending series of exceedence of concentrations related to the mean composition of hypergenesis zone water and continental salification zone water:  $U_{15} > Mo_{13} > Sr_{10}$  (hypergenesis zone),  $Mo_5 > U_5 > Sr_3$  (continental salification zone). The decreasing series show that in the former Semipalatinsk test site ground water such elements as U, Mo, Sr can be typically found. In water of 51 % of all the researched water objects of the former Semipalatinsk test site, the increased concentrations of U from 1 to 8 MPC ( $MPC_U = 15 \mu\text{g/l}$ ) were found. According to results of isotopic analysis, uranium in water can be of natural origin. Excessive concentrations of Sr in ground water can be explained by the presence of strontium hydrogeochemical area at the territory of Kazakhstan. Therefore, the discovered increased concentrations of molybdenum, uranium and strontium in water of the former Semipalatinsk test site water objects are associated with the natural and climatic peculiarities of the region.

### **Key words:**

Semipalatinsk test site, water, ground water, objects of water use, heavy metals, chemical composition.

*The research was partially supported by the grant financing of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (5032/GF4 «Determining the mechanisms of formation of pollution degree of the objects of water use at the former Semipalatinsk test site with chemical toxic agents»).*

## REFERENCES

1. Strilchuk Yu.G., Tonevitskaya O.V., Yakovenko Yu.Yu. Radiological situation in the «Western» part of the STS territory. *Topical Issues in Radioecology of Kazakhstan. Proc. of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan for the 2010*. Ed. by S.N. Lukashenko. Pavlodar, Dom Pechati Publ., 2011. Vol. 2, Iss. 3, pp. 81–164. In Rus.
2. Strilchuk Yu.G., Lukashenko S.N., Kashirskiy V.V. Radioecological state of the «Southeastern» part of the STS (in vicinity of Sarzhal village). *Topical Issues in Radioecology of Kazakhstan. Proc. of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan for the 2011–2012*. Ed. by S.N. Lukashenko. Pavlodar, Dom Pechati Publ., 2013. Vol. 1, Iss. 4, pp. 15–117. In Rus.
3. *Topical Issues in Radioecology of Kazakhstan. Radioecological state of the «northern» part of Semipalatinsk Test Site*. Ed. by S.N. Lukashenko. Pavlodar, Dom Pechati Publ., 2010. Iss. 1, 234 p. In Rus.
4. *Otchet o RBP 011 «Izucheniye radiatsionnoy obstanovki na territorii Respubliki Kazakhstan. Obespecheniye radiatsionnoy bezopasnosti. Vostochno-Kazakhstanskaya oblast»*. [Report on RBP 011 «Study of radiation situation at the territory of the Republic of Kazakhstan. Provision of radiation safety. East-Kazakhstan District»]. V. II. Almaty, Volkovgeologiya Publ., 2008. 177 p.
5. *GOST R 51592–2000. Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob* [State Standard R 51592–2000. Water. General requirements for sampling.]. Moscow, Standard publishing house, 2000. 8 p.
6. *GOST 26449.1–85. Ustanovki distillyatsionnye opresnitelnye stacionarnye. Metody analiza solenikh vod* [State Standard 26449.1–85. Stationary distillatory desalination units. Methods for analysis of salt waters]. Moscow, Standard publishing house, 2003. 101 p.
7. *Water quality. Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) Part 2: Determination of 62 elements – ISO 17294-2:2003 (E)*. Switzerland, 2003. – 30 p. Available at: <https://www.iso.org/standard/36127.html> (accessed 26 August 2017).
8. Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Basics of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p.
9. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
10. Ayotte J., Gronberg J., Apodaca L. *Trace elements and radon in groundwater across the United States, 1992–2003*: Scientific Investigation report. Virginia, Reston, 2011. 115 p. Available at: [https://pubs.usgs.gov/sir/2011/5059/pdf/sir2011-5059\\_report-covers\\_508.pdf](https://pubs.usgs.gov/sir/2011/5059/pdf/sir2011-5059_report-covers_508.pdf) (accessed 26 August 2017).
11. Beisner K.R., Paretto N.V., Tillman F.D. Geochemistry and hydrology of perched groundwater springs: assessing elevated uranium concentrations at Pigeon Spring relative to nearby Pigeon Mine, Arizona (USA). *Hydrogeology Journal*, 2017, vol. 25, no. 2, pp. 539–556.
12. Linhoff B., Longmire P., Rearick M. Water quality and hydrogeochemistry of a basin and range watershed in a semi-arid region of northern New Mexico. *Environ Earth Sci.*, 2016, vol. 75, pp. 640.
13. Alkinani M., Kanoua W., Merkel B. Uranium in groundwater of the Al-Batin Alluvial Fan aquifer, south Iraq. *Environ Earth Sci.*, 2016, vol. 75, 869. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-5685-3> (accessed 26 August 2017).
14. Keesari T., Kulkarni U.P., Deodhar A. Geochemical characterization of groundwater from an arid region in India. *Environ Earth Sci.*, 2014. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-013-2878-x> (accessed 26 August 2017).
15. Lebid H., Errih M., Boudjemline D. Contribution of strontium to the study of groundwater salinity. Case of the alluvial plain of Sidi Bel Abbes (Northwestern Algeria). *Environ Earth Sci.*, 2016, vol. 75, 947. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-5704-4> (accessed 26 August 2017).
16. *Guidelines for Drinking-water Quality*. Vol. 1. 2<sup>nd</sup> ed. Geneva: World Health Organization, 2004. 540 p. Available at: [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/GDWQ2004web.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/GDWQ2004web.pdf) (accessed 26 August 2017).
17. *Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k kachestvu vody tseentralizovannykh sistem pityevogo vodosnabzheniya. SanPiN 3.02.002.04 Uverzhdeny prikazom i.o. Ministra zdravookhraneniya Respubliki Kazakhstan ot 28 iyunya 2004 goda № 506* [Sanitary-epidemiological requirements for quality of water of centralized potable water supply systems. Sanitary regulations and standards 3.02.002.04. Approved by the order of Acting Minister of Healthcare of the Republic of Kazakhstan of the 28<sup>th</sup> of June, 2004 no. 506]. Astana, Adlet Publ., 2004. 160 p.
18. *Osnovnye cherty geokhimii urana* [Main features of uranium geochemistry]. Ed. by academician A.P. Vinogradov. 2<sup>nd</sup> edition, stereotyped and corrected. Tomsk, STT Publ., 2013. 374 p.
19. Kraynov S.R., Ryzhenko V.M., Shvetz V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of ground water. Theoretical, applied and ecological aspects]. Moscow, TsentrLitNefteGaz Publ., 2012. 672 p.
20. Bayganov Zh.K. *Ekologo-geobotanicheskaya kharakteristika teorii byushego Semipalatinskogo ispytatelnogo poligona: otchet o NIR (analitichesky)* [Research report (analytical): Ecological and geobotanic characteristics of the former Semipalatinsk Test Site territory]. Semipalatinsk, 1998. 37 p.

Received: 28 August 2017.

## Information about the authors

**Gani M. Yessilkanov**, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Sergey N. Lukashenko**, Dr. Sc., director, Institute of Radiation Safety and Ecology.

**Leonid P. Rikhvanov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Madina T. Koygeldinova**, Cand. Sc., head of the laboratory, Institute of Radiation Safety and Ecology.

**Nurlan Zh. Mukhamediyarov**, engineer, Institute of Radiation Safety and Ecology.

**Erbol Z. Shakenov**, engineer, Institute of Radiation Safety and Ecology.

**Aray E. Temirzhanova**, engineer, Institute of Radiation Safety and Ecology.

**Yuliya Yu. Yakovenko**, head of the laboratory, Institute of Radiation Safety and Ecology.

УДК 556, 550.8.053

## ОЦЕНКА ВЕДУЩИХ ФАКТОРОВ ЭВОЛЮЦИИ ПОДЗЕМНОЙ ГИДРОСФЕРЫ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИИ (НА ПРИМЕРЕ г. ИРКУТСКА)

Лоншаков Григорий Сергеевич<sup>1</sup>,  
rgm-10-1@mail.ru

Аузина Лариса Ивановна<sup>1</sup>,  
lauzina@mail.ru

<sup>1</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

**Актуальность работы.** Изучение путей и механизмов антропогенной трансформации подземной гидросферы урбанизированных территорий является актуальной задачей современных исследований. Подъем уровня подземных вод и формирование техногенных водоносных горизонтов угрожают активизацией и развитием ряда опасных инженерно-геологических процессов, что и наблюдается на данный момент в ряде районов города Иркутска. Данный факт ставит задачу прогноза и контроля состояния подземной гидросферы для целей устойчивого развития города и геологической безопасности. Представленная работа позиционируется как часть исследования, направленного на комплексную оценку устойчивости подземной гидросферы урбанизированных территории.

**Цель работы:** определение комплекса ведущих факторов, приводящих к техногенной эволюции подземной гидросферы города на основании теоретических представлений о механизмах её формирования и трансформации, численная оценка распределения каждого фактора нагрузки по площади и районирование территории города Иркутска в соответствии со степенью техногенной нагрузки.

**Методы исследования.** Выполнен анализ схем заложения водопроводящих подземных коммуникаций, карты улично-дорожной сети и актуального плана застройки города Иркутска с применением авторских алгоритмов обработки и представления информации в среде открытых ГИС программ.

**Результаты.** Детально охарактеризованы выбранные факторы нагрузки и результаты их взаимодействия с геологической средой города. Предложена методика численной оценки степени интенсивности и площадного распространения для каждого из факторов, созданы карты плотности (карта плотности заложения напорных подземных коммуникации, карта плотности улично-дорожной сети, схема плотности застройки центральной части города Иркутска), выполнено районирование территории города по степени плотности заложения подземных коммуникации и по плотности улично-дорожной сети.

### Ключевые слова:

Природно-техногенная система, плотность, подземные коммуникации, подземная гидросфера, геоинформационные технологии.

### Введение

С 80-х гг. XX в. в России формируется повышенный интерес к экологическим аспектам взаимодействия человека с геологической средой. Значительный вклад в нарушение природной геологической среды вносит процесс урбанизации территорий. К настоящему времени стало ясно, что воздействие на геологическую среду в ряде городов превысило допустимые границы и привело к порогу локального экологического бедствия, основным признаком которого является активизация инженерно-геологических процессов.

В контексте данной работы урбанизированные территории рассматриваются как управляемые природно-техногенные системы (ПТС), т. е. преобразованные коренные экосистемы и встроенные в них человеком искусственные сооружения [1].

Потенциал устойчивости коренных экосистем в общем виде определяет способность природной среды возвращаться к исходному состоянию в случаях как естественных, так и антропогенных воздействий. Исходный потенциал устойчивости экосистем в Прибайкалье оценивался в 40–45 баллов, сейчас интегральная оценка уровня устойчивости с учетом антропогенной трансформации составляет 21–35 баллов, около 15 % площадей вообще

утратили свойства коренной экосистемы, более 1,2 % территории полностью разрушены под воздействием урбанизации [2].

В процессе исторического развития на территории города Иркутска сформировалась ПТС, где ведущими процессами, влияющими на эволюцию геологической среды, являются техногенные. Самая динамичная её составляющая, наиболее остро воспринимающая техногенное воздействие, – это подземная гидросфера (ПГ). В результате техногенеза активизируется ряд инженерно-геологических процессов, связанных с подземными водами, в том числе суффозионно-просадочные, эрозионные, подтопление, балльная оценка которых позволила сформировать интегральную карту опасности развития инженерно-геологических процессов (рис. 1). Однако в представленной карте отражен результат, а не факторы, его формирующие. Для разработки природоохранных мероприятий, т. е. прикладного использования результатов научных исследований, необходимо выявить и оценить причины происходящих процессов, состоящие из двух блоков факторов, определяющих природный потенциал устойчивости ПТС и ведущие техногенные нагрузки. В связи с этим комплексная оценка устойчивости подземной гидросферы урба-

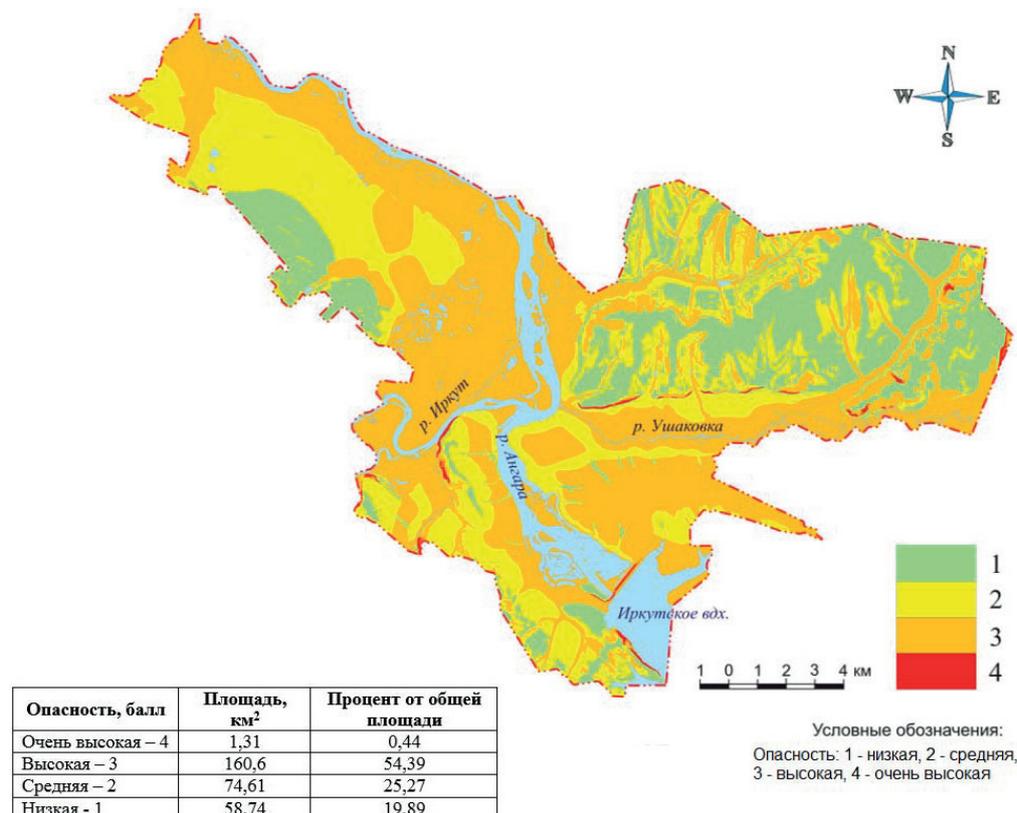


Рис. 1. Карта опасности инженерно-геологических процессов на территории г. Иркутска [10]

Fig. 1. Map of geological hazards risk on the territory of Irkutsk [10]

низированных территорий является не только актуальной, но и одной из важнейших проблем, имеющих как научное, так и прикладное значение.

Разнообразие природно-техногенных факторов, воздействующих на объект исследования, их интенсивная динамика усложняют задачу, однако уровень современных геоинформационных технологии открывает новые пути в решении прикладных задач в области природопользования, в том числе – анализе, прогнозе и контроле состояния ПТС [3–6].

В работах по экологии и экологической гидрогеологии чаще всего описывается методика выделения ведущих факторов, определяющих устойчивость ПГ и приводящих к её эволюции и изменению по отношению к конкретному виду техногенеза [7, 8].

Представленные в данной статье результаты – это часть комплексного исследования, конечной целью которого является разработка методики оценки комплекса ведущих природных и техногенных факторов, влияющих на эволюцию ПГ городских территорий, и уточнение структуры комплексного показателя устойчивости подземной гидросферы [9].

#### Объект исследования и методика

В качестве объекта исследования рассматривается природно-техногенная система г. Иркутска. Исследование включает в себя составление актуальной модели ПТС, состоящей:

- из геологических и гидрогеологических показателей, определяющих ее естественное состояние;
- техногенных факторов, определяющих развитие и трансформацию ПГ.

Показатели исходного состояния подземной гидросферы характеризуют условия формирования фильтрационных потоков в естественных условиях. Это большой комплекс характеристик, в том числе тип гидрогеологической структуры, литологический состав водовмещающих отложений, их мощность, степень трещиноватости, фильтрационные характеристики, гидродинамический режим, гидрогеохимические показатели и т. д. [7, 8].

Техногенное воздействие вызывает существенные изменения естественных потоков и, в соответствии с кривой Нолана, приводит ПТС к устойчивому состоянию в новом качестве (рис. 2, IIIa) или же к её деструкции под воздействием инженерно-геологических процессов (рис. 2, IIIб). Определить критерии устойчивости как скорость возврата ПГ в исходное состояние – достаточно сложная задача, связанная с выбором параметров оценок исходного состояния, естественной траекторией саморазвития ПГ и определением техногенной составляющей в эволюции и деградации ПГ.

Отметим, что в развитии техногенной нагрузки существуют две опасные тенденции:

- увеличение объема (количества объектов, массы отходов, интенсивности процессов и т. д.);

- увеличение разнообразия и разнородности, что не менее опасно для изменения экологического состояния территории.

Показатели техногенной нагрузки должны отражать:

- характер и разнообразие техногенной нагрузки;
- площадь и глубину ее влияния.

Комплексирование этих показателей позволяет разработать интегральный показатель устойчивости ПГ, т. е. комплексный показатель состояния подземной гидросферы (КПГ), позволяющий оценить соотношение основных факторов нагрузки и устойчивости на стадии стабильного существования ПГ (рис. 2, II) [9].

Для оптимизации разработки КПГ на базе современной открытой ГИС-системы Quantum GIS был сформирован ГИС-проект под названием «Атлас геолого-гидрогеологических и техногенных условий территории г. Иркутска», в котором каждый фактор представлен в виде самостоятельного растрового или векторного слоя.

В качестве ведущих техногенных факторов эволюции свойств подземной гидросферы рассматриваются [11–17]:

- плотность застройки территории города;
- утечки из водонесущих коммуникации;
- плотность улично-дорожной сети.

Перечисленные нагрузки предопределяют процессы:

- подтопления или подпора ПВ;
- изменения структуры гидродинамических потоков и формирования различного вида инверсий;
- перераспределения поверхностного и подземного стока;
- загрязнения ПВ и пр. [18].

### Характеристика основных техногенных факторов, включенных в расчет КПГ

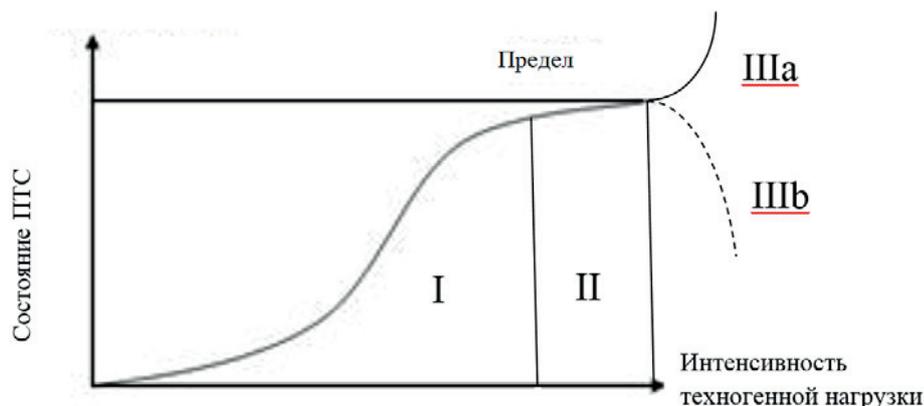
Застройка территории города

Территория города Иркутска занимает 30,6 тыс. га, из которых городской застройкой занято 11,95 тыс. га, что составляет 33,1 % всех городских земель. Значительную территорию занимают леса (6,35 тыс. га, или 22,9 %), водные пространства (2,87 тыс. га, или 10,4 %), луга и пойменные территории (4,26 тыс. га, или 15,4 %).

Селитебные территории в общем объеме земельного фонда города занимают 8,36 тыс. га, или 30,2 %. В границах города большая часть селитебных территорий занята некапитальной низкоплотной жилой застройкой, в основном имеющей высокий уровень физического износа. Значительные площади приходятся на промышленные и коммунально-складские объекты, зачастую занимающие самые ответственные в градостроительном плане территории.

К настоящему времени в городе сформировалось пять крупных промышленных зон – Северная, Жилкинская, Мельниковская, Маратовская и Восточная [19]. В них входит около 500 различных предприятий, баз, складов, гаражей и других объектов общей территорией около 2 тыс. га. По своему составу и отраслевому профилю промышленные зоны неоднородны.

В соответствии с СП 11–105–97 [20] и планом застройки г. Иркутска (ЗАО «Гражданпроект», с изменениями АО «ГИПРОДОРНИИ», 2015 г.), по этажности и конструктивным особенностям были выделены следующие районы: зона 1–2 этажной деревянной застройки (около 25 % застроенной территории), зона 1–2 этажной каменной застройки (около 25 %, в центральной части преимущественно жилая, на периферийных районах – промышленные ангары и боксы), зона 3–5 этажной



**Рис. 2.** Кривая развития ПТС (кривая Нолана). I – стадия роста техногенной нагрузки; II – стадия удержания (стабильного существования ПТС); IIIa – переход ПТС на новый уровень развития (новое устойчивое состояние); IIIb – деградация ПТС

**Fig. 2.** Typical state curve of natural and anthropogenic systems (Nolan's curve). I is the stage of increasing of anthropogenic influence; II is the stage of sustainable development, IIIa is the system changes over to next sustainable level; IIIb is the degradation of the system

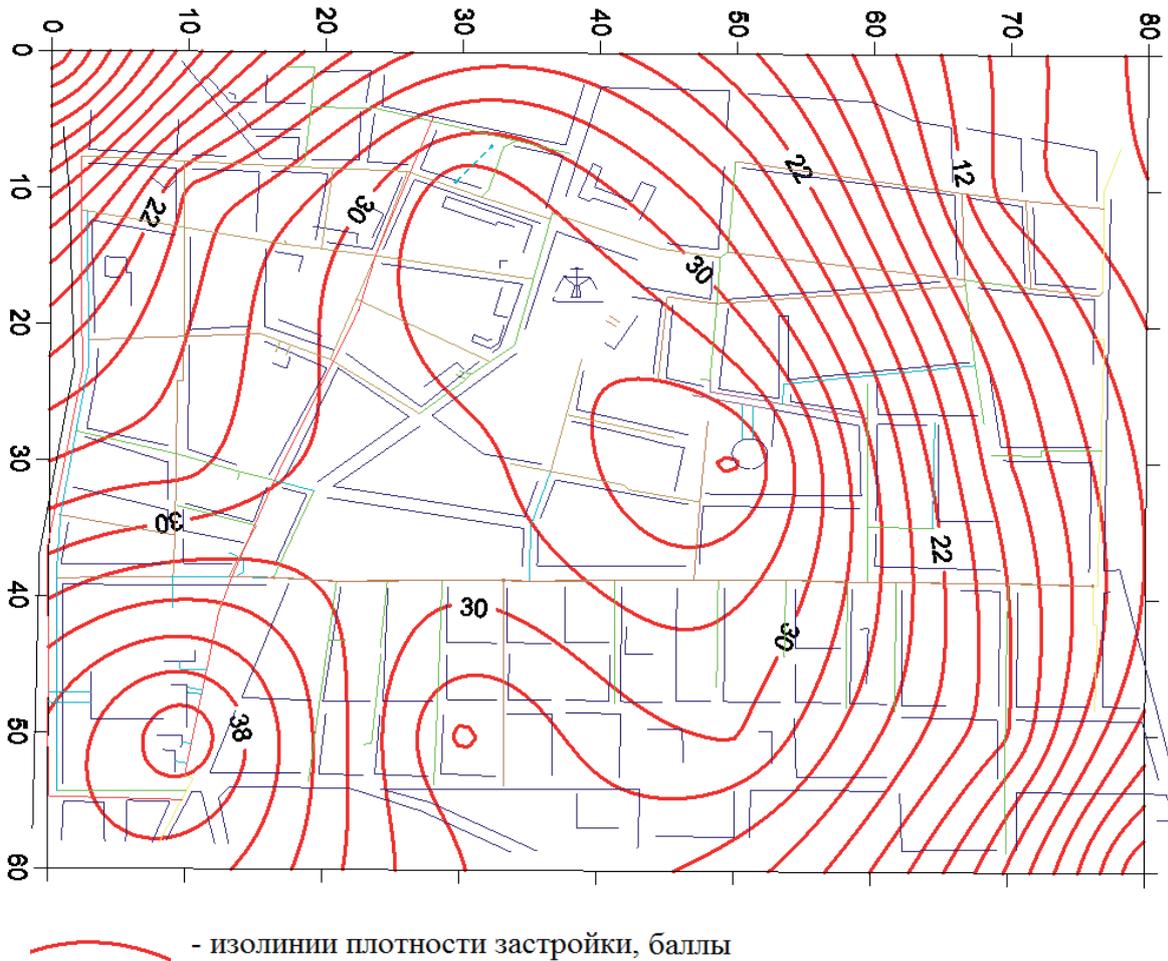


Рис. 3. Схема плотности застройки центральной части города Иркутск

Fig. 3. Building density of central district of Irkutsk

(40 %) и застройки каменными зданиями более 5 этажей (10 % застроенной территории).

Для оценки степени техногенного влияния, оказываемого застройкой, в ГИС- проект включен генеральный план и схема плотности застройки центральной части города (рис. 2) [11]. Плотность застройки рассчитана в баллах по следующему алгоритму:

$$\rho_{1-4} = (S_{1-4} * K_{1-4}) / S, \quad \Sigma \rho = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4,$$

где  $S_1, S_2, S_3, S_4$  – площадь, занятая зданиями и сооружениями различной этажности с учётом типа материала (дерево, кирпич);  $S$  – площадь расчетного квадрата,  $m^2$ ;  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$  – плотность зданий и сооружений различной этажности и типа материала (дерево, камень);  $K$  – коэффициент, отражающий этажность и тип материала (например, зона 1–2 этажной деревянной застройки имеет  $K=1$ ).

Подземные водонесущие коммуникаций

На балансе МУП «Водоканал» находится 746 км сетей водопровода и 718 км сетей канализации (без учета подземных коммуникаций микрорайона «Второй Иркутск» и частных сетей, подве-

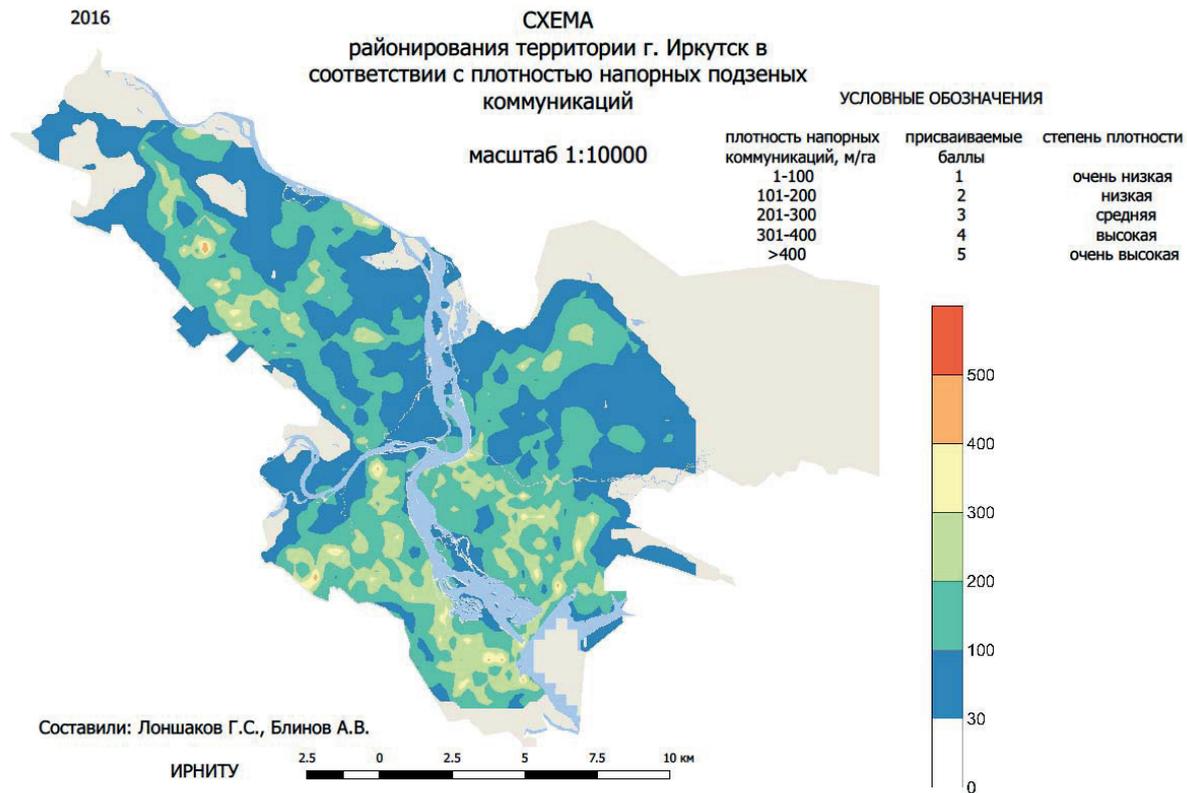
денных к индивидуальным водопользователям). Ежедневный объем подаваемой в водопровод воды составляет 304,36 тыс.  $m^3$  (2012 г.).

Что касается тепловых сетей г. Иркутска, то большая их часть имеют срок эксплуатации более 25–30 лет. Распределительные квартальные сети практически не подвергались модернизации, являются изношенными и требуют замены. Уровень тепловых потерь составляет 6,5–14 %, а процент износа тепловых сетей доходит до 70 % [21].

По официальным данным МУП «Водоканал» для Иркутска доля воды, приходящаяся на физические утечки, равна 6 % от общего числа подаваемой воды, однако фактически цифра составляет порядка 20–30 % [22].

Для сетей канализации ни нормативные, ни фактические значения не установлены.

По мнению ряда исследователей, в том числе зарубежных [23], утечки из сетей напорных подземных коммуникаций являются главной причиной развития подтопления урбанизированных территории, в связи с чем эта составляющая техногенной нагрузки является одной из важнейших.



**Рис. 4.** Схема районирования территории г. Иркутск по степени плотности напорных подземных коммуникаций

**Fig. 4.** Zoning of the territory of Irkutsk according to pipeline distribution density

Авторами разработан алгоритм оценки плотности заложения подземных коммуникаций, в соответствии с которым для территории города Иркутска составлены схемы плотности водопроводной сети, теплопровода и канализации, а также интегральная схема плотности напорных коммуникаций, на основе которой произведено районирование территории города (рис. 4).

Улично-дорожная сеть

Протяженность всей дорожной сети города Иркутск составляет уже более 881 км, из них дороги третьего уровня (грунтовые и проселочные) составляют 154 км, второго уровня (дороги с усовершенствованным покрытием) – 547 км, и первого уровня (автомагистрали и железные дороги) – 180 км.

В 2007 г. была составлена электронная схема плотности дорожной сети (рис. 5). При составлении схемы территория города была районирована на 3 категории сложности исходя из значения плотности (0–3,6; 3,6–7,2; >7,2 км/км<sup>2</sup>) [13].

Развитие транспортной инфраструктуры в левобережном районе города снизило дренируемость местности, что вылилось в увеличение площади «озер» с 9 до 90 га за последние 35 лет (1972–2007) [24].

#### Инженерно-геологические процессы, развивающиеся на территории г. Иркутска в результате техногенного воздействия на ПГ

Рост промышленного и гражданского строительства, развитие городской инфраструктуры, мероприятия по благоустройству жилых массивов приводят к перемещению значительного количества грунтовых масс, увеличению объемов техногенных и техногенно-измененных грунтов, преобразованию условий теплообмена, инфильтрации, стока и разгрузки подземных вод, баланса грунтовых вод, равновесного состояния склонов и пр. [12]. Негативные последствия этих изменений – локальная активизация инженерно-геологических процессов, карта распространения которых была составлена А.А. Рыбченко под руководством Ю.Б. Трждинского (ИЗК СО РАН, 2009 г.) [10], рис. 6.

Проявления суффозионно-просадочных процессов в виде мелких, периодически появляющихся провалов фиксируется практически повсеместно в городской черте. Причиной их возникновения чаще всего становится искусственное увлажнение грунтовых масс, наличие в разрезе просадочных или насыпных неуплотненных грунтов, вследствие чего наиболее часто следы процесса наблюдаются по трассам водонесущих коммуникации и массивам искусственных насыпей.

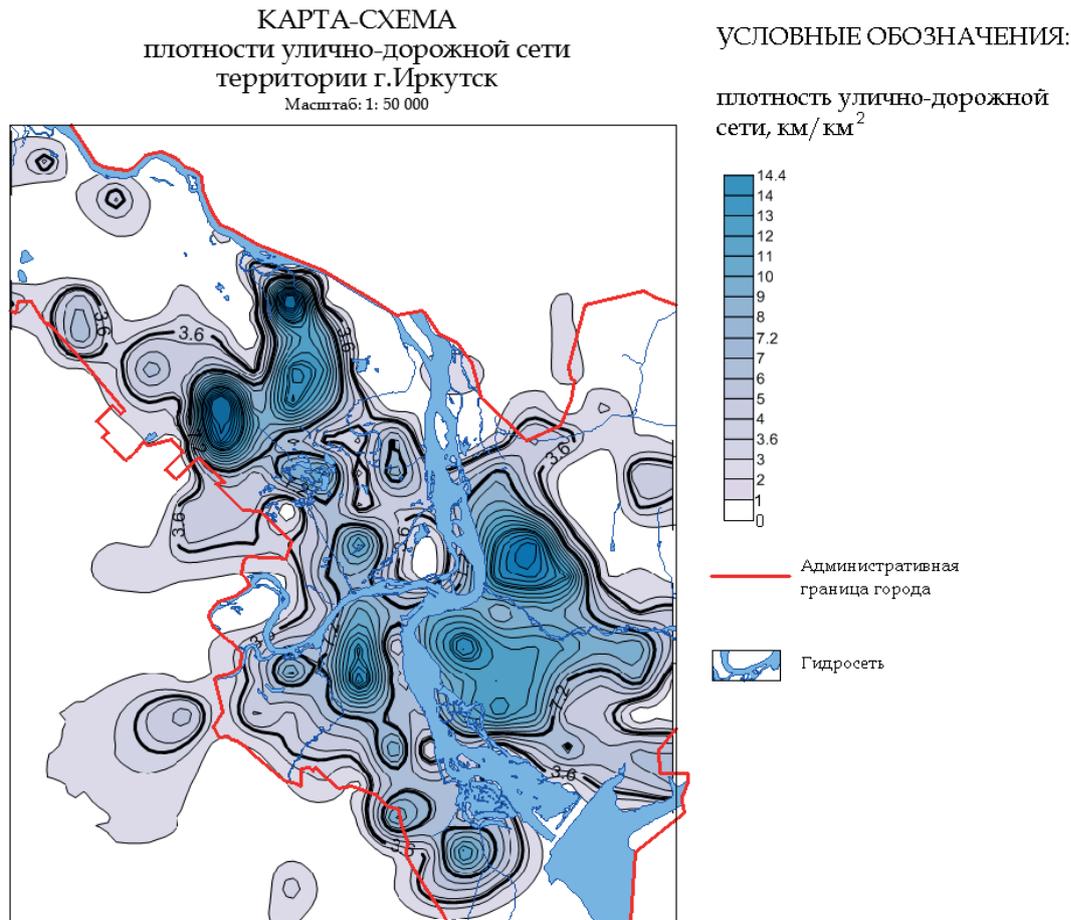


Рис. 5. Карта плотности дорожной сети на территории г. Иркутска

Fig. 5. Map of Irkutsk road network density

Развитие подтопления характерно для более чем трети территории города Иркутск. Ведущие российские и зарубежные исследователи в своих работах указывают на искусственное инфильтрационное питание в виде утечек из напорных подземных коммуникаций в качестве главной причины развития этого процесса [25–28].

Эрозия грунтовых массивов, а именно оврагообразование, на территории Иркутска связано с нарушением естественных потоков поверхностного стока вследствие неграмотного подхода к планировке территории (застройки, асфальтированию) и зачастую напрямую связано с суффозионно-просадочными процессами [24].

Для разработки КПП необходимо количественно оценить степень значимости выделенных природных и техногенных факторов устойчивости подземной гидросферы, что возможно реализовать в рамках ГИС-проекта методами многомерной площадной статистики, в т. ч. используя факторный анализ и метод главных компонент.

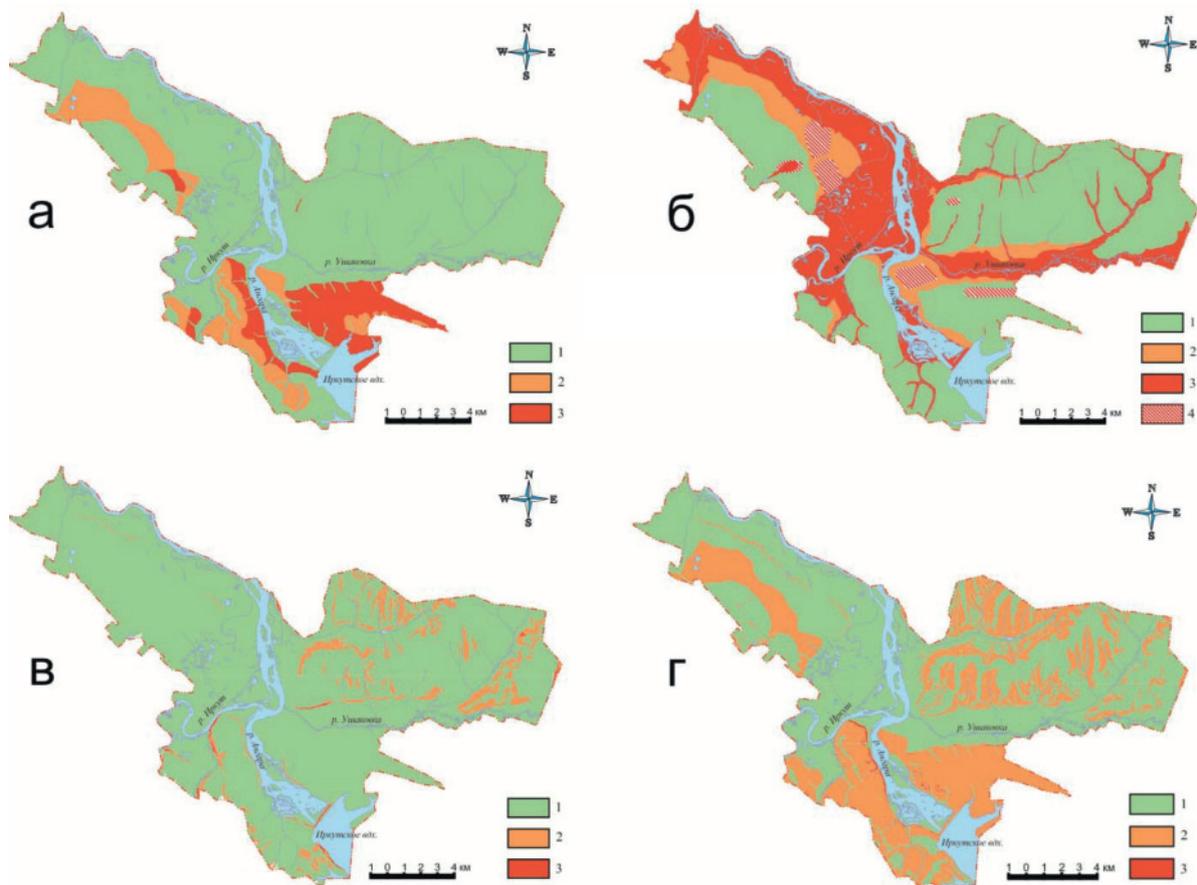
В результате определится набор статистически обоснованных параметров, увязанных с комплек-

сом показателей исходного состояния гидросферы и показателей техногенной нагрузки.

Основной задачей следующего этапа является выявление правил (закономерностей), а в идеальном варианте – уравнений, увязывающих выделенные факторы друг с другом и показателями исходного (природного) состояния системы.

#### Заключение

В работе приведена характеристика главных факторов техногенной эволюции подземной гидросферы урбанизированных территории и результаты их длительного взаимодействия с геологической средой города. Задача количественной оценки степени интенсивности и распространения упомянутых факторов решена применением авторской методики обработки векторной информации и представления её в виде растровых карт. Полученные карты плотности заложения коммуникации, застройки и улично-дорожной сети послужат основой для оценки суммарного техногенного влияния на подземную гидросферу при расчете комплексного показателя устойчивости подземной гидросферы.



**Рис. 6.** Инженерно-геодинамические карты (А.А. Рыбченко, 2009): а) суффозионно-просадочного процесса; б) подтопления; в) эрозийного процесса; г) гравитационного процесса. Вероятность развития процесса: 1 – высокая; 2 – средняя; 3 – низкая; 4 – техногенное подтопление

**Fig. 6.** Maps of geological hazards: а) underwashing; б) underflooding; в) soil erosion; г) landslide development. Hazard risk: 1 – high; 2 – medium; 3 – low; 4 – anthropogenic underflooding

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трждинский Ю.Б. Техногенные изменения геологической среды (на примере Сибирского региона) / под ред. К.Г. Леви. – Иркутск: [б. и.], 2007. – 117 с.
2. Онлайн атлас «Окружающая среда и здоровье населения России». URL: <http://www.sci.aha.ru/ATL/ra21b.htm> (дата обращения: 20 декабря 2016).
3. Кузеванов К.И., Дутова Е.М., Покровский Д.С. Использование геоинформационных технологий при исследовании процессов техногенного подтопления урбанизированных территорий (на примере г. Томска) // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 7. – С. 30–35.
4. Покровский В.Д. Исследование процессов подтопления урбанизированных территорий с использованием геоинформационных технологий (на примере города Томска): дис. ... канд. геолого-минералогических наук. – Томск, 2015. – 199 с.
5. Hibbs B.J. Groundwater in urban areas // Journal of contemporary water research and education. – 2016. – Iss. 159. – P. 1–4.
6. Gill J.C., Malamud B.D. Anthropogenic processes, natural hazards, and interactions in a multi-hazard framework // Earth-Science Reviews. – 2017. – V. 166. – P. 246–269.
7. Белоусова А.П., Гавич И.К. Экологическая гидрогеология. – М.: Изд-во «Академкнига», 2006. – 397 с.
8. Хаустов А.П. Устойчивость подземной гидросферы и основы экологического нормирования. – М.: Изд-во ГЕОС, 2007. – 174 с.
9. Аузина Л.И. Комплексный показатель как основа оценки устойчивости подземной гидросферы // Город: прошлое, настоящее, будущее: сборник научных трудов «Проблемы развития и управления на пороге III тысячелетия». – Иркутск, 2000. – С. 154–158.
10. Рыбченко А.А. Инженерно-геодинамическая оценка современного состояния геологической среды г. Иркутска: дис. ... канд. геолого-минералогических наук. – Иркутск, 2009. – 148 с.
11. Оценка влияния техногенных нагрузок на верхнюю часть подземной гидросферы / Л.И. Аузина, В.А. Пеллинен, Ю.А. Щербакова, А.Н. Щербина // Сборник трудов Всероссийской симпозиума-конференции им. академика Усова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2000. – С. 168–170.
12. Шенькман Б.М., Шенькман И.Б. Эволюция гидрогеологических условий на территории Большого Иркутска // Проблемы оценки и прогноза устойчивости геологической среды г. Иркутска. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1997. – С. 39–43.
13. Грицик В.А., Щербакова Ю.А., Щербина А.Н. Роль дорожных систем в формировании устойчивости природно-техногенных комплексов городских агломерации // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: сборник избранных трудов научно-технической конференции. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – С. 64–67.
14. Шенькман Б.М., Шолохов П.А., Шенькман И.Б. Подтопление Иркутска грунтовыми водами // География и природные ресурсы. – 2011. – № 2. – С. 54–61.

15. Kevin R.G., John R.G. Chapter 19 – Natural and Anthropogenic Factors Affecting Groundwater in the Critical Zone of the Texas Triangle Megaregion // *Developments in Earth Surface Processes*. – 2015. – V. 19. – P. 579–618.
16. Hibbs B.J., Sharp J.M. Hydrogeological impact of the urbanization // *Environmental and engineering geoscience*. – 2012. – № 18 (1). – P. 3–24.
17. Spatial resolution of anthropogenic heat fluxes into urban aquifers / A.B. Susanne, P. Bayer, K. Menberg, S. Jung, P. Blum // *Science of the Total Environment*. – 2015. – V. 524–525. – P. 427–439.
18. Isotopic constraints on water source mixing, network leakage and contamination in an urban groundwater system / F. Grimmeisen, M.F. Lehmann, T. Liesch, N. Goepfert, J. Klinger, J. Zopfi, N. Goldscheider // *Science of the Total Environment*. – 2017. – V. 583. – P. 202–213.
19. Генеральный план застройки города Иркутска, 2016 г. URL: <http://admirk.ru/pages/proekti-planir-territ-irkutska.aspx> (дата обращения 20 декабря 2016).
20. СП 11–105–97 Инженерные изыскания для строительства. Общие правила и положения. – М: ПНИИС, 1998. – 48 с.
21. Электронная энциклопедия РосТепло, Иркутск. URL: <http://www.rosteplo.ru/w/Иркутск> (дата обращения 19 декабря 2016 г.)
22. Эколого-экономические аспекты эксплуатации подземных вод Обь-Томского междуречья / В.К. Попов, О.Д. Лукашевич, В.А. Коробкин, В.В. Золотарева, Ю.Ю. Галямов. – Томск: Изд-во ТГАСУ, 2003. – 174 с.
23. Gattinoni P., Scesi L. The groundwater rise in the urban area of Milan (Italy) and its interactions with underground structures and infrastructures // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2017, February. – V. 62. – P. 103–114.
24. Геоэкологические проблемы город Иркутска / В.В. Акулова, М.И. Грудинин, Т.Г. Рященко, Н.И. Демьянович // *Известия Иркутского государственного университета*. – 2008. – Т. 1. – № 1. – С. 22–32.
25. Identification of potential artificial groundwater recharge zones in Northwestern Saudi Arabia using GIS and Boolean logic / Faisal K. Zaidi, Yousef Nazzal, Izrar Ahmed, Muhammad Naeem, Muhammad Kamran Jafri // *Journal of African Earth Sciences*. – 2015. – V. 111. – P. 156–169.
26. Impact of landscape pattern at multiple spatial scales on water quality: a case study in a typical urbanised watershed in China / Zhenyao Shena, Xiaoshu Houa, Wen Li, Guzhanuer Aini, Lei Chena, Yongwei Gong // *Ecological Indicators*. – 2015. – V. 48. – P. 417–427.
27. Sangam S., Vishnu P.P. Chapter 1 – Groundwater as an Environmental Issue in Asian Cities // *Groundwater Environment in Asian Cities*. – 2016. – P. 1–13.
28. Chapter 5 – Groundwater Environment in Delhi, India / S. Aditya, A. Shakir, K. Suman, S. Shashank, S.V.N. Rao // *Groundwater Environment in Asian Cities*. – 2016. – P. 77–108.

*Поступила 31.08.2017 г.*

#### **Информация об авторах**

**Лоншаков Г.С.**, аспирант кафедры прикладной геологии Иркутского национального исследовательского технического университета.

**Аузина Л.И.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры прикладной геологии Иркутского национального исследовательского технического университета.

UDC 556, 550.8.053

## EVALUATION OF DETERMINING FACTORS OF UNDERGROUND HYDROSPHERE EVOLUTION WITHIN URBAN AREAS (ON THE EXAMPLE OF IRKUTSK)

Grigoriy S. Lonshakov<sup>1</sup>,

rgm-10-1@mail.ru

Larisa I. Auzina<sup>1</sup>,

lauzina@mail.ru

<sup>1</sup> Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

**The relevance of the discussed issue.** Studying the anthropogenic evolution and transformation of underground hydrosphere within urbanized territories is the relevant issue nowadays. Underflooding and forming of technogenic aquifers cause serious geological hazards, that has been seen in some districts of Irkutsk. That fact sets a problem of forecasting and controlling underground hydrosphere to maintain sustainable development and environmental compatibility of Irkutsk. This paper is positioned as a part of complex study of underground hydrosphere sustainability within urbanized territories.

**The main aim** is to define theoretically the complex of determining factors, which provide technogenic underground hydrosphere evolution within territory of Irkutsk, to evaluate numerically and to map each factor spatial distribution, zoning according to the level of anthropogenic influence.

**The methods used in the study.** The authors have analyzed the underground pipeline schemes, road network and land-use plan with the proprietary technique for processing and representation of spatial information, based on open-ware GIS.

**The results.** The authors described in details the major factors of anthropogenic influence on underground hydrosphere and results of its interaction with geological medium. Author's methods of numerical evaluation of gradation and spatial distribution of mentioned factors were applied, succeeded by mapping (map of density of underground pipeline distribution, road network density scheme and building density scheme were compiled).

### Key words:

Natural and anthropogenic system, density, underground pipelines, underground hydrosphere, geoinformation technologies.

### REFERENCES

1. Trzhtsinskiy Yu.B., Levy K.G. *Technogennye izmeneniya geologicheskoy sredy (na primere Sibirskogo regiona)* [Results of anthropogenic influence on geological medium (on the example of Siberian region)]. Irkutsk, 2007. 117 p.
2. *Okruzhayushchaya sreda i zdorovye naseleniya Rossii* [Environment and public health in Russia]. Available at: <http://www.sci.aha.ru/ATL/ra21b.htm> (accessed 20 December 2016).
3. Kuzevanov K.I., Dutova E.M., Pokrovskiy D.S. *Ispolzovanie geoinformatsionnykh tekhnologiy pri issledovanii protsessov podtopleniya urbanizirovannykh territoriy (na primere goroda Tomsk)* [Using of geoinformatic technologies in studying the anthropogenic underflooding of urbanized territories (on the example of Tomsk)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2004, no. 7, pp. 30–35.
4. Pokrovsky V.D. *Issledovanie protsessov podtopleniya urbanizirovannykh territoriy s ispolzovaniem geoinformatsionnykh tekhnologiy (na primere goroda Tomsk)*. Dis. Kand. nauk [Study of underflooding within urbanized territories using the geoinformatic systems (on the example of the Tomsk). Cand. Diss.]. Tomsk, 2015. 199 p.
5. Hibbs B.J. Groundwater in urban areas. *Journal of contemporary water research and education*, 2016, Iss. 159, pp. 1–4.
6. Gill J.C., Malamud B.D. Anthropogenic processes, natural hazards, and interactions in a multi-hazard framework. *Earth-Science Reviews*, 2017, vol. 166, pp. 246–269.
7. Belousova A.P., Gavitch I.K. *Ecologicheskaya gidrogeologiya* [Ecological hydrogeology]. Moscow, Academkniga Publ., 2006. 397 p.
8. Khaustov A.P. *Ustoychivost podzemnoy gidrosfery i osnovy ekologicheskogo normirovaniya* [Undergrounhd hydrosprere sustainability and basis of ecological norming]. Moscow, GEOS Publ., 2007. 174 p.
9. Auzina L.I. *Compleksny pokazatel kak osnova otsenki ustoychivosti podzemnoy gidrosfery* [Composite indicator as a basis of underground hydrosphere sustainability evaluation]. *Gorod: proshloe, nastoyashchee, budushchee: sbornik nauchnykh trudov «Problemy razvitiya i upravleniya na poroge III tysyacheletiya»* [City: antecedent, present, future: proceedings of the symposium «Problems of urban development and management on the doorstep of the III millennium»]. Irkutsk, 2000. pp. 154–158.
10. Rybchenko A.A. *Inzhenerno-geodinamicheskaya otsenka sovremennogo sostoyaniya geologicheskoy sredy goroda Irkutsk*. Diss. Kand. nauk [Engineering-geodynamical assessment of the modern condition of geological medium within Irkutsk. Cand. Diss.]. Irkutsk, 2009. 148 p.
11. Auzina L.I., Pellinen V.A., Shcherbakova Yu.A., Shcherbina A.N. *Otsenka vliyaniya tekhnogennykh nagruzok na verkhnyuyu chast podzemnoy gidrosfery* [Evaluation of man-caused impact on the upper layers of underground hydrosphere]. *Sbornik trudov Vserossiyskoy simpoziuma-konferentsii im. Academica Usova* [Proc. All Russian symposium named after academician Usov]. Tomsk, TPU Publ., 2000. pp. 168–170.
12. Shenkman B.M., Shenkman I.B. *Evolutsiya gidrogeologicheskikh usloviy na territorii bolshogo Irkutsk* [Evolution of the hydrogeological conditions on the territory of Bolshoy Irkutsk]. *Problemy otsenki i prognoza ustoychivosti geologicheskoy sredy goroda Irkutsk* [Proc. Sym. Problems of evaluation and sustainability forecasting of the territory of Bolshoy Irkutsk]. Irkutsk, ISTU Publ., 1999. pp. 39–43.
13. Gritsik V.A., Shcherbakova Yu.A., Shcherbina A.N. *Rol dorozhnykh sistem v formirovaniy ustoychivosti prirodno-tekhnogennykh kompleksov gorodskikh aglomeratsiy* [Role of the road network in sustainable development of the natural and anthropogenic systems of the cities]. *Geologiya, poiski i razvedka poleznykh iskopaemykh: sbornik izbrannykh trudov nauchno-*

- technicheskoy konferentsii* [Proc. Symp. Geology and geological prospecting]. Irkutsk, ISTU Publ., 2007, pp. 64–67.
14. Shenkman B.M., Sholokhov P.A., Shenkman I.B. Podtoplenie Irkutskaya gruntovymi vodami [Underflooding of Irkutsk]. *Geography and natural resources*, 2011, no. 2, pp. 54–61.
  15. Kevin R.G., John R.G. Chapter 19 – Natural and Anthropogenic Factors Affecting Groundwater in the Critical Zone of the Texas Triangle Megaregion. *Developments in Earth Surface Processes*, 2015, vol. 19, pp. 579–618.
  16. Hibbs B.J., Sharp J.M. Hydrogeological impact of the urbanization. *Environmental and engineering geoscience*, 2012, no. 18 (1), pp. 3–24.
  17. Susanne A.B., Bayer P., Menberg K., Jung S., Blum P. Spatial resolution of anthropogenic heat fluxes into urban aquifers. *Science of the Total Environment*, 2015, vol. 524–525, pp. 427–439.
  18. Grimmeisen F., Lehmann M.F., Liesch T., Goepfert N., Klingner J., Zopfi J., Goldscheider N. Isotopic constraints on water source mixing, network leakage and contamination in an urban groundwater system. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 583, pp. 202–213.
  19. *Generalniy plan zastoyki goroda Irkutsk* [Development master plan of Irkutsk]. 2016. Available at: <http://admirk.ru/pages/proekti-planir-territ-irkutsk.aspx> (accessed 20 December 2016).
  20. *SP 11–105–97 Inzhenernye izyskaniya dlya stroitelstva. Obshchie pravila i polozheniya* [Building regulations 11–105–97. Pre-building geotechnical survey. Common rules and regulations]. Moscow, PNIIS Publ., 1998. 48 p.
  21. *Elektronnaya entsiklopediya RosTeplo, Irkutsk* [Electronic encyclopedia of Russian heating supply, Irkutsk]. Available at: <http://www.rosteplo.ru/w/Иркутск> (accessed 15 December 2016).
  22. Popov V.K., Lukashevich O.D., Korobkin V.A., Zolotareva V.V., Galyamov Yu.Yu. *Ekologo-economichekieskie aspekty ekspluatatsii podzemnykh vod Ob-Tomskogo mezhdurechyia* [Ecological and economical aspects of using groundwater resources between the Ob and Tom rivers]. Tomsk, TGASU Publ., 2003. 174 p.
  23. Gattinoni P., Scesi L. The groundwater rise in the urban area of Milan (Italy) and its interactions with underground structures and infrastructures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, February, vol. 62, pp. 103–114.
  24. Akulova V.V., Grudinina M.I., Ryashchenko T.G., Demyanovich N.I. Geoecologicheskie problemy goroda Irkutsk [Geoecological problems of Irkutsk]. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 22–32.
  25. Faisal K. Zaidi, Yousef Nazzal, Izrar Ahmed, Muhammad Naem, Muhammad Kamran Jafri, Identification of potential artificial groundwater recharge zones in Northwestern Saudi Arabia using GIS and Boolean logic. *Journal of African Earth Sciences*, 2015, vol. 111, pp. 156–169.
  26. Zhenyao Shena, Xiaoshu Houa, Wen Li, Guzhanuer Aini, Lei Chena, Yongwei Gong Impact of landscape pattern at multiple spatial scales on water quality: A case study in a typical urbanised watershed in China. *Ecological Indicators*, 2015, vol. 48, pp. 417–427.
  27. Sangam S., Vishnu P.P. Chapter 1 – Groundwater as an Environmental Issue in Asian Cities. *Groundwater Environment in Asian Cities*, 2016, pp. 1–13.
  28. Aditya S., Shakir A., Suman K., Shashank S., Rao S.V.N. Chapter 5 – Groundwater Environment in Delhi, India. *Groundwater Environment in Asian Cities*, 2016, pp. 77–108.

Received: 31 August 2017.

#### Information about the authors

**Grigoriy S. Lonshakov**, post-graduate student, Irkutsk National Research Technical University.

**Larisa I. Auzina**, Cand. Sc., associate professor, Irkutsk National Research Technical University.

УДК 624.131

## О ПРИМЕНИМОСТИ СВЧ-ПЕЧЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТОВ

Крамаренко Виолетта Валентиновна<sup>1</sup>,  
kramarenko-v-v@mail.ru

Никитенков Алексей Николаевич<sup>1</sup>,  
nik@tpu.ru

Молоков Виктор Юрьевич<sup>1</sup>,  
vik3011347@yandex.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность.** Лабораторные и полевые методы определения влажности грунтов, повсеместно используемые в производственных организациях на территории РФ, принципиально не меняются уже много десятилетий, следствием чего являются их относительно высокая трудоемкость и энергозатратность. Вместе с тем в современных рыночных условиях возникает необходимость повышения скорости, качества и энергоэффективности определения физических характеристик грунтов.

**Цель работы:** изучение процесса сушки дисперсных грунтов в микроволновых печах при определении их влажности и разработка методики определения влажности грунтов при помощи сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения, применение которой на практике позволит решить задачи повышения ресурсоэффективности инженерно-геологических изысканий за счет снижения энерго- и трудоемкости лабораторных исследований и, как следствие, снижения их себестоимости.

**Объект исследований:** типичные для Западной Сибири грунты, отобранные на территории Томской области и Ханты-Мансийского автономного округа.

**Методы исследования:** метод определения влажности грунтов при помощи СВЧ-печей, а также анализ и обработка полученных результатов методами математической статистики, реализованными средствами программных продуктов MS Excel и Statistica.

**Результаты.** Рассмотрена возможность применения метода ускоренного определения влажности различных грунтов при помощи СВЧ-печей при инженерно-геологических изысканиях для проектирования, строительства, ремонта и реконструкции сооружений. Установлено, что разброс значений влажности дисперсных грунтов при сушке в СВЧ-печи в большинстве случаев не выше, чем при сушке в конвекционной. Подтверждено, что при сушке не происходит потеря органического вещества и связанной воды в грунтах, а также увеличения массы пробы, что повышает точность определений. Достоверность полученных результатов подтверждена методом сушки грунта до постоянной массы, в соответствии с требованиями действующих нормативных документов. Разработаны и опробованы методические рекомендации по определению влажности грунтов при их сушке в СВЧ-печи.

### Ключевые слова:

Грунт, влажность, метод СВЧ, инженерная геология, энергоэффективность.

### Введение

Одной из важнейших задач по обеспечению динамичного развития отечественной экономики является повышение ресурсоэффективности всех отраслей производства и, в частности, строительства, важнейшим этапом которого являются инженерно-геологические изыскания. В статье приводятся результаты исследования, позволяющие решить данную задачу путем сокращения времени испытаний и увеличения интенсивности полевых и лабораторных работ за счет ускоренной сушки грунта при подготовке к определению характеристик состава, физических и физико-механических свойств. В международной практике для определения влажности грунтов широко используются СВЧ-печи бытового назначения [1–8], что значительно сокращает время сушки, снижает стоимость испытаний и используемого оборудования. Таким образом, особый интерес представляет сравнительный анализ результатов определения влажности грунтов в микроволновых печах и сушильных шкафах в ракурсе требований отечественных стандартов по качеству определения данной характеристики.

В связи с вышесказанным целью данной работы являлось изучение процесса сушки дисперсных грунтов в микроволновых печах для определения их влажности. Задачи включали: обзор отечественных и зарубежных работ, посвященных методикам тестирования влажности грунтов; опробование и лабораторные испытания дисперсных грунтов для определения классификационных показателей состава и физических свойств, сопоставление результатов при сушке в микроволновой и конвекционной печах; выявление и анализ особенностей сушки грунтов для составления кратких рекомендаций по ускоренной методике определения влажности дисперсных грунтов в микроволновых печах.

### Методика исследования

Обзор литературных источников показал, что существует немало методов определения влаги в грунтах [1–70], но требования нормативных документов обязывают применять метод сушки грунтов до постоянной массы [24, 25, 27, 35]. Температуры сушки близки [38–64], начиная от  $100 \pm 5$  °C (GIS A 1203:2009), в интервале  $105$ – $110$  °C (AS

1289.2.1.1, ГОСТ 11305) до  $110 \pm 5$  °C (ASTM D2216, IS 27202– (1973) Reaffirmed 2010, BS EN ISO 178921–:2014. В мировой и отечественной практике для определения влажности применяются влагомеры, в том числе и нейтронные, инфракрасные лампы, песчаные бани, микроволновые печи, лабораторные нагревательные плиты, газовые горелки, денатурат, карбид кальция и многие другие приборы и вещества (BIS IS 2720-2, BIS IS 12175:1987 (R2002), KS I ISO 10573:2005, BCH 164–69, ASTM D 4959: 07, ASTM D 4944: 11, ASTM D 1558: 10, ASTM D 6938, PN ISO 10573:2001, AS 1289.5.8.71–998 (R2013), AS 1289.2.1.4-2.1.6). Из зарубежных исследований интерес представляют работы E.S. Berney IV, J.D. Kuzar, L.O. Oyelami [1, 20] с анализом наиболее распространенных тестов.

Согласно ГОСТ 5180 [35], для определения влажности проба грунта массой 15–50 г (15–20 г для гигроскопической влажности, 10–15 г для влажности на границе раскатывания, 15–30 г для влажности на границе текучести) сушится при температуре  $105 \pm 2$  °C в течение 5 ч, после чего грунты взвешиваются через 2 ч до получения разности масс при повторном взвешивании не более 0,02 г. Пески высушивают в течение 3 ч, последующие замеры производят в течение 1 ч. Засоленные и содержащие органику грунты рекомендуется сушить при более низких температурах. Согласно ASTM D2216, для уменьшения дегидратации гипса засоленных грунтов и разложения органики в торфах их рекомендуется сушить при 60 °C или при комнатной температуре в эксикаторе. Согласно ГОСТ 5180 [35], загипсованные грунты высушивают при температуре  $(80 \pm 2)$  °C в течение 8 ч. Тем не менее, для сушки органических грунтов стандарты рекомендуют те же (либо даже большие) температуры, что применяются для минеральных грунтов. Так, согласно ASTM D 2974–14 [12], влажность торфа определяется двумя методами: А) путем сушки при температуре  $110 \pm 5$  °C и В) путем удаления влаги в два этапа: сначала испарение при комнатной температуре и затем сушка в печи при  $110 \pm 5$  °C, если торф используется в качестве топлива. По ГОСТ 11305 [24], навеску торфа массой 5–10 г помещают в нагретый до температуры 105–110 °C сушильный шкаф и сушат в течение 2,5–4,0 ч, после чего взвешивают и после подсушивают в течение 30 мин. Если потеря не превышает 0,01 г, то испытание заканчивают. При ускоренном методе [24] навески торфа массой 5–6 г помещают в шкаф, нагретый до 165–170 °C, после чего сушат при 145–150 °C в течение 30 мин, а при влаге (отношении массы воды к исходной массе влажного торфа) более 55 % – 45 мин, (или при температуре 140–150 °C в двухламповом приборе). Для текущего учета допускается производить определение на одной навеске. По ГОСТ 19723 [27], навеску торфа массой 15–20 г сушат в течение 4,5 ч при 105 °C. Массу высушенной за час навески считают постоянной, если разность результатов при двух последовательных взвешиваниях не превышает 0,02 г.

После изучения рынка современного оборудования для определения влажности: влагомеров, анализаторов влажности зарубежных и отечественных производителей, невольно возникают вопросы о том, из чего складывается стоимость оборудования, а главное – насколько достоверные результаты дают предлагаемые методы сушки, и в какой степени результаты соответствует требованиям действующих нормативов.

Согласно исследованиям [7], наиболее экономичным методом определения влажности является применение СВЧ-печей, а микроволновое излучение является эффективным средством для быстрого высушивания грунтов. Процедуры, разработанные и используемые для просушивания грунтов с использованием микроволновой печи, эффективны, точны и безопасны [3]. СВЧ-излучатели были использованы еще в 1939 г. во время Второй Мировой войны для обнаружения самолетов. Тепловой эффект микроволн впервые был замечен офицерами британской армии, обнаружившими, что холодный кофе разогревался возле микроволнового радара [4]. Первый стандартный метод испытаний для определения влажности грунта с помощью микроволновой печи опубликовало в 1987 г. американское общество по испытанию материалов: ASTM D 4642–87, «Standard Test Method for Determination of Water Moisture Content of Soil by the Microwave Oven Method». Процедура сушки грунтов в микроволновой печи, согласно ASTM 4643–08 (ASTM 2008a) [13], также применяется для определения влажности. Навеска массой 100–200 г (для грунтов, содержащих до 10 % фракции более 2 мм) помещается на 3 мин в печь в режиме разморозки, затем взвешивается через 1 мин до тех пор, пока потери массы при повторном взвешивании не составят менее 0,1 %. Оптимальная мощность печи определяется экспериментальным путем. Начальное время сушки глинистых грунтов может быть увеличено до 12 мин. Влажность рассчитывается как отношение массы воды к массе сухого грунта с точностью до 0,1 %.

Согласно исследованиям [22], для большинства типов грунтов метод сушки с использованием СВЧ-печи дает результат с точностью 0,4 % влажности. В рассмотренных источниках использовались микроволновые печи мощностью 500–2000 Вт, при времени сушки от 10 до 15 мин. В другой работе [8] говорится, что разница в содержании влаги, полученной при сушке в обычной конвекционной печи и микроволновой печи (выходная мощность в 700 Вт), колеблется от 0,01 % (для песка) до 1,4 % (для глины с числом пластичности равным 53 %) при времени сушки от 10 до 24 мин. В работе [3] опробованы две процедуры определения влажности: в первом случае сушка в конвекционной и микроволновой печах продолжалась 30 ч и 15 мин соответственно, во втором – 24 ч и 35 мин. Было установлено, что обе процедуры отличаются полученными значениями содержания влаги, а требуемое время высыхания увеличивается с размером об-

разца и начальной величиной влажности. В работе [7] было установлено, что грунтам с высоким содержанием влаги требуется больше времени для микроволновой сушки. Так, при испытаниях использовалась СВЧ-печь с выходной мощностью 970 Вт и время сушки 20 мин. Сопоставимые результаты были получены и в работе [3], в которой была использована микроволновая печь с выходной мощностью в 700 Вт при времени сушки от 8 до 28 мин.

Как отмечают Т.Г. Макеева и Ю.М. Егоров: «СВЧ-поле воздействует на грунт на атомно-молекулярном уровне, производя диэлектрический нагрев. При этом в грунте происходит миграция влаги и фазовые переходы связанной воды в зависимости от структурно-текстурных особенностей грунта и молекулярно-структурных особенностей воды, а также параметров СВЧ поля и возникающих поляризационных явлений на границах при фазовых переходах связанной воды и воды переходного состояния» [70]. В источнике [69] отмечено, что при температурах от 100 до 400 °С в процессе обезвоживания монтмориллонит теряет 5–6 % химически связанной воды (2/3 всей влаги), каолин – 13 %. По данным работы А.В. Прохиной [68], рентгенофазовый анализ показал, что при обработке глины СВЧ-излучением значительных изменений в составе минералов не наблюдалось. Распределение по размерам частиц показало, что преимущественной фракцией в образцах необработанной глины являются частицы радиусом 5–10 мкм, а после обработки СВЧ-излучением преобладают частицы радиусом менее 0,01 мкм. Положительным моментом сушки образцов в СВЧ-печах является их равномерный разогрев [66], что выгодно отличает их от «классических» сушильных печей, в которых сушка образцов происходит от края поверхности к центру, в результате чего из-за плохой теплопроводности внутренняя часть образца не получает достаточного количества энергии для испарения воды. Также при температуре 100–160 °С в сушильных печах происходит потеря свободной или слабосвязанной воды. Согласно [28], для глинистых грунтов и грунтов, с включениями гипса, содержание связанной воды определяют при сушке образцов при температуре 105 °С до постоянной массы и при температуре 250 °С в течение 1–2 ч; а для грунтов, содержащих гипс, – при сушке образцов при температуре 65 и 180 °С до постоянной массы – таким образом, потери связанной воды в СВЧ-печах маловероятны. В завершении обзора работ по теме исследований отметим, что, несмотря на сложность и неоднозначность процесса сушки глин в СВЧ-печах, из них удаляется в основном свободная вода и, как уже отмечалось авторами, печи весьма эффективны при лабораторных испытаниях грунтов [5, 6, 66, 67]. Таким образом, разработка методики сушки дисперсных грунтов весьма актуальна. Для решения поставленных задач авторами исследованы типичные для Западной Сибири грунты, отобранные на территории Том-

ской области и ХМАО, объемом не менее 5–6 кг. В ходе испытаний были проанализированы пески разного гранулометрического состава: мелкой, средней крупности и гравелистые (табл. 1), торфа разной степени разложения, малозольные, древесной, травяной, моховой и травяно-моховой групп, глинистые грунты, а также заторфованные глины и суглинки. В соответствии с методиками [24–27, 33, 35], были определены: гранулометрический состав песков, влажность ( $w$ ), степень разложения торфов ( $D_{ap}$ ), содержание органики ( $I_o$ ) и влажность на границе раскатывания и текучести ( $w_L$  и  $w_p$ ) глинистых и органоминеральных грунтов. Основное оборудование и устройства, используемые в этом исследовании: шкаф сушильный ПСП-0.25-100, суховоздушный шкаф ПСВЛ-80-Касимов, микроволновая печь LG мощностью 900 Ватт, печь с регулируемыми уровнями мощности Wellton WMO-1700GW, муфельная печь МИМП-10 УЭ, весы с высокой точностью (до 0,001 грамма), фарфоровые чашки, чашки Петри и пластиковые контейнеры для микроволновой печи.

Основная цель эксперимента – сравнение результатов определения влажности, полученных разными способами сушки, при помощи статистических методов анализа согласно требованиями нормативных документов. По плану эксперимента количество испытаний минеральных грунтов определялось следующим образом: из каждого образца были взяты восемь равных долей – всего по 4 пробы для сушки в конвекционной и в микроволновой печах (средние и минимальные значения приведены в табл. 1), разной массы навесок в соответствии с методиками определения влажности [35]. Для возможности достоверного сопоставления результатов сушки в конвекционной и микроволновой печах каждая проба грунта делилась на две равных части. В соответствии с методиками [27, 35], для органических и органоминеральных грунтов из каждой части также отбирались от 4 до 8 параллельных навесок массой 15–50 г. Из сфагнового торфа были взяты навески по 5–10 г [24], по 15–20 г [24], а также более объемные пробы массой 100–200 г [13] с целью уменьшить разброс между параллельными определениями водонасыщенных образцов. Таким образом, число значений в выборках соответствовало требованиям ГОСТ 20522–2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. Сушка проводилась до получения разности масс грунта при двух последовательных взвешиваниях не более 0,02 г [35]. Время сушки образцов в конвекционной печи соответствовало требованиям нормативов [24, 27, 35]. Время испытаний в микроволновой печи определялось влажностью и массой образца и составляло от 10 до 30 мин для навески до 50 г и до 1,5 ч для навески в 100–200 г (при мощности излучения ~200 Вт). Интервалы между взвешиваниями подбирались эмпирически с учетом массы навески, влажности, площади испарения, а также инерционности процесса разогрева, следствием которого было суще-

ственное замедление процесса сушки при интервалах между взвешиваниями менее 1–2 мин. Первое взвешивание образца проводилось через интервал в 1–2 мин при массе навески до 50 г и через 3–7 мин при массе более 50 г.

### Обсуждение результатов

Полученные результаты приведены в табл. 1, динамика процесса сушки отражена на наиболее типичных графиках зависимости влажности от времени сушки (рис. 1). Анализ графиков показал, что для всех грунтов можно выделить три основных этапа процесса: I этап – начальный, со сравнительно пологим ходом графика вверх, на котором происходит разогрев содержащейся в образ-

це влаги с небольшим ускорением испарения; II этап – этап интенсивного испарения, когда происходит выход основного объема влаги из образца; III этап – завершающий процесс сушки, характеризуется относительно медленным испарением оставшейся свободной воды. Для всех образцов типично интенсивное испарение с самого начала сушки (большая часть проб, рис. 1, а, з–з), на которое приходится от 50 до 80 % времени испытания.

В программе Statistica была проведена обработка данных испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ 205222–012. Графически было проверено, что данные выборок каждого образца, связанных, несвязанных и органических грунтов и всех грунтов в целом распределены по нормальному за-

Таблица 1. Влажность грунтов

Table 1. Water (Moisture) content of the soil

№	Название грунта Soil name	Масса навески- Sample mass (г/г)	Влажность, % при сушке в печи/Water content, % drying in the oven					
			микроволновой/microwave			конвекционной/convection		
			средняя average	минимум minimum	максимум maximum	средняя average	минимум minimum	максимум maximum
1	Песок мелкий/Fine sand	5–20	4,4	4,3	4,7	3,9	3,7	4,1
2	Песок средней крупности/Medium (fine) sand		6,0	5,5	6,3	5,1	5,0	5,2
3	Песок гравелистый/Gravel with sand		5,3	5,2	5,4	5,4	5,3	5,6
4	Песок мелкий/Fine sand	15–50	4,4	4,3	4,5	4,2	3,9	4,6
5	Песок средней крупности/Medium (fine) sand		5,6	5,5	5,6	5,4	5,1	5,6
6	Песок гравелистый/Gravel with sand		5,3	5,2	5,4	5,4	5,3	5,6
7	Песок мелкий/Fine sand	100–300	4,4	4,3	4,6	4,5	4,1	4,8
8	Песок средней крупности/Medium (fine) sand		5,6	5,5	5,9	6,0	5,9	6,2
9	Песок гравелистый/Gravel with sand		5,1	5,0	5,1	5,2	5,2	5,3
10	Супесь/Silty clay	18–22	24,4	23,6	25,2	24,3	23,5	24,6
11		30–40	20	19,6	20,3	20	19,7	20,4
12		40–50	14,3	14,1	14,7	14,1	13,8	14,6
13	Суглинок/Lean clay	50	26,3	25,5	27,3	25	24,5	25,7
14		15	25,7	24,5	26,8	25,3	24,3	26,3
15		100	42	41	42	41	40	41
16		10	15,5	14,8	15,9	16,7	16,5	16,9
17		18–22	32	32	33	33	33	33
18			21,8	21,2	22,3	23,8	22,4	25,8
19			19,8	19,7	19,9	19,5	19,2	19,8
20			35	35	36	35	33	37
21			32	32	33	33	33	33
22		Глина/Clay	24,7	24,1	25,1	25,6	25,2	26
23	17,3		16,9	17,8	16,2	15,8	17	
24	58		56	60	29	58	61	
25	Суглинок текучепластичный слабозаторфованный Very soft slightly peaty loam	30	29	31	29	27	30	
26	Торф слаборазложившийся моховой Least decomposed moss peat low	100–200	3188	3125	3255	2761	2412	3327
27		15–20	2527	2253	2794	2816	2390	3003
28		5–10	2513	2200	2754	587	2250	3063
29	Торф среднеразложившийся травяной Hemic grass peat	15–50	609	603	617	416	574	598
30	Торф сильноразложившийся древесный Strongly decomposed woody peat		397	353	464	2447	369	485
31	Торф слаборазложившийся травяно-моховой Least decomposed grass-moss peat		2097	1925	2333	1762	2340	2506
32			1464	1443	1506	428	1465	1966
33	Торф сильноразложившийся древесно-травяной Strongly decomposed woody-grass peat		398	394	402	60	416	438

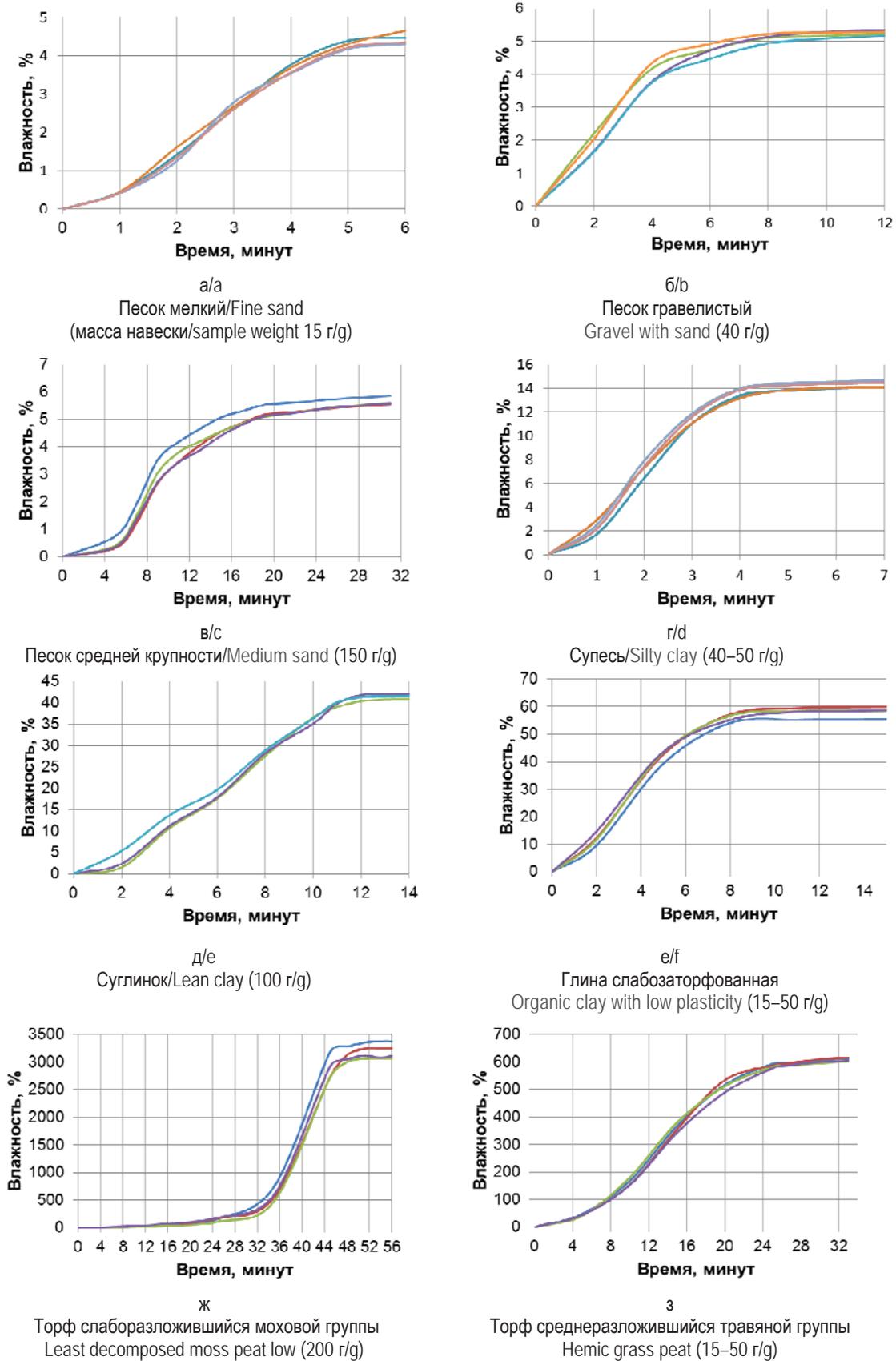


Рис. 1. Зависимость влажности грунтов от времени сушки

Fig. 1. Dependence of soil moisture on drying time

кону. В первую очередь проведено вычисление сравнительного коэффициента вариации для каждой выборки, в результате чего отбраковано несколько минимальных значений. Сравнение средних значений и среднеквадратических отклонений с доверительной вероятностью 0,95, полученных разными методами для одного грунта, показало возможность объединения данных в один расчетный геологический элемент и доказало его однородность по влажности. Затем, при доверительной вероятности 0,85 и 0,95 для выборок, включающих все полученные двумя рассматриваемыми методами результаты, были определены коэффициенты вариации, которые не превысили допустимое для физических характеристик значение ( $V < 0,15$ ). Таким образом, требования приведенного ГОСТ соблюдаются, и получаемые результаты могут быть использованы проектировщиками при расчетах оснований сооружений.

Если же рассматривать значения выборок с учетом более высоких требований нормативов, предъявляемых к параллельным определениям влажности, то нужно более детально рассмотреть полученные для разных грунтов результаты, сравнивая их с допустимой разницей параллельных определений.

**Пески.** Как видно из табл. 1, влажность песков получилась невысокой, что, в соответствии с нормативом [35], требует существенной точности – разница между параллельными определениями у образцов с влажностью до 5 % не должна превышать 0,2 %, и от 5 до 10 % – 0,6 %. Значения влажности мелкого песка при сушке в микроволновой печи в разных навесках практически не отличаются, также отмечен минимальный разброс значений у остальных разновидностей в навесках по 15–50 и 100–300 г. Наименее удачные результаты получены для песка мелкого, как в микроволновой (разница 0,2–0,4 %), так и в конвекционной печи (разница 0,4–0,7 %). Лучшие результаты получены для песка гравелистого – во всех случаях наблюдается полное соответствие нормативным требованиям. Необходимо отметить, что разница между средними значениями, полученными при сушке в разных печах для навесок по 15–50 и 100–300 г, вполне удовлетворяет требованиям нормативов, хотя у высушенных в сушильном шкафу образцов разница между параллельными замерами немного выше, а у мелких песков они не соответствуют нормам. Для всех проанализированных в СВЧ-печи разновидностей песка графики зависимости влажности от времени сушки (рис. 1 а–в) в целом имеют схожий характер, различаясь визуально в основном за счет варьирования промежутков времени между замерами веса. Ниже приведены типичные графики зависимости влажности от времени сушки для дисперсных грунтов.

**Глины.** Испытания проводились для всех разновидностей глинистых грунтов с близкой влажностью и с разной массой навесок; с разной влажностью и одинаковой массой (табл. 1); с влажно-

стью на границе раскатывания после прессования (табл. 1, № 16). После тестирования влажности при сушке в конвекционной и СВЧ-печи в подавляющем большинстве случаев разброс значений влажности соответствует требованиям нормативов к результатам параллельных определений показателя. Превышены допустимые диапазоны для образца № 14 (суглинок с естественной влажностью, навески массой в 15 г), что, по-видимому, свидетельствует о том, что для достоверности результата, применительно к данному типу грунтов, требуется увеличивать массу навески. В то же время для образца № 16 массой 10 г (после прессования для определения влажности на границе раскатывания) получен приемлемый разброс значений.

Для глинистых грунтов характерен длительный II этап сушки при коротком I этапе или полном его отсутствии. Характерно, что после начала сушки на образце образуется плотная сухая корка и дальнейшее испарение происходит через неё с сильным разогревом образца, поэтому для увеличения площади испарения целесообразны частые перемешивания.

**Торф и заторфованные грунты.** Среди особенностей процесса сушки органических и органоминеральных грунтов (табл. 1, рис. 1) необходимо отметить его длительность, обусловленную водонасыщенностью торфа. Максимальная влажность (1500–3000 % и более) отмечена у образцов слабо-разложившегося мохового и травяно-мохового торфа; средние значения порядка 400–600 % выявлены у сильно- и среднеразложившихся торфов древесной и травяной групп, минимальные значения порядка 25–70 % – у слабозаторфованных грунтов, что в целом типично для этих разновидностей. Соответственно, с ростом влажности растет разброс её значений. При увеличении массы навески от 5 до 20 г разброс получаемых значений влажности несколько уменьшился (табл. 1). При навеске в 100–200 г у мохового торфа (рис. 1, а) также отмечены значительные вариации значений параллельных определений. Увеличение объёма выборки до 8–10 проб также не улучшило итоговый результат.

В то же время исследованные разновидности органических и органоминеральных грунтов имеют свою специфику сушки. Так, для наиболее водонасыщенных слабо-разложившихся моховых и травяно-моховых торфов (рис. 1, ж) характерен длительный I этап разогрева влаги и быстрый II этап ее испарения. Для среднеразложившихся торфов древесной, травяной (рис. 1, з), древесно-травяной и травяно-моховой групп характерен более длительный II этап. Объясняется это тем, что большинство образцов имеет достаточно большую площадь испарения, которая обеспечивает хорошее проникновение микроволн. Одним из следствий этого является то, что процесс испытаний характеризуется более коротким по времени завершающим этапом сушки, в ходе которого оставшаяся влага удаляется сравнительно легко. Отдельно

следует выделить группу слабозаторфованных грунтов с относительно небольшой влажностью. Для них типично либо слабое выражение, либо практически полное отсутствие начального I этапа (рис. 1, e) за счет быстрого разогрева всего объема образца и начала интенсивного испарения уже на первых минутах проведения опыта, чему способствует относительно небольшая площадь поверхности испарения образцов, а также образование на них прочной корки, как и у глин. Следствием этого является их сильный разогрев, что накладывает ограничения на материал используемых контейнеров. В целом для них характерно, что на первые два этапа сушки приходится около половины времени испытаний, в течение которого испаряется до 90 % от начального объема влаги. На завершающий этап сушки уходит от 20 (для сильноувлажненных торфов) до 50 % времени (для органоминеральных грунтов).

Для органических и органоминеральных грунтов ускоренное определение влажности имеет особое значение, так как при повторном взвешивании образца по окончании опыта часто наблюдается увеличение его массы. При этом требуется отследить наименьшую массу, поскольку именно её согласно ГОСТ 5180 [35] принимают за конечный результат взвешивания. В проводимых испытаниях на завершающем этапе сушки увеличение массы не только у органических, но и у всех дисперсных грунтов (рис. 1) не наблюдалось.

Как было отмечено, в стандартах рекомендуется использовать более низкие температуры при сушке торфов, чтобы избежать потери органики. Чтобы выявить возможные потери массы грунта за счет сгорания органики в конвекционной и СВЧ-печах [10], проводился их контроль методами прокаливания согласно действующим нормативам [13, 18–20]. Гравиметрический метод определения органического вещества в торфяных почвах, согласно ГОСТ 26213 и ГОСТ 23784 [18, 19], основан на определении потери массы пробы после прокаливании при температуре  $525 \pm 25$  °С. Согласно ГОСТ 11306 [18], для торфяной продукции топливного назначения зольность определяют прокаливанием при температуре  $800 \pm 25$  °С, а для сельскохозяйственного и природоохранного назначения – при  $525 \pm 25$  °С. По ГОСТ 23740–2016 для голоценовых аквальных грунтов (органоминеральных и дисперсных связных минеральных) нужно установить температуру прокаливании до постоянной массы ( $350 \pm 10$ ) °С, для дисперсных связных и несвязных минеральных грунтов, по возрасту не относящихся к голоценовым, –  $450 \pm 10$  °С, в случае, если относительное содержание органического вещества превышает 10 %, следует установить температуру прокаливании до постоянной массы ( $525 \pm 25$ ) °С. Возникает резонный вопрос – определение возраста при изысканиях не предусмотрено нормативами – процедура дорога, не всегда достоверна и оправдана, так как не идет в расчеты. В соответствии с ASTM D 2974 [12], зольность опреде-

ляется сжиганием в муфельной печи: методом С – при температуре  $440 \pm 40$  °С и методом Д (для торфов, используемых в качестве топлива) при  $750 \pm 38$  °С. Разложение органического вещества приходится на диапазон между 229 и 579 °С, с максимумом  $300\text{--}400$  °С [19].

В итоге для прокаливании образцов были выбраны температуры: 800, 525 и 350 °С. Для испытаний были взяты также по 4 параллельных образца (табл. 2, средние значения для наглядности значения округлены до целых). Проведенные испытания показали хорошую сходимость результатов определения содержания органики после сушки, полученные двумя методами подготовки. Таким образом, можно утверждать, что потери органики при применении метода СВЧ такие же, как и при применении конвекционных печей (в 2–3 %).

Также следует отметить, что чем ниже температура, тем выше зольность и ниже содержание органики (табл. 2). В связи с этим возникает вопрос – почему ГОСТ 27740 рекомендует температуру прокаливании ( $350 \pm 10$ ) °С. В результате занижения содержания органики грунт неверно классифицируется, в дальнейшем неверно выбираются методики определения механических характеристик, неверно проводятся дальнейшие расчеты оснований, что может привести к катастрофическим последствиям для сооружения.

**Таблица 2.** Содержание органики в органических и органоминеральных грунтах

**Table 2.** Content of organic matter in organic and organomineral soils

Наименование грунта Soil name	Содержание органики $I_r$ , % после сушки Content of organic matter $I_r$ , % after drying in					
	в конвекционной печи convection oven			в СВЧ-печи microwave oven		
	°C					
	800	525	350	800	525	350
Торф слаборазложившийся моховой группы Least decomposed moss peat	96	94	91	95	91	90
Торф сильноразложившийся древесной группы Strongly decomposed woody peat	90	92	85	90	92	87
Суглинок текучепластичный слабозаторфованный Very soft slightly peaty loam	14	13	12	16	14	13

Чтобы наглядно продемонстрировать влияние на скорость сушки образца таких параметров эксперимента, как влажность грунта и масса навески, были рассмотрены образцы связных минеральных грунтов (табл. 1), для которых построены графики зависимости средних значений массы, содержания воды и влажности от времени сушки образцов (рис. 2). На графиках представлены результаты по средним значениям для 16 образцов грунта, общая

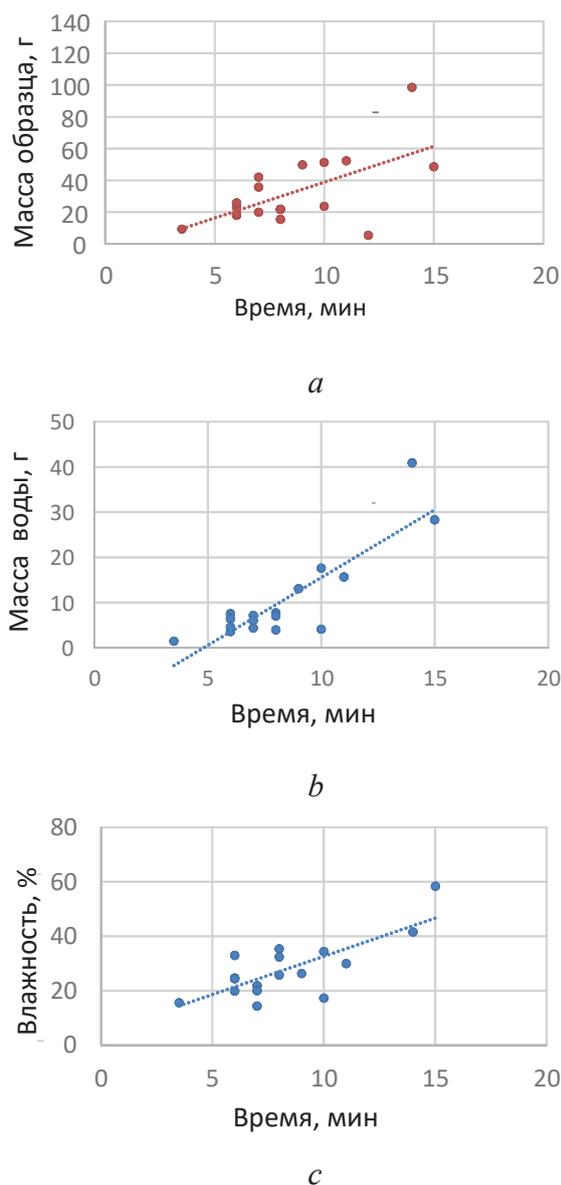


Рис. 2. Зависимости массы образца (а), массы воды (b) и влажности (с) от времени сушки

Fig. 2. Dependences of mass of the sample (a), water mass (b) and moisture (c) on drying time

выборка – 64 пробы. Для того чтобы математически охарактеризовать полученные эмпирические зависимости, был привлечен корреляционный анализ. Он показал, что наибольший коэффициент корреляции 0,86 характеризует зависимость массы воды в образце от времени сушки (при  $\alpha=0,05$  доверительный интервал для него составляет 0,79–0,91). Заметно меньшие коэффициенты (0,76 и 0,77, соответственно, при доверительных интервалах 0,65–0,85 и 0,64–0,85) характеризуют зависимости скорости сушки от влажности и массы навески грунта. Таким образом, для конкретного вида грунта скорость сушки определяется количеством жидкости в пробе. Физически это объясняется тем, что процесс сушки определяется, прежде

всего, поглощенной микроволновой энергией, расходуемой на разогрев жидкости, и в несколько меньшей степени зависит от состава и структурных особенностей самого образца, которые косвенно характеризуются исходной массой и влажностью. Так как количество жидкости в связных и несвязных грунтах значительно отличается, это выражается во времени, затраченном на разные этапы сушки.

Указание на необходимость учёта этих особенностей должно быть приведено в рекомендациях по проведению испытаний грунтов в СВЧ-печах.

#### Заключение

Результаты исследований показали, что разброс значений влажности грунтов при сушке в микроволновой печи в большинстве случаев не выше, чем при сушке в конвекционной (табл. 1, рис. 1). Если у минеральных грунтов – как песчаных, так и глинистых, отмечается небольшой разброс влажности, то многолетняя практика работы с торфами неосушенных залежей показала, что добиться таких же результатов для них не просто. В обоих случаях разброс значений не соответствует требованиям нормативов к результатам параллельных определений показателя (допустимая разница при влажности более 100 % составляет 5 % [35], влаги – 1 % [24]). Вариации значений объясняются неоднородностью состава грунта, неравномерностью распределения органических остатков и минеральных включений, содержанием гумуса, разной степенью волокнистости, а главное – различной впитывающей и водоудерживающей способностью остатков растений-торфообразователей. Необходимо отметить, что довольно сложно проводить опробование на неосушенных торфяных массивах, также проблематична транспортировка проб с сохранением их исходного состояния, а потери влаги при этих процедурах существенно превышают допустимую разницу параллельных определений. Поэтому целесообразнее определять показатели физических свойств по одной навеске [27], увеличив количество отбираемых образцов с каждого инженерно-геологического элемента, представленного специфическим грунтом, до 15–20 штук.

Также, на основе результатов исследований и полученного в ходе проведения испытаний опыта, следует предложить ряд рекомендаций по определению влажности данным методом:

**1. Техническое ограничение применения СВЧ.** Образцы испытываемых грунтов должны иметь низкое содержание электропроводящих рудных минералов и не содержать значительные количества ионов солей, растворенных в поровой воде. Необходимо отметить, что для грунтов с континентальным или морским типом засоления этот метод может дать недостоверные значения влажности и требуются дополнительные исследования. В условиях сушки образцов со сравнительно небольшим содержанием влаги (к которым относятся и пески) микроволно-

вую печь нужно эксплуатировать на пониженной мощности, чтобы не допускать её перегрева.

**2. Посуда.** Применение микроволновой печи исключает использование металлической посуды, непроницаемой для микроволн и способной привести к короткому замыканию и поломке СВЧ-генератора. Посуда из дерева может самовозгораться, из стекла – трескается от больших и быстрых перепадов температур и бьется. Для сушки сильноразложившихся торфов, органических высокозолевых, органоминеральных, глинистых грунтов и пылеватых песков рекомендуется использовать фарфоровые или керамические контейнеры, выдерживающие сильные перепады температур. Пластиковая посуда для них не пригодна, поскольку за счет сильного разогрева на завершающих этапах сушки она начинает плавиться. Для слаборазложившихся водонасыщенных торфов и не пылеватых песков подходят бытовые пластиковые контейнеры. При установке мощности печи более 200 Вт рекомендуется использовать исключительно фарфоровую посуду.

Из методических рекомендаций хотелось бы акцентировать внимание на следующем:

**1. Оптимальная мощность нагрева печи.** Мощность определяется в ходе предварительных испытаний для каждого прибора и для каждой разновидности грунта индивидуально. В ходе предварительной серии испытаний было установлено, что оптимальная мощность нагрева при испытаниях песков составляет порядка 640 Вт, что позволяет поддерживать необходимую скорость сушки и не допускать перегрева образцов и используемой в ходе опытов посуды.

Для сушки глинистых и органических грунтов оптимальная мощность составляет 200–500 Вт, а для небольших навесок рекомендуется меньшая мощность, чтобы соблюдать баланс между оптимальной скоростью сушки и нагревом образцов.

**2. Оптимальная масса навесок для определения влажности.** Для песков рекомендуется масса навески в интервале 50–200 г, что позволит получить более точные результаты для маловлажных грунтов. Для глинистых грунтов в естественном состоянии рекомендуется навески массой от 15 до 50 г, что соответствует действующим нормативам. Для определения влажности глин твердой и полутвердой консистенции, а также влажности на границе раскатывания (полученной, в том числе и методом прессования) рекомендуются навески в 5–15 г, что дает достаточно высокую точность результатов, так как грунт содержит мало влаги, сохнет быстро, разброс значений минимален. Для органических грунтов оптимальная масса навески определяется исходной водонасыщенностью грунта и находится в интервале от 15–50 г для средне-, сильноразложившихся торфов и заторфованных грунтов; навески массой до 100–200 г рекомендуются для верховых слаборазложившихся торфов моховой группы (фускум-, ангустифолиум-, магелланикум-торфа), торфов с крупными во-

локнами остатков растений-торфообразователей или торфов разной степени волокнистости. Для уменьшения разброса значений влажности желательно соблюдать баланс между массой грунта и числом проб в печи. В случае анализа средне- и сильноразложившихся торфов и заторфованных грунтов рекомендуются образцы массой 15–50 г с числом проб от 3 до 6 штук в одну загрузку печи. Для слаборазложившихся водонасыщенных торфов рекомендуется использовать навески массой более 100 г при числе проб не более 2–3 штук. Большие объемы водонасыщенного грунта будут требовать больше времени для сушки, что приведет к ненужному расходу энергии, поэтому при массовых определениях влажности целесообразнее применять ускоренный метод согласно [24].

**3. Рекомендуемое время сушки и повторных интервалов взвешивания.**

В результате исследований установлено, что время испытаний в микроволновой печи в первую очередь определяется массой содержащейся в образце воды, а также массой самого образца и составляет до 10 мин для навески порядка 15 г; 15–20 мин для навески в 30–50 г и порядка 30 мин для навески ~150 г при мощности порядка 700–800 Вт. Рекомендации применительно к отдельным подвидам грунтов в обобщенном виде представлены в табл. 3.

**Таблица 3.** Оптимальные параметры сушки дисперсных грунтов

**Table 3.** Optimum parameters of drying fine-grained soils

Подвиды грунтов Subtypes of soils	Масса навески, г Sample weight, g	Время сушки, мин Drying time, min	Интервалы повторных взвешиваний, мин Intervals of repeated weighting, min
Пески/Sands	50–200	5–25	
Глины и заторфованные грунты Clay and peaty soils	50–100	10–15 и более, при $w > 40–50\%$ 10–15 and more, if $w > 40–50\%$	1–2
Торфы/Peat	100–200	30–40	
	30–50	10–15	
	5–10	3–5	

**4. Ускорение процесса сушки грунтов.** Интенсифицировать процесс сушки позволит увеличение площади испарения испытываемых образцов, для чего их нужно укладывать тонким слоем и наносить на поверхность бороздки ножом или шпателем, а также перемешивать при повторных взвешиваниях.

Таким образом, результаты исследования подтвердили, что бытовые микроволновые печи являются эффективным средством для быстрого определения влажности разных грунтов, поскольку тестирование проводится быстрее и полученные данные не менее точны, чем при использовании сушильных шкафов. Прокаливание органических грунтов при разных температурах после тестирования на влажность показало, что потери органи-

ки также сопоставимы, что делает сушку в СВЧ более подходящей при небольших объёмах. Положительным и важнейшим результатом работы является доказательство того, что при сушке в СВЧ-печи вес образца не увеличивался при повторных взвешиваниях (рис. 1), что повышает точность определения влажности, не занижая её значений. Авторы надеются, что предложенные рекомендации позволят шире использовать недорогую техни-

ку как в полевых, так и в лабораторных условиях и, возможно, включить методику [13] в актуализированную версию ГОСТ 5180, а также ввести в стандарты дополнительные методы определения влажности.

*Исследование выполнено в Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета (средства ВИУ).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berney E., Kyzar J., Oyelami L. Device comparison for determining field soil moisture content // U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Geotechnical and Structures Laboratory. – 2011. URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a552792.pdf> (дата обращения 08.08.2017).
2. Gilbert P. Evaluation of soil mechanics laboratory equipment. – Vicksburg: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1974. – Report 13. 2.
3. Hagerty D., Ullrich C., Denton M. Microwave Drying of Soils // Geotechnical Testing Journal. – 1990. – V. 13. – № 2. – P. 138–141.
4. He X.Y. Theory and application of microwaves. – Taipei: Science Monthly and King-Taiwan Information Technology Inc., 1994. – V. 292. – 4 p.
5. Determination of water content in clay and organic soil using microwave oven / V.V. Kramarenko, A.N., Nikitenkov I.A. Matveenko, V.Yu. Molokov, Ye.S. Vasilenko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 43 (1). – Art. no. 012029.
6. Application of microwave method for moisture determination of organic and organic-mineral soils / V.V. Kramarenko, A.N. Nikitenkov, V.Yu. Molokov, A.V. Shramok, G.P. Pozdeeva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 33 (1). – Art. no. 012040.
7. Lade P., Nejadi-Babadai H. Soil Drying by Microwave Oven // Soil Specimen Preparation for Laboratory Testing. – Philadelphia: ASTM, 1975. – P. 320–340.
8. Miller R.J. et al. Soil water content microwave oven method // Soil Science Society of America Proceedings. – 1974. – V. 38. – № 3. – P. 535–537.
9. ASTM D 1558–10. Standard Test Method for Moisture Content Penetration Resistance Relationships of Fine-Grained Soils. ASTM International: West Conshohocken, PA. – 2010. URL: <https://www.astm.org/Standards/D1558.htm> (дата обращения 08.08.2017).
10. ASTM D 2216–10. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. ASTM International: West Conshohocken, PA. – 2010. URL: <https://www.astm.org/Standards/D2216.htm> (дата обращения 08.08.2017).
11. ASTM D 2922–6. Standard Tests Methods for Density of Soil and Soil-Aggregate in Place by Nuclear Methods (Shallow Depth). ASTM International: West Conshohocken, PA. – 1996. URL: <https://www.astm.org/Standards/D2922.htm> (дата обращения 08.08.2017).
12. ASTM D 2974–14 Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils. ASTM International: West Conshohocken, PA. – 2014. URL: <https://www.astm.org/Standards/D2974.htm> (дата обращения 08.08.2017).
13. ASTM D 4643–08. Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Microwave Oven Heating. ASTM International: West Conshohocken, PA. – 2008. URL: <https://www.astm.org/Standards/D4643.htm> (дата обращения 08.08.2017).
14. ASTM D 4718–87(2007). Standard Practice for Correction of Unit Weight and Water Content for Soils Containing Oversize Particles. ASTM International: West Conshohocken, PA. – 2007. URL: <https://www.astm.org/Standards/D4718.htm> (дата обращения 08.08.2017).
15. ASTM D 4944–11. Standard Test Method for Field Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Calcium Carbide Gas Pressure Tester. ASTM International: West Conshohocken, PA. – 2011. URL: <https://www.astm.org/Standards/D4944.htm> (дата обращения 08.08.2017).
16. ASTM D 4959–07. Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Direct Heating hotplate, stove, blowtorch. ASTM International: West Conshohocken, PA. – 2007. URL: <https://www.astm.org/Standards/D4959.htm> (дата обращения 08.08.2017).
17. ASTM D 425–88(2008) Standard Test Method for Centrifuge Moisture Equivalent of Soils. ASTM International: West Conshohocken, PA. – 2008. URL: <https://www.astm.org/Standards/D425.htm> (дата обращения 08.08.2017).
18. ASTM D 6938–10 Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depth). ASTM International: West Conshohocken, PA. – 2010. URL: <https://www.astm.org/Standards/D6938.htm> (дата обращения 08.08.2017).
19. Marcos E., Tarrega R., Luis E. Changes in a humic cambisol heated (100–500 °C) under laboratory conditions: the significance of heating time // Geoderma. – 2007. – V. 138. – P. 237–243.
20. Berney I. et al. Non-Nuclear Alternatives to Monitoring Moisture-Density Response in Soils // US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Geotechnical and Structures Laboratory – 2013. URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a583071.pdf> (дата обращения: 08.08.2017).
21. Chung Ph.W.K., Ho T.Y.K. Study on the determination of moisture content of soils by microwave oven method // Geo Report no. 221. – 2008. URL: [http://www.cedd.gov.hk/eng/publications/geo\\_reports/doc/er221/er221links.pdf](http://www.cedd.gov.hk/eng/publications/geo_reports/doc/er221/er221links.pdf) (дата обращения 08.08.2017).
22. Ryley M.D. The use of microwave oven for the rapid determination of moisture content of soils // An annotated bibliography on microwaves. – Cambridge: MITPress, 1969. – 356 p.
23. ВСН 164–69 Технические указания по устройству дорожных оснований из обломочных материалов, укрепленных цементом глины. – М.: Минтрансстрой, 1970. – 48 с.
24. ГОСТ 11305–2013. Торф и продукты его переработки. Методы определения влаги. – М.: Стандартинформ, 2014. – 12 с.
25. ГОСТ 11306–2013. Торф и продукты его переработки. Методы определения зольности. – М.: Стандартинформ, 2014. – 7 с.
26. ГОСТ 12536–2014. Методы лабораторного определения гранулометрического и микроагрегатного состава. – М.: Стандартинформ, 2015. – 19 с.
27. ГОСТ 19723–74. Торф. Метод определения содержания влаги в залежи. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 15 с.
28. ГОСТ 23061–2012. Грунты. Методы радиоизотопных измерений плотности и влажности. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
29. ГОСТ 25100–2011. Грунты. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2013. – 39 с.

30. ГОСТ 26213–91. Почвы. Методы определения органического вещества. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 7 с.
31. ГОСТ 27740–2016. Грунты. Методы лабораторного определения содержания органических веществ. – М.: Стандартинформ, 2017. – 10 с.
32. ГОСТ 27784–88. Почвы. Метод определения зольности торфяных и оторфованных горизонтов почв. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 5 с.
33. ГОСТ 30416–2012. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2013. – 12 с.
34. ГОСТ 30672–2012. Грунты. Полевые испытания. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2013. – 7 с.
35. ГОСТ 5180–2015. Грунты методы лабораторного определения физических характеристик. – М.: Стандартинформ, 2016. – 20 с.
36. JIS A 1203:2009 Test Method For Water Content Of Soils Japanese Standards Association). – Japan: Japanese Industrial Standard Association, 2009. – 6 п.
37. AS 1289.2.1.1 Soil moisture content tests – Determination of the moisture content of a soil – Oven drying method (standard method). – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2005. – 3 п.
38. IS 27202–(1973) Methods of test for soils. Part 2: Determination of water content. URL: <https://archive.org/details/gov.in.is.2720.2.1973> (дата обращения: 08.08.2017).
39. BS EN ISO 178921–:2014. Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Determination of water content. – London, British Standards Institution, 2014. – 22 п.
40. AS 1289.2.1.4 Soil moisture content tests – Determination of the moisture content of a soil – Microwave-oven drying method (subsidiary method). – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2005. – 3 п.
41. AS 1289.2.1.5 Soil moisture content tests – Determination of the moisture content of a soil – Infrared lights method (subsidiary method). – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2005. – 3 п.
42. AS 1289.2.1.6 Soil moisture content tests – Determination of the moisture content of a soil – Hotplate drying method. – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2005. – 3 п.
43. AS 1289.2.3.1 Soil moisture content tests – Establishment of correlation – Subsidiary method and the standard method. – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2005. – 3 п.
44. AS 1289.3.1.1 Soil classification tests – Determination of the liquid limit of a soil – Four point Casagrande method. – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2005. – 3 п.
45. AS 1289.B3.1 Soil moisture content tests – Establishment of correlation, between a subsidiary method of moisture content determination and the standard method AS 1289.2.1.1. – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2005. – 3 п.
46. ISO 17319:2015 Fertilizers and soil conditioners – Determination of water-soluble potassium content – Potassium tetraphenylborate gravimetric method. International Organization for Standardization. URL: <https://www.iso.org/standard/59569.html> (дата обращения: 08.08.2017).
47. ISO 178921–2014 Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 1: Determination of water content. International Organization for Standardization. URL: <https://www.iso.org/standard/55243.html> (дата обращения: 08.08.2017).
48. JGS 0122. Test method for water content of soils by the microwave oven. – Akomoto: Japanese Standards Association, 2017. – 300 п.
49. KS F 2306:2000 Test method for water content of soils. – Seoul: Korean Standards Association, 2000. – 4 п.
50. KS I ISO 10573:2005 Soil quality – Determination of water content in the unsaturated zone (Neutron depth probe method). – Seoul: Korean Standards Association, 2003. – 13 п.
51. KS I ISO 11461:2005 Soil quality – Determination of soil water content calculated on a volume basis (Gravimetric method). – Seoul: Korean Standards Association, 2003. – 5 п.
52. KS I ISO 11465:2005 Soil quality – Determination of dry matter and water content on a mass basis – Gravimetric method. – Seoul: Korean Standards Association, 2005. – 4 п.
53. BIS IS 12175:1987 (R2002). Specification for Rapid Moisture Meter for Rapid Determination of Water Content for Soil. Bureau of Indian Standard. URL: <https://archive.org/details/gov.in.is.12175.1987> (дата обращения: 08.08.2017).
54. AS 1289.5.8.71–998 (R2013). Methods of testing soils for engineering purposes – Soil compaction and density tests – Nuclear surface moisture-density gauges – Water content of a standard moisture block using hydrogen content of components. – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 1998. – 8 п.
55. BIS IS 27202–:2013. Methods of Test for Soils – Part 2: Determination of Water Content. Bureau of Indian Standard. URL: <https://archive.org/details/gov.in.is.2720.2.1973> (дата обращения: 08.08.2017).
56. PN ISO 10573:2001. Soil Quality – Determination of Water Content in the Unsaturated Zone – Neutron Depth Probe Method. Polish Committee for Standardization. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10573:ed-1:v1:en:sc:ec> (дата обращения: 08.08.2017).
57. PN ISO 11465:1999. Soil Quality – Determination of Dry Matter and Water Content on a Mass Basis – Gravimetric Method. Polish Committee for Standardization. URL: <https://www.iso.org/standard/20886.html> (дата обращения: 08.08.2017).
58. PKN CEN ISO/TS 178921–:2009. Geotechnical Investigation and Testing – Laboratory Testing of Soil – Part 1: Determination of Water Content. Polish Committee for Standardization. URL: <https://www.iso.org/standard/55243.html> (дата обращения: 08.08.2017).
59. GB/T 14506.12–010. Methods for chemical analysis of silicate rocks – Part 1: Determination of hygroscopic water content. – Beijing: Standardization Administration of China, 2010. – 8 п.
60. GB/T 14506.22–010 Methods for chemical analysis of silicate rocks – Part 2: Determination of combined water content. – Beijing: Standardization Administration of China, 2010. – 8 п.
61. BIS IS 13030:1991 (R2006) Method of Test for Laboratory Determination of Water Content, Porosity, Density and Related Properties of Rock Material. Bureau of Indian Standard. URL: <http://www.questin.org/is-code/is-130301-991-method-test-laboratory-determination-water-content-porosity-density-and-related-properties-rock-material> (дата обращения: 08.08.2017).
62. NFP 94 4101–2001 Rock – Test for Physical Properties of Rock. Part 1: Determination of Water Content of Rock – Oven-drying Method. – Paris: Association Francaise de Normalisation, 2001. – 6 п.
63. O’Kelly B., Sivakumar V. Water Content Determinations for Peat and Other Organic Soils Using the Oven-Drying Method // Drying Technology. – 2014. – V. 32. – № 6. – P. 631–643.
64. BS EN 13041:2011 Soil improvers and growing media. Determination of physical properties. Dry bulk density, air volume, water volume, shrinkage value and total pore space. – London, British Standards Institution, 2011. – 30 п.
65. Давлетбаков Р.Р. Влияние дисперсности частиц и СВЧ-излучения на прочность кремнеземистой керамики // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всерос. науч.-метод. конф. – Оренбург, 29–31 января 2014. – Оренбург: Оренбург. гос. ун-т, 2014. – С. 1331–1335.
66. Крамаренко В.В., Никитенков А.Н., Молоков В.Ю. О применимости СВЧ-метода для определения влажности песчаных грунтов // Современные проблемы науки и образования. – 2015 – № 1. – С. 1–12. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=18451> (дата обращения: 06.08.2017).
67. Крамаренко В.В., Никитенков А.Н., Молоков В.Ю. О применении микроволновых печей для определения влажности органических и органоминеральных грунтов // Современные про-

- блемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Евразии: материалы Всероссийской конференции с международным участием. – Томск, 23–27 ноября 2015. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – С. 338–343.
68. Прохина А.В., Шаповалов Н.А., Латыпова М.М. Модификация поверхности глинистых минералов с высоким содержанием монтмориллонита в электромагнитном поле высокой частоты // Современные наукоемкие технологии. – 2011. – № 1. – С. 135–136.
69. Строительная керамика / под ред. В.Т. Станевич. – Павлодар: Кереку, 2008. – 96 с.
70. Макеева Т.Г., Егоров Ю.М. Экспериментальное наблюдение фазового перехода связанной воды I рода подобного II в моно- и полиминеральных глинистых грунтах // Глины, глинистые минералы и слоистые материалы: Материалы I Российского рабочего совещания, посвященного 90-летию со дня рождения Б.Б. Звягина. 2-е издание. – М., ИГЕМ РАН, 2011. – 161 с.

*Поступила 28.08.2017 г.*

#### **Информация об авторах**

**Крамаренко В.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Никитенков А.Н.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Молоков В.Ю.**, старший лаборант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 624.131

## APPLICATION OF MICROWAVE METHOD FOR DETERMINING SOIL MOISTURE

Violetta V. Kramarenko<sup>1</sup>,

kramarenko-v-v@mail.ru

Alexey N. Nikitenkov<sup>1</sup>,

nik@tpu.ru

Victor Yu. Molokov<sup>1</sup>,

vik3011347@yandex.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance.** Laboratory and field methods for determining soil moisture, commonly used in manufacturing organizations in Russia, have not changed essentially for many decades, resulting in their relatively high complexity and energy consumption. However, in current market conditions there is a need to improve the speed, quality and efficiency in determining soil physical characteristics.

**The main aim** was to study the drying process of dispersed soils in microwave ovens while determining their moisture content and to develop a methodology for determining soil moisture using microwave radiation. The application of the method in practice will solve the problems of increasing the resource efficiency of engineering and geological surveys by decreasing the energy and labor intensity of laboratory research, and, as a result, cost reduction.

**Object of research:** soils typical for Western Siberia, picked on the territory of the Tomsk region and the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug.

**Research methods** include a method for determining soil moisture using microwave ovens, as well as by analyzing the results using MS Excel and Statistica.

**Results.** The paper considers the possibility of using the method of accelerated determination of moisture of various soils with the help of microwave ovens at engineering and geological surveys for design, construction, repair and reconstruction of structures. It was found that spread of moisture values of the dispersed soils during drying in a microwave oven is in most cases not higher than when drying in a convection oven. It was confirmed that during drying no loss of organic matter in the ground occurs, as well as there is no growth in sample mass that increases the accuracy of determinations. The reliability of the confirmed test results was confirmed by the method of drying the soil to constant weight, in accordance with the requirements of the current regulatory documents. The authors have developed and tested the methodological recommendations for determining soil moisture when they are dried in a microwave oven.

**Key words:**

Soil, moisture, microwave method, engineering geology, energy efficiency.

The research was carried out at Tomsk Polytechnic University within the Competitiveness Enhancement Program of Tomsk Polytechnic University (VIU funds).

## REFERENCES

- Berney E., Kyzar J., Oyelami L. *Device comparison for determining field soil moisture content*. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Geotechnical and Structures Laboratory, 2011. Available at: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a552792.pdf> (accessed: 08 August 2017).
- Gilbert P. *Evaluation of soil mechanics laboratory equipment*. Vicksburg, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1974. Report 13.
- Hagerty D., Ullrich C., Denton M. Microwave Drying of Soils // *Geotechnical Testing Journal*, 1990, vol. 13, no. 2, pp. 138–141.
- He X.Y. *Theory and application of microwaves*. Taipei, Science Monthly and King-Taiwan Information Technology Inc., 1994. Vol. 292.
- Kramarenko V.V., Nikitenkov A.N., Matveenko I.A., Molokov V.Yu., Vasilenko Ye.S. Determination of water content in clay and organic soil using microwave oven. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43 (1), art. no. 012029.
- Kramarenko V.V., Nikitenkov A.N., Molokov V.Yu., Shramok A.V., Pozdeeva G.P. Application of microwave method for moisture determination of organic and organic-mineral soils. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33 (1), art. no. 012040.
- Lade P., Nejadi-Babadai H. Soil Drying by Microwave Oven. *Soil Specimen Preparation for Laboratory Testing*. Philadelphia, ASTM, 1975. Vol. 599, pp. 320–335.
- Miller R.J. Soil water content microwave oven method. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1974, vol. 38, no. 3, pp. 535–537.
- ASTM D 1558–10. *Standard Test Method for Moisture Content Penetration Resistance Relationships of Fine-Grained Soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2010. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D1558.htm> (accessed: 08 August 2017).
- ASTM D 2216–10. *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2010. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D2216.htm> (accessed: 08 August 2017).
- ASTM D 2922–6. *Standard Test Methods for Density of Soil and Soil-Aggregate in Place by Nuclear Methods (Shallow Depth)*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 1996. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D2922.htm> (accessed: 08 August 2017).
- ASTM D 2974–14 *Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2014. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D2974.htm> (accessed: 08 August 2017).

13. ASTM D 4643–08. *Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Microwave Oven Heating*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2008. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D4643.htm> (accessed: 08 August 2017).
14. ASTM D 4718–87(2007). *Standard Practice for Correction of Unit Weight and Water Content for Soils Containing Oversize Particles*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2007. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D4718.htm> (accessed: 08 August 2017).
15. ASTM D 4944–11. *Standard Test Method for Field Determination of Water (Moisture) Content of Soil By The Calcium Carbide Gas Pressure Tester*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2011. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D4944.htm> (accessed: 08 August 2017).
16. ASTM D 4959–07. *Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Direct Heating hotplate, stove, blowtorch*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2007. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D4959.htm> (accessed: 08 August 2017).
17. ASTM D 425–88(2008) *Standard Test Method for Centrifuge Moisture Equivalent of Soils*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2008. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D425.htm> (accessed: 08 August 2017).
18. ASTM D 6938–10 *Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depth)*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2010. Available at: <https://www.astm.org/Standards/D6938.htm> (accessed: 08 August 2017).
19. Marcos E., Tarrega R., Luis E. Changes in a humic cambisol heated (100–500 °C) under laboratory conditions: the significance of heating time. *Geoderma*, 2007, vol. 138, pp. 237–243.
20. Berney I. *Non-Nuclear Alternatives to Monitoring Moisture-Density Response in Soils*. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Geotechnical and Structures Laboratory. 2013. Available at: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a583071.pdf> (accessed: 08 August 2017).
21. Chung Ph.W.K., Ho T.Y.K. *Study on the determination of moisture content of soils by microwave oven method*. 2008. Available at: [http://www.cedd.gov.hk/eng/publications/geo\\_reports/geo\\_rpt221.html](http://www.cedd.gov.hk/eng/publications/geo_reports/geo_rpt221.html) (accessed: 08 August 2017).
22. Ryley M.D. The use of microwave oven for the rapid determination of moisture content of soils. *An annotated bibliography on microwaves*. Cambridge, MIT Press, 1969. 356 p.
23. VSN 164–69 *Tekhnicheskie ukazaniya po ustroystvu dorozhnykh osnovanii osnovaniy iz oblomochnykh materialov, ukreplennykh tsementom glin* [Departmental building standards 1646–9. Technical guidance on the installation of road foundations of elastic materials, reinforced cement clays]. Moscow, Mintransstroy Publ., 1970. 48 p.
24. GOST 11305–2013. *Torf. Metody opredeleniya vlagi* [Peat and products of its processing. Methods for determination of moisture]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 12 p.
25. GOST 11306–2013. *Torf i produkty ego pererabotki. Metody opredeleniya zolnosti* [Peat and products of its processing. Methods for the determination of ash content]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 7 p.
26. GOST 12536–2014. *Metody laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo i mikroagregatnogo sostava* [Methods of laboratory determination of granulometric composition and microaggregates]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 19 p.
27. GOST 19723–74. *Torf. Metod opredeleniya sodержaniya vlagi v zalezhi* [Peat. The method of determining the moisture content of the deposits]. Moscow, Publishing house of standards, 1974. 15 p.
28. GOST 23061–2012. *Grunty. Metody radioizotopnykh izmerenii izmereniy plotnosti i vlazhnosti* [Soils. Methods of radioisotope measurements of density and humidity]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 20 p.
29. GOST 25100–2011. *Grunty. Klassifikatsiya* [Soils. Classification]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 39 p.
30. GOST 26213–91. *Pochvy. Metody opredeleniya organicheskogo veshchestva* [Soil. Methods of determining organic matter]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 12 p.
31. GOST 27740–79. *Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya sodержaniya organicheskikh veshchestv* [Soils. Laboratory determination of organic substances]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 10 p.
32. GOST 27784–88. *Pochvy. Metod opredeleniya zolnosti torfyannykh i otorfovannykh gorizontov pochvy* [Soil. A method of determining the ash content of the peat and peaty soil horizons]. Moscow, Publishing house of standards, 1988. 5 p.
33. GOST 30416–2012. *Grunty. Laboratornye ispytaniya. Obshchie polozeniya* [Soils. Laboratory tests. General provisions]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 12 p.
34. GOST 30672–2012. *Grunty. Polevye ispytaniya. Obshchie polozeniya* [Soils. Field tests. General provisions]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 7 p.
35. GOST 5180–2015. *Grunty metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik* [Soils methods for laboratory determination of physical characteristics]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 20 p.
36. JIS A 1203:2009 *Test Method for Water Content of Soils*. Japan, Japanese Industrial Standard Association, 2009. 6 p.
37. AS 1289.2.1.1 *Soil moisture content tests – Determination of the moisture content of a soil – Oven drying method (standard method)*. Sydney, N.S.W., Standards Australia, 2005. 3 p.
38. IS 2720-2 (1973) *Methods of test for soils. Part 2: Determination of water content*. Available at: <https://archive.org/details/gov.in.is.2720.2.1973> (accessed: 08 August 2017).
39. BS EN ISO 17892-1:2014 *Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Determination of water content*. London, British Standards Institution, 2014. 22 p.
40. AS 1289.2.1.4 *Soil moisture content tests – Determination of the moisture content of a soil – Microwave-oven drying method (subsidiary method)*. Sydney, N.S.W., Standards Australia, 2005. 3 p.
41. AS 1289.2.1.5 *Soil moisture content tests – Determination of the moisture content of a soil – Infrared lights method (subsidiary method)*. Sydney, N.S.W., Standards Australia, 2005. 3 p.
42. AS 1289.2.1.6 *Soil moisture content tests – Determination of the moisture content of a soil – Hotplate drying method*. Sydney, N.S.W., Standards Australia, 2005. 3 p.
43. AS 1289.2.3.1 *Soil moisture content tests – Establishment of correlation – Subsidiary method and the standard method*. Sydney, N.S.W., Standards Australia, 2005. 3 p.
44. AS 1289.3.1.1 *Soil classification tests – Determination of the liquid limit of a soil – Four point Casagrande method*. Sydney, N.S.W., Standards Australia, 2005. 3 p.
45. AS 1289.B3.1 *Soil moisture content tests – Establishment of correlation, between a subsidiary method of moisture content determination and the standard method AS 1289.2.1.1*. Sydney, N.S.W., Standards Australia, 2005. 3 p.
46. ISO 17319:2015 *Fertilizers and soil conditioners – Determination of water-soluble potassium content – Potassium tetraphenylborate gravimetric method*. International Organization for Standardization. Available at: <https://www.iso.org/standard/59569.html> (accessed: 08 August 2017).
47. ISO 17892-1:2014 *Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 1: Determination of water content*. International Organization for Standardization. Available at: <https://www.iso.org/standard/55243.html> (accessed: 08 August 2017).
48. JGS 0122 *Test method for water content of soils by the microwave oven*. Japanese Standards Association. Akomoto, Japanese Standards Association, 2017. 300 p.

49. KS F 2306:2000 *Test method for water content of soils*. Seoul, Korean Standards Association, 2000. 4 p.
50. KS I ISO 10573:2005 *Soil quality – Determination of water content in the unsaturated zone (Neutron depth probe method)*. Seoul, Korean Standards Association, 2003. 13 p.
51. KS I ISO 11461:2005 *Soil quality – Determination of soil water content calculated on a volume basis (Gravimetric method)*. Seoul, Korean Standards Association, 2003. 5 p.
52. KS I ISO 11465:2005 *Soil quality – Determination of dry matter and water content on a mass basis – Gravimetric method*. Seoul, Korean Standards Association, 2005. 4 p.
53. BIS IS 12175:1987 (R2002). *Specification for Rapid Moisture Meter for Rapid Determination of Water Content for Soil*. Bureau of Indian Standard. Available at: <https://archive.org/details/gov.in.is.12175.1987> (accessed: 08 August 2017).
54. AS 1289.5.8.71–998 (R2013). *Methods of testing soils for engineering purposes – Soil compaction and density tests – Nuclear surface moisture-density gauges – Water content of a standard moisture block using hydrogen content of components*. Sydney, N.S.W., Standards Australia, 1998. 8 p.
55. BIS IS 2720-2:2013. *Methods of Test for Soils. – Part 2: Determination of Water Content*. Bureau of Indian Standard. Available at: <https://archive.org/details/gov.in.is.2720.2.1973> (accessed: 08 August 2017).
56. PN ISO 10573:2001. *Soil Quality – Determination of Water Content in the Unsaturated Zone – Neutron Depth Probe Method*. Polish Committee for Standardization. Available at: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10573:e-d-1:v-1:e-n:sc:E> (accessed: 08 August 2017).
57. PN ISO 11465:1999. *Soil Quality – Determination of Dry Matter and Water Content on a Mass Basis – Gravimetric Method*. Polish Committee for Standardization. Available at: <https://www.iso.org/standard/20886.html> (accessed: 08 August 2017).
58. PKN CEN ISO/TS 17892-1:2009. *Geotechnical Investigation and Testing – Laboratory Testing of Soil – Part 1: Determination of Water Content*. Polish Committee for Standardization. Available at: <https://www.iso.org/standard/55243.html> (accessed: 08 August 2017).
59. GB/T 14506.12–010. *Methods for chemical analysis of silicate rocks – Part 1: Determination of hygroscopic water content*. Beijing, Standardization Administration of China, 2010. 8 p.
60. GB/T 14506.22–010 *Methods for chemical analysis of silicate rocks – Part 2: Determination of combined water content*. Beijing, Standardization Administration of China, 2010. 8 p.
61. BIS IS 13030:1991 (R2006) *Method of Test for Laboratory Determination of Water Content, Porosity, Density and Related Properties of Rock Material*. Bureau of Indian Standard. Available at: <http://www.questin.org/is-code/is-130301-991-method-test-laboratory-determination-water-content-porosity-density-and-related-properties-rock-material> (accessed: 08 August 2017).
62. NFP 94 410-1:2001 *Rock – Test for Physical Properties of Rock – Part 1: Determination of Water Content of Rock – Oven-drying Method*. Paris, Association Francaise de Normalisation, 2001. 6 p.
63. O’Kelly B., Sivakumar V. Water Content Determinations for Peat and Other Organic Soils Using the Oven-Drying Method. *Drying Technology*, 2014, vol. 32, no. 6, pp. 6316–43.
64. BS EN 13041:2011 *Soil improvers and growing media. Determination of physical properties. Dry bulk density, air volume, water volume, shrinkage value and total pore space*. London, British Standards Institution, 2011. 30 p.
65. Davletbakov R.R. Vliyaniye dispersnosti chastits i SVCh-izlucheniya na prochnost kremnezemistoy keramiki [Influence of dispersion of the particles and microwave radiation on the strength of siliceous ceramics]. *Universitetskiy kompleks kak regionalny tseñtr obrazovaniya, nauki i kultury: materialy Vserossiyskoy nauchno-metodicheskoy konferentsii* [University complex as a regional center of education, science and culture: materials of vseros. scientific.-method. Conf.]. Orenburg, 29–31 January 2014. Orenburg, Orenburg State University Press, 2014. pp. 1331–1335.
66. Kramarenko V.V., Nikitenkov A.N., Molokov V.Yu. O primenimosti SVCh-metoda dlya opredeleniya vlazhnosti peschanykh gruntov [On applicability of the microwave method for determining moisture content of sandy soils]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2015, no. 1, pp. 1–12. Available at: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=18451> (accessed: 08 August 2017).
67. Kramarenko V.V., Nikitenkov A.N., Molokov V.Yu. O primenenií mikrovolnovykh pečey dlya opredeleniya vlazhnosti organicheskikh i organomineralnykh gruntov [On application of microwave ovens to determine the moisture content of organic and organomineral soils]. *Sovremennyye problemy gidrogeologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii Evrazii: materialy Vserossiiskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Modern problems of hydrogeology, engineering Geology and Hydrogeocology of Eurasia: materials of all-Russian conference with international participation]. Tomsk, 23–27 August 2015. Tomsk, TPU Publ. house, 2015. pp. 338–343.
68. Prokhina A.V., Shapovalov N.A., Latypova M.M. Modifikatsiya poverkhnosti glinistykh mineralov s vysokim soderzhaniem montmorillonita v elektromagnitnom pole vysokoy chastoty [Modification of clay minerals surface with high content of montmorillonite in high-frequency electromagnetic field]. *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii*, 2011, no. 1, pp. 135–136.
69. *Stroitel'naya keramika* [Building ceramics]. Ed. by V.T. Stanevich. Pavlodar, Kereku Publ., 2008. 96 p.
70. Makeeva T.G., Egorov Yu.M. Eksperimentalnoe nablyudeniye fazovogo perekhoda svyazannoy vody I roda podobnogo II v mono- i polimineralnykh glinistykh gruntakh [Experimental observation of phase transition of the bound water of the I kinds like II in mono- and polymineral clay soils]. *Gliny, glinistyye mineraly i sloistyye materialy: Materialy I Rossiiskogo rabocheho soveshchaniya, posvyashchennogo 90-letiyu so dnya rozhdeniya B.B. Zvyagina* [Clay, clay minerals and layered materials. Materials of the I Russian workshop devoted to the 90 anniversary from the birthday of B.B. Zvyagin]. Moscow, IGEM RAN Publ., 2011. 161 p.

Received: 28 August 2017.

#### Information about the authors

**Violetta V. Kramarenko**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Alexey N. Nikitenkov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Victor Yu. Molokov**, senior laboratory assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 661.1:541.18

## ИЗУЧЕНИЕ СМАЧИВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОЙ И СТАЛЬНОЙ ПОДЛОЖЕК ПОЛИОРГАНОСИЛОКСАНАМИ В ПРИСУТСТВИИ АЗОТСОДЕРЖАЩИХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Тюканько Виталий Юрьевич<sup>1</sup>,  
vetal3333@mail.ru

Дюрягина Антонина Николаевна<sup>2</sup>,  
adyuryagina@inbox.ru.

Островной Кирилл Александрович<sup>2</sup>,  
kostrovnoy@mail.ru

Демьяненко Александр Валентинович<sup>2</sup>,  
demianenkoav@mail.ru

<sup>1</sup> АО «Казнефтегазмаш»,  
Республика Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Новая, 122.

<sup>2</sup> Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева,  
Республика Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Абая, 18.

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания новых антикоррозионных лакокрасочных материалов, с повышенным ресурсом эксплуатации, для защиты от коррозии газо-нефтепроводов и устьевого оборудования нефтяных скважин.

**Целью** работы являлось увеличение ресурса эксплуатации кремнийорганических лакокрасочных покрытий, основанное на изучении влияния азотсодержащих поверхностно-активных веществ на смачивание алюминиевой и стальной подложек в кремнийорганических лакокрасочных материалах.

**Методы исследования:** анализ поверхностного натяжения в статическом режиме на приборе Ребиндера, на границе фаз «раствор полифенилсилоксана/вода» и «раствор полифенилсилоксана/воздух». Замер и анализ краевых углов смачивания на границе «раствор полифенилсилоксана/алюминий/вода» и «раствор полифенилсилоксана/сталь/вода». Фотографирование поверхностей покрытий и электрохимическое определение пористости покрытий.

Представлены **результаты** исследований влияния азотсодержащих поверхностно-активных веществ на смачивание алюминиевой и стальной подложек растворами полифенилсилоксанов, рассчитано изменение работы смачивания, и показано их влияние на пористость покрытий. Введение поверхностно-активных веществ улучшает смачивание металлических подложек в растворах полиорганосилоксанов, что выражается в изменении краевого угла смачивания. Для алюминиевой подложки данное изменение составляет 22°, для стальной – 32,5°. Анализ изменения работы смачивания позволяет говорить, что наибольшую смачивающую активность проявляют полиэтиленполиамины (при их содержании в растворе до 0,5 г/дм<sup>3</sup>), а в более концентрированных растворах (с содержанием добавок более 0,5 г/дм<sup>3</sup>) – низкомолекулярные амины. Выведены уравнения, описывающие влияние на краевые углы смачивания содержания аддитивов и полифенилсилоксанов, и на их основе построены номограммы. Введение поверхностно-активных веществ вызывает уменьшение пористости и шероховатости покрытий (в 2,5 раза).

### Ключевые слова:

Алюминиевая и стальная подложка, кремнийорганические покрытия, азотсодержащие поверхностно-активные вещества, смачивание, изменение работы смачивания, пористость покрытий, блеск.

### Введение

Кремнийорганические лакокрасочные материалы исторически занимают значительную долю рынка лакокрасочных материалов [1]. Данный тип лакокрасочных материалов является переходной группой между органическими (физико-механические свойства) и неорганическими покрытиями (высокая термостойкость, обусловленная формированием при нагревании «кварцеподобных» структур), поэтому данные композиты имеют хорошие перспективы для разработки новых защитных покрытий [2–4]. Помимо основного требования к пигментированным покрытиям – способности формировать покрытия с заданными защитными характеристиками [5] (цвет, блеск) и структурно-механическими (твёрдость, прочно-

ми) свойствами. Качество покрытий по этим параметрам во многом зависит от степени дисперсности пигментов и смачиваемости подложки, обеспечивающей адгезионные характеристики покрытия. Для формирования высокодисперсной суспензии пигмента в кремнийорганическом лаке и хорошей адгезии покрытий на стальной подложке металлические поверхности должны хорошо смачиваться растворами лакокрасочных материалов. В кремнийорганических лакокрасочных эмалях традиционно используется в качестве пигмента алюминиевая пудра. Кремнийорганические эмали наносятся преимущественно на стальные подложки, поверхностные слои которых содержат значительное количество адсорбционных полярных центров. Поэтому

смачивание металлических поверхностей, как результирующая величина, зависит от полярности смачивающей среды, в нашем случае полиорганосилоксановые растворы являются малополярными системами и, следовательно, имеют низкие адсорбционные характеристики на гидрофильных поверхностных слоях алюминия и стали. Для увеличения гидрофобности алюминиевого пигмента и стальной подложки (и, следовательно, увеличения их смачиваемости растворами полиорганосилоксанов) может быть рекомендовано применение азотсодержащих поверхностно-активных веществ (ПАВ), образующих «привитый слой». Модифицирование лакокрасочных материалов поверхностно-активными веществами отличается большим технологическим (увеличивается ресурс покрытий) и экономическим эффектом (уменьшаются затраты на приготовление и применение лакокрасочных материалов) [6]. В литературных источниках сообщается о разработке кремнийорганических составов с применением различных азотсодержащих соединений [7–12]. Кроме того, есть ряд работ, посвящённых изучению различных факторов, таких как содержание и вид ПАВ, типа полиорганосилоксана и наполнителя на смачивание различных подложек лакокрасочными составами [13–16]. Барьерные свойства кремнийорганических покрытий, наносимых совместно с оксидными плёнками, были исследованы в работе [17], показано большое влияние внутренних напряжений формируемых покрытий на проницаемость пленок и их эксплуатационный ресурс.

Не смотря на значительное количество работ в области химического модифицирования силоксановых смол и композиций, введение азотсодержащих ПАВ представляется довольно перспективным направлением улучшения качества силиконовых покрытий.

#### Экспериментальная часть

Использованные материалы

В качестве пленкообразователя использовали полифенилсилоксановый лак КО-85 (далее ПФС) по ГОСТ 11066–74, производитель – фирма «Спектр», Россия. В качестве растворителя использовали толуол по ГОСТ 14710–78 (плотность 0,866 г/см<sup>3</sup> (при 20 °С); содержание толуола 99,80 %), производитель – фирма «Славнефть», Россия.

В качестве азотсодержащих ПАВ использовали:

- 1) смесь первичных и вторичных аминов – «АС-1» (молекулярная масса 250 а.е.м.; аминное число (мг HCl/г) 30), синтезирована лабораторией физико-химических методов исследований кафедры химической технологии Северо-Казахстанского университета им. М. Козыбаева.

- 2) технический продукт конденсации растительных масел с диаминами под торговой маркой «Диспергатор Телаз Д» (молекулярная масса 2121 а.е.м.; аминное число (мг HCl/г) 32), производитель – «Автоконивест», Россия.

- 3) технический продукт, смесь высокомолекулярных аминов – ПЭПА (молекулярная масса 4950 а.е.м.; аминное число (мг HCl/г) 31), производитель – ОАО «УралХимПласт», Россия.

Методика и проведение экспериментов

В качестве подложек применяли алюминиевый сплав марки А85 по ГОСТ 11069 (массовая доля алюминия в сплаве не менее 99,85 %) и стальные пластины, марки 08кп ГОСТ 1050 (содержание железа в сплаве ≈98 %).

При проведении исследований определяли:

- поверхностное натяжения в статическом режиме на приборе Ребиндера, на границе фаз – «раствор полифенилсилоксана/вода»  $\delta_{жж}$  (мДж/м<sup>2</sup>) и «раствор полифенилсилоксана/воздух»  $\delta_{жг}$  (мДж/м<sup>2</sup>);
- краевые углы смачивания на границе «раствор полифенилсилоксана/алюминий/вода» ( $\theta'$ ) и «раствор полифенилсилоксана/сталь/вода» ( $\theta''$ ) при постоянной температуре 25 °С [18].

Поверхностное натяжение определяли в системах:

- 1) толуол/вода, при концентрациях ПАВ от 0 до 2 г/дм<sup>3</sup> и полифенилсилоксанов от 0 до 30 % (по массе);
- 2) раствор полифенилсилоксана в толуоле/вода, при концентрациях ПАВ от 0 до 2 г/дм<sup>3</sup> и ПФС от 0 до 30 % (по массе);
- 3) толуол/воздух, при концентрациях ПАВ от 0 до 2 г/дм<sup>3</sup> и полифенилсилоксанов от 0 до 30 % (по массе);
- 4) раствор полифенилсилоксана в толуоле/воздух, при концентрациях ПАВ от 0 до 2 г/дм<sup>3</sup> и ПФС от 0 до 30 % (по массе);

Краевые углы смачивания определяли на границах фаз:

- 1) раствор полифенилсилоксана/алюминий/вода, при концентрациях ПАВ от 0 до 2 г/дм<sup>3</sup> и ПФС от 0 до 30 % (по массе);
- 2) раствор полифенилсилоксана/сталь/вода, при концентрациях ПАВ от 0 до 2 г/дм<sup>3</sup> и ПФС от 0 до 30 % (по массе);

Исследование поверхностного натяжения растворов

Введение азотсодержащих поверхностно-активных веществ в растворы полифенилсилоксанов уменьшает поверхностное натяжение на границе фаз «раствор полифенилсилоксана/вода» и «раствор полифенилсилоксана/воздух». Максимальная депрессия поверхностного натяжения наблюдалась для всех исследованных ПАВ в растворителе при их концентрации 0,5 г/дм<sup>3</sup>, а в растворах полифенилсилоксан/толуол – на уровне от 0,25 до 0,5 г/дм<sup>3</sup>.

Исследование смачивания алюминиевой подложки

Краевой угол смачивания толуолом алюминия 116,3°, что говорит о его малой гидрофильности. Для справки, капля воды на фторопласте имеет краевой угол смачивания от 112° до 130°. При добавлении в толуол полифенилсилоксанов наблюда-

ется рост краевого угла смачивания с  $116^\circ$  до  $126^\circ$ , что свидетельствует о дополнительном уменьшении гидрофильности поверхности алюминиевого пигмента. Однако при добавлении поверхностно-активных веществ наблюдается увеличение гидрофильности поверхности пигмента. Краевой угол смачивания водой при введении в толуол АС-1 в концентрациях до  $2 \text{ г/дм}^3$  уменьшается на  $16,5^\circ$ ; для ПЭПА и Телазы –  $14,5^\circ$ . В растворах полифенилсилоксанов (с концентрацией 30 % по массе), т. е. в промышленном лаке, предназначенном для изготовления кремнийорганической эмали КО-814 по ГОСТ 11066–74, гидрофилизующий эффект поверхностно-активных веществ несколько возрастает. Так, для АС-1 изменение краевого угла смачивания составляет  $22^\circ$ , для ПЭПА и Телазы –  $14^\circ$ . Поэтому можно заключить, что введение поверхностно-активных веществ в растворы полифенилсилоксанов вызывает рост гидрофильности алюминиевого пигмента.

Исследование смачивания стальной подложки

Краевой угол смачивания толуолом стали/в воде  $134^\circ$ , что говорит о его низкой гидрофильности. При добавлении в толуол полифенилсилоксанов (до 30 %) наблюдается рост краевого угла смачивания с  $134^\circ$  до  $153^\circ$ , что свидетельствует об уменьшении гидрофильности поверхности стали. Однако при добавлении поверхностно-активных веществ наблюдается рост гидрофильности поверхности стали; краевой угол смачивания водой при введении в

толуол АС-1 в концентрациях до  $2 \text{ г/дм}^3$  уменьшается на  $32,5^\circ$ ; для ПЭПА –  $23^\circ$  и Телазы –  $14,5^\circ$ . В растворах полифенилсилоксанов (с концентрацией 30 % по массе), т. е. в промышленном лаке, предназначенном для изготовления кремнийорганической эмали КО-814 по ГОСТ 11066–74, гидрофилизующий эффект поверхностно-активных веществ сохраняется. Поэтому можно заключить, что введение поверхностно-активных веществ в растворы полифенилсилоксанов вызывает рост количества адгезионных контактов, между формируемым покрытием и поверхностью окрашенной детали.

### Результаты и их обсуждение

Расчет влияния содержания поверхностно-активных веществ на смачивание металлических поверхностей

Взаимодействие подложки с жидкой фазой можно количественно оценить по работе смачивания ( $W_{см}$ ). Работа смачивания рассчитывается по уравнению (1):

$$W_{см} = \delta\mathcal{J}_1\mathcal{J}_2 \cdot \cos\theta, \quad (1)$$

где  $\delta\mathcal{J}_1\mathcal{J}_2$  – поверхностное натяжение на границе жидкость/жидкость,  $\text{мДж/м}^2$ ;  $\theta$  – краевой угол смачивания твердой поверхности, град.

Однако на практике большее применение нашла не сама работа смачивания ( $W_{см}$ ), а её изменение ( $\Delta W_{см}$ ), рассчитанное по формуле (2):

$$\Delta W_{см} = W_{см\text{ПАВ}} - W_{см}, \quad (2)$$

где  $W_{см\text{ПАВ}}$  – работа смачивания на поверхности, покрытой адсорбционным слоем поверхностно-ак-

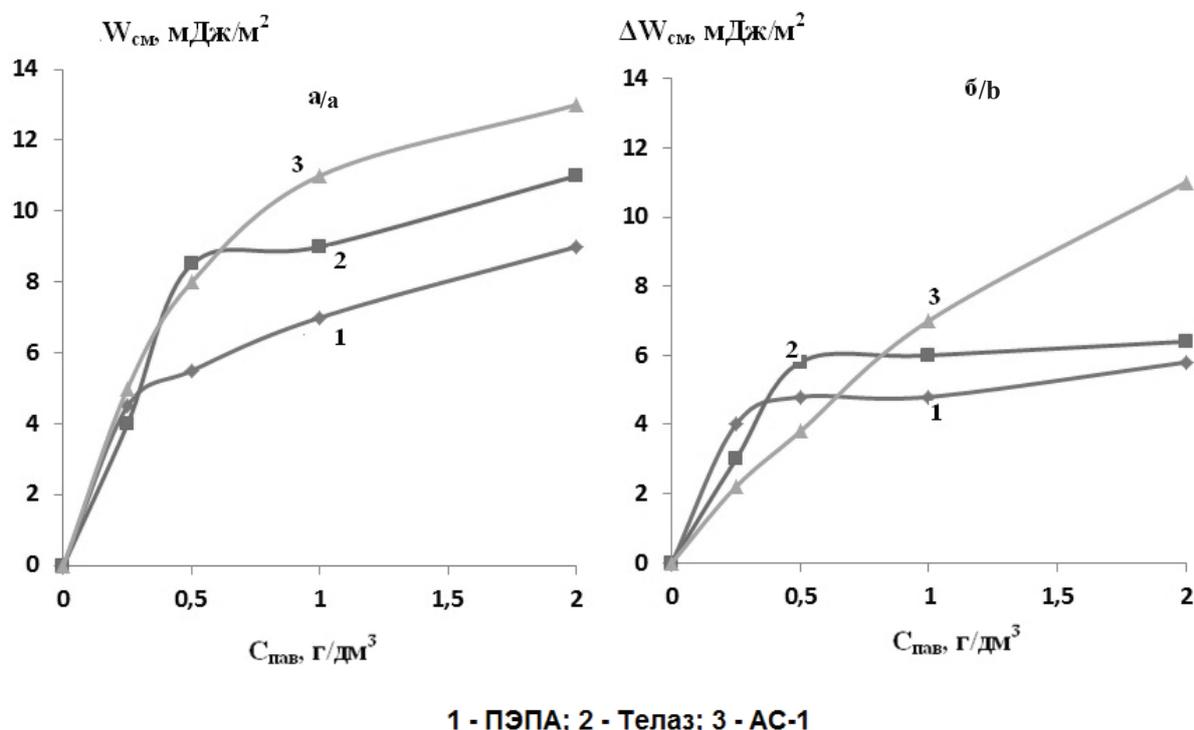


Рис. 1. Влияние поверхностно-активных веществ на изменение работы смачивания ( $\Delta W_{см}$ ) в отношении алюминия (а) и стали (б) (содержание полифенилсилоксанов 30 % (по массе)) при  $t=25^\circ\text{C}$

Fig.1. Influence of surface-active agents on the change of wetting ( $\Delta W_{см}$ ) in respect of aluminium (a) and steel (b) (the content of polyphenylsiloxane is 30 % (by weight)) at  $t=25^\circ\text{C}$

тивных веществ, мДж/м<sup>2</sup>;  $W_{см}$  – работа смачивания на поверхности, не покрытой адсорбционным слоем поверхностно-активных веществ, мДж/м<sup>2</sup>.

Следовательно, по характеру изменения  $\Delta W_{см}$  можно оценить влияние поверхностно-активных веществ на поверхностное натяжения на границе «раствор полифенилсилоксана/алюминиевая подложка» и «раствор полифенилсилоксана/стальная подложка». На рис. 1 представлено влияние содержания поверхностно-активных веществ на изменение работы смачивания на металлических поверхностях, рассчитанное по формуле (2).

Влияние различных поверхностно-активных веществ на смачивание в промышленном лаке (содержание полифенилсилоксанов 30 % (по массе)) неоднозначно, так ПЭПА и Телаз имеют максимальное изменение работы смачивания при их концентрациях в растворах до 0,5 г/дм<sup>3</sup>, что согласуется с результатами ранее проведенных исследований – влияния данных поверхностно-активных веществ на диспергирование алюминиевого пигмента, наибольший эффект наблюдается в присутствии ПЭПА и Телаз при их содержании 0,25 г/дм<sup>3</sup> [19]. В растворах полифенилсилоксанов с содержанием поверхностно-активных веществ более 0,5 г/дм<sup>3</sup> максимальное изменение работы смачивания характерно уже для АС-1, что может говорить о влиянии молекулярной массы поверхностно-активных веществ на процессы адсорбции ПАВ и на смачивание поверхностей в данных системах.

#### Определение оптимальных режимов смачивания

По результатам экспериментов выведено уравнение, описывающее влияние на краевые углы смачивания алюминия и стали, концентрации полифенилсилоксанов и поверхностно-активных веществ (3):

$$\theta = \frac{k(C_{ПФС})^3 - t(C_{ПФС})^2 + s(C_{ПФС}) + y}{(z(C_{ПАВ})^2 - g(C_{ПАВ}) + f)^{-1}W}, \quad (3)$$

**Таблица.** Значение коэффициентов  $k, t, s, y, z, g, f, w$  для различных поверхностно-активных веществ

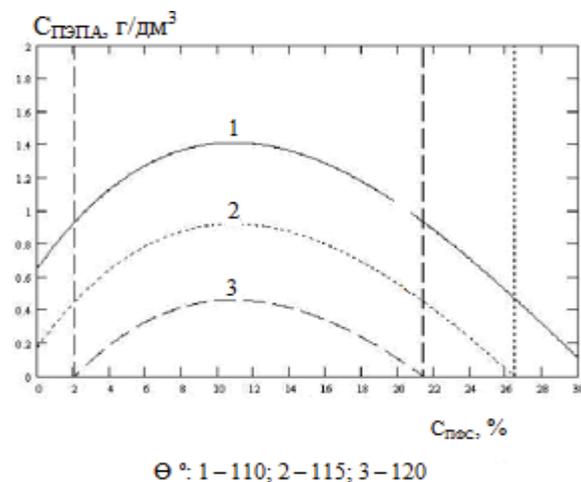
**Table.** Value of the coefficients  $k, t, s, y, z, g, f, w$  for different surfactants

ПАВ (Surfactant)	$k$	$t$	$s$	$y$	$z$	$g$	$f$	$w$
ПЭПА РЕРА (polyethylenepolyamine)	для алюминиевой подложки for aluminum substrate							
	0,003	0,149	1,840	111,89	1,00	8,990	121,94	116,30
Телаз (Telaz)	для стальной подложки for steel substrate							
	0,003	0,14	1,76	127,9	5,67	21,83	142,35	132,1
АС-1 (AS-1)	для алюминиевой подложки for aluminum substrate							
	0,001	0,088	1,562	109,33	0,717	11,69	123,53	115,51
	для стальной подложки for steel substrate							
	0,004	0,2	3,1	120,7	4,91	23,56	142,50	130

где  $\theta$  – краевой угол смачивания, град;  $k, t, s, y, z, g, f, w$  – коэффициенты (табл. 1);  $C_{ПАВ}$  – содержание поверхностно-активных веществ, г/дм<sup>3</sup>;  $C_{ПФС}$  – содержание полифенилсилоксанов (по массе), %.

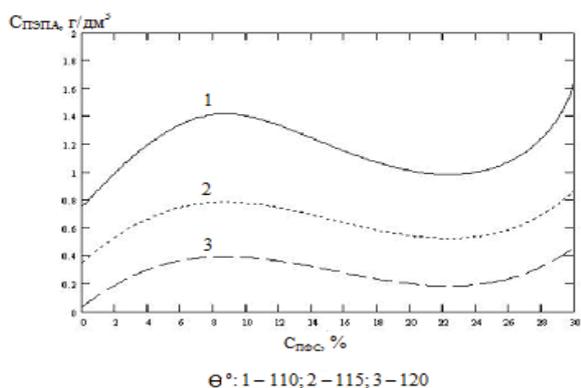
В таблице представлены коэффициенты, входящие в уравнение (3), для различных поверхностно-активных веществ.

На основе уравнения (3), и учитывая максимальный смачивающий эффект ПЭПА (как на алюминиевой, так и на стальной подложках), получены номограммы (рис. 2, 3), позволяющие определить в производственных условиях краевой угол смачивания ( $\theta$ ) в зависимости от содержания ПЭПА и полифенилсилоксанов (при  $T=25$  °С). Анализ номограмм подтверждает, что для сохранения значения краевого угла на определенном уровне, по мере разведения композиций, требуется строго дозировать поверхностно-активные вещества.



**Рис. 2.** Двухфакторная номограмма:  $\theta=f(C_{ПЭПА}; C_{ПФС};$  при  $T=25$  °С) для алюминиевой подложки

**Fig. 2.** Two-factor nomogram:  $\theta=f(C_{PEPA}; C_{PPS};$  at  $T=25$  °C) for aluminum substrate



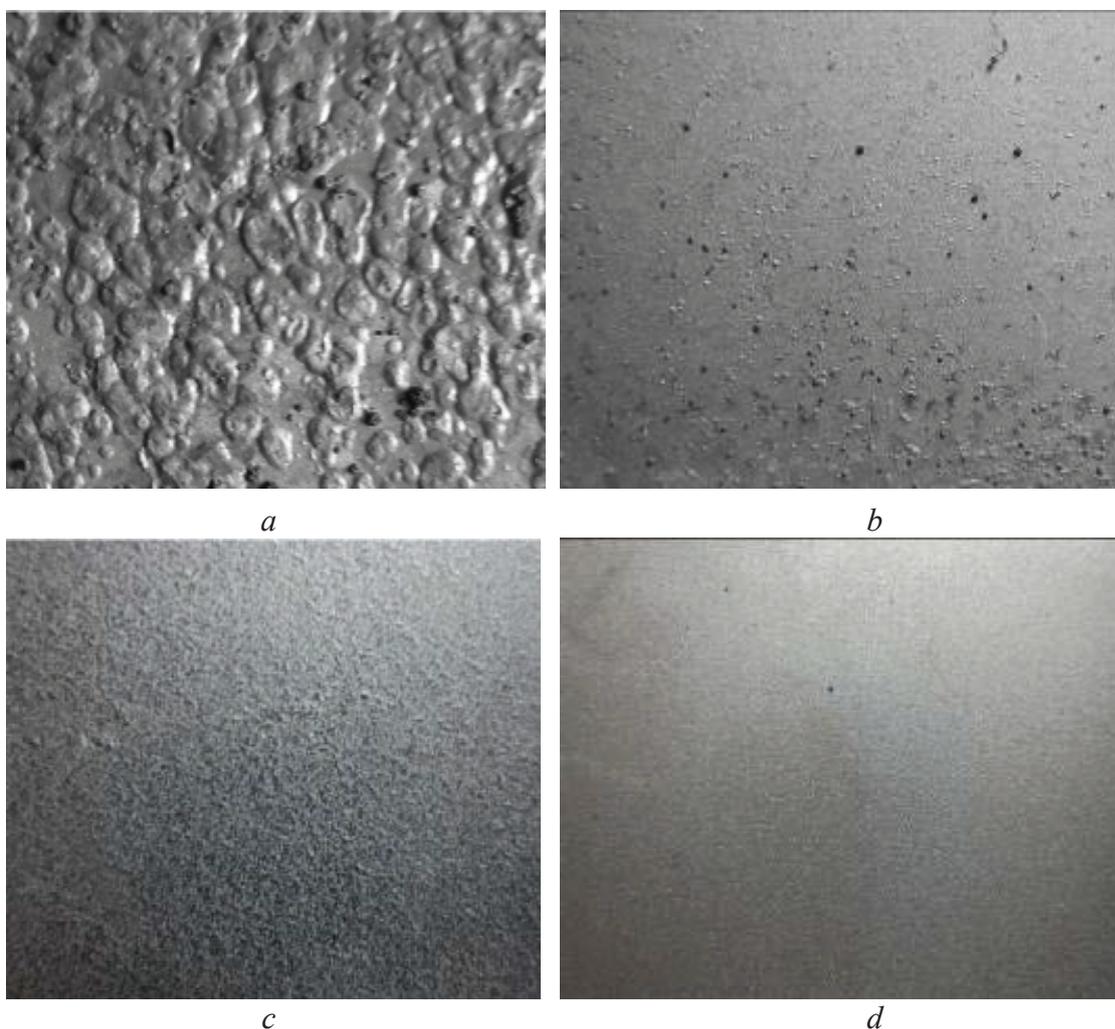
**Рис. 3.** Двухфакторная номограмма:  $\theta = f(C_{\text{ПЭПА}}, C_{\text{пес}})$  при  $T = 25^\circ\text{C}$  для стальной подложки

**Fig. 3.** Two-factor nomogram:  $\theta = f(C_{\text{PEPA}}, C_{\text{PPS}})$  at  $T = 25^\circ\text{C}$  for steel substrate

#### Технологические испытания покрытий

Как отмечено выше, поверхностно-активные вещества улучшают смачивание металлических подложек растворами полифенилсилоксанов, поэтому целесообразным представлялась проверка защитных характеристик покрытий, полученных из модифицированных составов. Лакокрасочные покрытия получают по ГОСТ11066–74. Для косвенной оценки смачиваемости пигмента и подложки раствором пленкообразующего определяли пористость покрытия электрохимическим методом [20].

Введение ПАВ вызывает уменьшение пористости покрытий (рис. 5) и увеличение их блеска (за счёт уменьшения шероховатости пленок в 2,5 раза) рис. 4.



a)  $C_{\text{ПАВ}} = 0$  г/дм<sup>3</sup>; b)  $C_{\text{ПЭПА}} = 0,25$  г/дм<sup>3</sup> – выдержка в сульфате меди  
c)  $C_{\text{ПАВ}} = 0$  г/дм<sup>3</sup>; d)  $C_{\text{ПЭПА}} = 0,25$  г/дм<sup>3</sup> – без выдержки в сульфате меди

a)  $C_{\text{surfactant}} = 0$  g/liter; b)  $C_{\text{PEPA}} = 0,25$  g/liter – exposure in copper sulfate  
c)  $C_{\text{surfactant}} = 0$  g/liter; b)  $C_{\text{PEPA}} = 0,25$  g/liter – without exposure in copper sulfate

**Рис. 4.** Фотографии покрытий до («с» и «d») и после выдержки в течение 12 часов в 5 % растворе сульфата меди («а» и «b»)

**Fig. 4.** Pictures of coating before («c» и «d») and after aging for 12 hours in 5 % copper sulfate solution («a» и «b»)

### Заключение

1. Все исследованные поверхностно-активные вещества улучшают смачиваемость алюминиевой и стальной подложек в растворах полифенилсилоксанов. Наибольшую смачивающую активность проявляют ПЭПА и Телаз, при их концентрации менее 0,5 г/дм<sup>3</sup>, а в более концентрированных растворах ( $C_{\text{ПАВ}} \geq 0,5 \text{ г/дм}^3$ ) – АС-1.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов Г.Л. Силиконовые смолы и модификаторы для промышленных лакокрасочных материалов // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2009. – № 2. – С. 32–34.
2. Гибридные наноструктуры на основе слоистых силикатов и азотсодержащих органических соединений / О.Ю. Голубева, О.С. Доманова, В.Л. Уголков, В.В. Гусаров // Журнал общей химии. – 2007. – Т. 77. – Вып. 2. – С. 246–251.
3. Ubong Eduok, Omar Faye, Jerzy Szpunar. Recent developments and applications of protective silicone coatings: a review of PDMS functional materials // Progress in Organic Coatings. – October 2017. – V. 111. – P. 124–163.
4. Development and evaluation of an eco-friendly hybrid epoxy-silicon coating for the corrosion protection of aluminium alloys / G. Luciano, A. Brinkmann, S. Mahanty, M. Echeverria // Progress in Organic Coatings. – September 2017. – V. 110. – P. 78–85.
5. Development of polyorganosilazane-silicone marine coatings / S. Marceaux, Ch. Bressy, F.-X. Perrin, C. Martin, A. Margailan // Progress in Organic Coatings. – November 2014. – V. 77. – Iss. 11. – P. 1919–1928.
6. Болатбаев К.Н., Дюрягина А.Н., Островной К.А. Модифицирование композитов поверхностно-активными веществами. – Петропавловск: Изд-во ККТУ, 2005. – 184 с.
7. Diffusion of surface-active amphiphiles in silicone-based fouling-release coatings / C. Noguier, S.M. Olsen, S. Hvilsted, S. Kiil // Progress in Organic Coatings. – May 2017. – V. 106. – P. 77–86.
8. Ляпишев В.М., Сорокин М.Ф., Иванов С.А. Влияние природы отвердителя на термодеструкцию эпоксикремнийорганических композиций // Лакокрасочные материалы и их применение. – 1983. – № 4. – С. 10–12.
9. Ananda Kumar A. Sasikumar. Studies on novel silicone/phosphorus/sulphur containing nano-hybrid epoxy anticorrosive and antifouling coatings // Progress in Organic Coatings. – July 2010. – V. 68. – Iss. 3. – P. 189–200.
10. Chattopadhyay D.K., Dean C. Dean C. Webster Hybrid coatings from novel silane-modified glycidyl carbamate resins and amine crosslinkers // Progress in Organic Coatings. – September 2009. – V. 66. – Iss. 1. – P. 73–85.
11. Atul Tiwari, Ryan Sugamoto, Lloyd H. Hihara. Analysis of molecular morphology and permeation behavior of polyimide-siloxane molecular composites for their possible coatings application //

2. Улучшение смачивания металлических подложек растворами полифенилсилоксанов в присутствии поверхностно-активных веществ подтверждается и уменьшением шероховатости и пористости покрытий, полученных из модифицированных составов. Данные лакокрасочные составы могут быть использованы для защиты от коррозии газо-нефтепроводов и устьевого оборудования нефтяных скважин.

- Progress in Organic Coatings. – 1 November 2006. – V 57. – Iss. 3. – P. 259–272.
12. Development and characterization of silicone/phosphorus modified epoxy materials and their application as anticorrosion and antifouling coatings / A. Kumara, T. Balakrishna, M. Alagarb, Z. Denchevc // Progress in Organic Coatings. – 1 March 2006. – V. 55. – Iss. 3. – P. 207–217.
13. Self-assembled perfluoroalkylsilane films on silicon substrates for hydrophobic coatings / Lu Cai, Anqi Liu, Yanhua Yuan, Li Dai, Zhanxiong Li // Progress in Organic Coatings. – January 2017. – V. 102. – P. B. – P. 247–258.
14. Seyedmehdi S.A., Hui Zhang, Jesse Zhu. Influence of production method, silicone type and thickness on silicon rubber superhydrophobic coatings // Progress in Organic Coatings. – January 2016. – V. 90. – P. 291–295.
15. Arianpour F., Farzaneh M., Kulinich S.A. Hydrophobic and ice-retarding properties of doped silicone rubber coatings // Applied Surface Science. – 15 January 2013. – V. 265. – P. 546–552.
16. Photocurable resin/nanocellulose composite coatings for wood protection / A. Cataldi, C.E. Corcione, M. Frigione, A. Pegoretti // Progress in Organic Coatings. – May 2017. – V. 106. – P. 128–136.
17. Barrier property and mechanical flexibility of stress controlled organosilicon/silicon oxide coatings on plastic substrates / Shao-Kai Lu, Shun-Chi Chen, Tai-Hong Chen, Li-Wen Lai, Ren-Mao Liao, Day-Shan Liu // Surface and Coatings Technology. – 25 October 2015. – V. 280. – P. 92–99.
18. Малахова А.Я. Практикум по физической и коллоидной химии. – Минск: Вышэйш. школа, 1974. – 366 с.
19. Дюрягина А.Н., Островной К.А., Тюканько В.Ю. Применение аминов для дезагрегации алюминиевой пудры в кремнийорганических лакокрасочных материалах // Современные проблемы науки о полимерах: Сборник трудов IV Санкт-Петербургской международной конференции молодых учёных. – Санкт-Петербург, 2008. – С. 63.
20. Карякина М.И. Лабораторный практикум по испытанию лакокрасочных материалов и покрытий. – М.: Химия, 1977. – 240 с.

Поступила 11.09.2017 г.

### Информация об авторах

**Тюканько В.Ю.**, кандидат технических наук, инженер-технолог по лакокрасочным покрытиям АО «Казнефтегазмаш».

**Дюрягина А.Н.**, кандидат химических наук, доцент, заведующая кафедрой органической химии и химии ВМС Северо-Казахстанского университета им. М. Козыбаева.

**Островной К.А.**, преподаватель кафедры органической химии и химии ВМС Северо-Казахстанского университета им. М. Козыбаева.

**Демьяненко А.В.**, кандидат технических наук, доцент, декан инженерного факультета Северо-Казахстанского университета им. М. Козыбаева.

UDC 661.1:541.18

## STUDY OF WETTING OF ALUMINUM AND STEEL SUBSTRATES WITH POLYORGANOSILOXANES IN THE PRESENCE OF NITROGEN-CONTAINING SURFACTANTS

Vitaliy Y. Tyukanko<sup>1</sup>,  
vetal3333@mail.ru

Antonina N. Duryagina<sup>2</sup>,  
adyuryagina@inbox.ru

Kirill A. Ostrovnoy<sup>2</sup>,  
kostrovnoy@mail.ru

Alexander V. Demyanenko<sup>2</sup>,  
demianenkoav@mail.ru

<sup>1</sup> JSC «Kazneftegazmash»,  
122, Novaya street, 150000, Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan.

<sup>2</sup> M. Kozybaev North Kazakhstan University,  
18, Abay street, Petropavlovsk, 150000, Kazakhstan.

**The relevance** of the work is caused by the necessity to develop a new anti-corrosion paints, with increased resource exploitation to protect gas pipelines and wellhead equipment of oil wells from corrosion.

**The main aim** of the study is to increase the service life of silicone coatings based on the study of the influence of nitrogen-containing surfactants on wetting of aluminum and steel substrates in silicon-organic paint materials.

**The methods used in the study:** analysis of surface tension in static mode on the device Reh binder, on the border of phases – solution of polyphenylsiloxane/water and polyphenylsiloxane/air solution and the contact angle of wetting on the border – solution of polyphenylsiloxane/aluminum/water and polyphenylsiloxane/steel/water solution; photographing the surfaces of the coatings and electrochemical determination of coating porosity.

The paper introduces the results of the study of nitrogen-containing surfactants effect on wetting of aluminum and steel substrates with solutions of polyphenylsiloxane. The authors have calculated the change in wetting and shown their influence on porosity of coatings. Introduction of surfactants improves wetting of metal substrates in solutions of polyorganosiloxanes, which is expressed in the change of wetting angle. It is to 22° for aluminum substrate and 32,5° for steel one. Analysis of changes in wetting functioning allows supposing that polyethylenpolyamines demonstrate the greatest wetting activity (if their content in the solution is to 0,5 g/dm<sup>3</sup>), and low molecular weight amines in more concentrated solutions (with added content more than 0,5 g/dm<sup>3</sup>). The authors derived the equations describing the effect of additives and polyphenylsiloxane contents on wetting angles and developed the nomograms. The introduction of surfactants causes decrease in porosity and roughness of the surfaces (in 2,5 times).

### Key words:

Aluminum and steel substrate, silicone coating, nitrogen-containing surfactants, wetting, changing the performance of wetting, porosity of the coating, gloss.

### REFERENCES

1. Artamonov G.L. Silicone resins and modifiers for industrial paints and varnishes. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 2009, no. 2, pp. 32–34. In Rus.
2. Golubeva O.Yu., Domanova O.S., Ugolkov V.L., Gusarov V.V. Hybrid nanostructures based on layered silicates and nitrogen-containing organic compounds. *Zhurnal obshchey khimii*, 2007, vol. 77, pp. 246–251. In Rus.
3. Ubong Eduok, Omar Faye, Jerzy Szpunar. Recent developments and applications of protective silicone coatings: a review of PDMS functional materials. *Progress in Organic Coatings*, 2017, vol. 111, pp. 124–163.
4. Luciano G., Brinkmann A., Mahanty S., Echeverria M. Development and evaluation of an eco-friendly hybrid epoxy-silicon coating for the corrosion protection of aluminium alloys. *Progress in Organic Coatings*, 2017, vol. 110, pp. 78–85.
5. Marceaux S., Bressy C., Perrin F., Martin C., Margaillan A. Development of polyorganosilazane-silicone marine coatings. *Progress in Organic Coatings*, vol. 77, 2014, pp. 1919–1928.
6. Bolatbaev K.N., Dyuryagina A.N., Ostrovnoy K.A. *Modifitsirovanie kompozitov poverkhnostno-aktivnymi veshchestvami* [Composite modification with surface active substances]. Petropavlovsk, SKGU Publ., 2005. pp. 184.
7. Noguer C., Olsen S.M., Hvilsted S., Kiil S. Diffusion of surface-active amphiphiles in silicone-based fouling-release coatings. *Progress in Organic Coatings*, 2017, vol. 106, pp. 77–86.
8. Lyapishev V.M., Sorokin M.F., Ivanov S.A. Vliyanie prirody otverditelya na termodestruktsiyu epoksikremniyorganicheskikh kompozitsy [Influence of hardened nature on thermal destruction of epoxy-silicon compositions]. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 1983, no. 4. pp. 10–12.
9. Ananda Kumar A. Sasikumar. Studies on novel silicone/phosphorus/sulphur containing nano-hybrid epoxy anticorrosive and antifouling coatings. *Progress in Organic Coatings*, 2010, vol. 68, pp. 189–200.
10. Chattopadhyay D.K., Webster D.C. Hybrid coatings from novel silane modified glycidyl carbamate resins and amine crosslinkers. *Progress in Organic Coatings*, September 2009, vol. 66, pp. 73–85.
11. Atul Tiwari, Ryan Sugamoto, Lloyd H. Hihara Analysis of molecular morphology and permeation behavior of polyimide-siloxane molecular composites for their possible coatings application. *Progress in Organic Coatings*, 2006, vol. 57, pp. 259–272.

12. Ananda Kumara, Balakrishnana T., Alagarb M., Denchevc Z. Development and characterization of silicone/phosphorus modified epoxy materials and their application as anticorrosion and anti-fouling coatings. *Progress in Organic Coatings*, 2006, vol. 55, pp. 207–217.
13. Lu Cai, Anqi Liu, Yanhua Yuan, Li Dai, Zhanxiong Li. Self-assembled perfluoroalkylsilane films on silicon substrates for hydrophobic coatings. *Progress in Organic Coatings*, 2017, vol. 102, pp. 247–258.
14. Seyedmehdi S.A., Hui Zhang, Jesse Zhu. Influence of production method, silicone type and thickness on silicon rubber superhydrophobic coatings. *Progress in Organic Coatings*, 2016, vol. 90, pp. 291–295.
15. Arianpour F., Farzaneh M., Kulinich S.A. Hydrophobic and ice-retarding properties of doped silicone rubber coatings. *Applied Surface Science*, 2013, vol. 265, pp. 546–552.
16. Cataldi A., Corcione E.C., Frigione M., Pegoretti A. Photocurable resin/nanocellulose composite coatings for wood protection. *Progress in Organic Coatings*, 2017, vol. 106, pp. 128–136.
17. Shao-Kai Lu, Shun-Chi Chen, Tai-Hong Chen, Li-Wen Lai, Ren-Mao Liao, Day-Shan Liu. Barrier property and mechanical flexibility of stress controlled organosilicon/silicon oxide coatings on plastic substrates. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 280, pp. 92–99.
18. Malakhova A.Ya. *Praktikum po fizicheskoy i kolloidnoy khimii* [Practice in physical and colloid chemistry]. Minsk, Vyshehysh. Shkola Publ., 1974. 366 p.
19. Dyuryagina A.N., Ostrovnoy K.A., Tyukanko V.Yu. Primenenie aminov dlya dezagregatsii alyuminievoy pudry v kremniyorganicheskikh lakokrasochnykh materialakh [Amine application for disintegration of aluminum powder in organosilicon paint materials]. *Sovremennye problemy nauki o polimerakh. Sbornik trudov IV Sankt-Peterburgskoy mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchennykh* [Current issues in the science of polymers. Proceedings of the IV St. Petersburg International conference of young scientists]. St-Petersburg, 2008. pp. 63.
20. Karyakina M.I. *Laboratorny praktikum po ispytaniyu lakokrasochnykh materialov i pokryty* [Laboratory course in testing paint materials and coatings]. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 240 p.

Received 11 September 2017.

#### Information about the authors

**Vitaliy Y. Tyukanko**, Cand. Sc., coating engineer-technologist, JSC «Kazneftegazmash».

**Antonina N. Duryagina**, Cand. Sc, associate professor, head of the department, M. Kozybaev North Kazakhstan University.

**Kirill A. Ostrovnoy**, professor, M. Kozybaev North Kazakhstan University.

**Alexander V. Demyanenko**, Cand. Sc., associate professor, dean, M. Kozybaev North Kazakhstan University.

УДК 539.3

## НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕЗОНАТОРОВ В ВИДЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ В ПЛАНЕ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С УЧЕТОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ И ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ

Мицкевич Светлана Александровна<sup>1</sup>,  
svetlana.mitskevich@gmail.com

Жигалов Максим Викторович<sup>1</sup>,  
zhigalovm@yandex.ru

Захарова Алена Александровна<sup>2</sup>,  
zaa@tpu.ru

Крысько Вадим Анатольевич<sup>1</sup>,  
tak.@san.ru

<sup>1</sup> Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина,  
Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность.** В связи с тем, что разведка полезных ископаемых – высоко технологичный процесс, актуальным является создание методов построения новых математических моделей, наиболее близко учитывающих истинную работу элементов микроэлектромеханических систем. Микроэлектромеханические системы – перспективные приборы современной микросистемной техники, интенсивно и динамично развивающегося научно-технического направления. Эти системы характеризуются уникально малыми массой и габаритами, низким потреблением электроэнергии, возможностью функционирования в жестких условиях эксплуатации и на несколько порядков меньшей стоимостью, чем их традиционные аналоги.

**Цель работы:** построение математической модели, наиболее полно отражающей реальную работу приборов микроэлектромеханических систем. Для этого следует учитывать большие перемещения, нелинейную зависимость между напряжениями и деформациями, ударные нагрузки, температурные поля. Создание численных методов, которые позволят рассматривать распределенные механические структуры как системы с бесконечным числом степеней свободы. Анализ характера сложных нелинейных колебаний разработанных математических моделей. Выявление областей неустойчивого решения рассматриваемых элементов резонаторов микроэлектромеханических систем, связанных с хаотическими колебаниями.

**Методы:** вариационные методы, численные методы сведения уравнений в частных производных к задаче Коши – метод конечных разностей 2-го порядка точности; решение задачи Коши методами типа Рунге–Кутты; методы качественного исследования нелинейной динамики: Фурье, вейвлет анализа, сечение Пуанкаре, фазовый портрет.

**Результаты исследования и выводы.** Установлено, что переходные процессы зависят от геометрических и физических параметров оболочки, частоты вынуждающих колебаний и некоторых других параметров, т. е. единого сценария перехода колебаний из гармонических в хаотические нет. Характер колебаний существенно зависит от интенсивности деформаций. Выявлено, что наиболее часто встречающимся сценарием является сценарий Рюэля–Тakensа. Для некоторых значений кривизны получены модификации этого сценария.

### Ключевые слова:

Нелинейная динамика, оболочки, геометрическая нелинейность, физическая нелинейность.

### Введение

В настоящее время в геологоразведке происходит переход от простого вертикального бурения к управляемому горизонтально-вертикальному бурению. Создание таких установок невозможно без различных датчиков, которые необходимы для определения положения бура. При этом используемые сенсоры должны иметь возможность работы при сверхвысоких температурах и значительных уровнях вибрации.

Разведка и добыча полезных ископаемых, в частности газа и нефти, в последнее время становится все более высокотехнологичной отраслью. Это связано с целым рядом факторов. Во-первых, экологические нормы постоянно ужесточаются, а их нарушение жестко пресекается. Во-вторых, на-

более легкодоступные месторождения, залегающие неглубоко под поверхностью земли, встречаются все реже. В-третьих, организация геологоразведки и бурения глубоких шахт оказывается достаточно дорогостоящим мероприятием. В итоге поиск новых глубоко расположенных месторождений требует увеличения объемов бурения на фоне роста стоимости работ и при постоянном давлении со стороны экологов. Это привело к тому, что традиционное вертикальное бурение начинает уступать место высокотехнологичному и управляемому горизонтально-вертикальному бурению. Чтобы реализовать данную технологию добычи углеводородов, необходимо создать управляемый интеллектуальный бур, который содержит механическую часть, различные датчики, передатчик дан-

ных, систему управления. Создание такого устройства – это вызов не только для создателей фрез, но и для создателей электроники. Это связано с наличием сразу нескольких проблем, основными из которых являются высокие уровни вибрации и необходимость работы при повышенных температурах. Например, постоянная рабочая температура во время работы в скважине достигает 150 °С, при этом возможны скачки и до более высоких температур. Для позиционирования бура необходимо наличие различных датчиков: гироскопов, магнитометров и акселерометров. К сожалению, именно традиционные сенсоры микроэлектромеханических систем (МЭМС) достаточно чувствительны к температуре и вибрациям. Например, для акселерометров температура негативно влияет на точность измерений, а постоянные внешние вибрации приводят к деградации измерительных ячеек. В худшем случае может возникнуть резонанс, который приводит к ложным показаниям. Еще одним разрушительным фактором при бурении является наличие ударных нагрузок.

МЭМС содержит электронную схему, механические узлы и чувствительный элемент, выполненные в виде одного компонента с использованием технологических приемов, применяемых в производстве микросхем, т. е. МЭМС дополняет электронную схему датчиком и исполнительным механизмом – актюатором. Любая управляющая система осуществляет контроль над объектом с помощью управляющих сигналов, а ответное взаимодействие осуществляется с помощью сигналов обратной связи [1]. МЭМС имеют аналогичную структуру: сенсорная подсистема, актюаторная подсистема и подсистема анализа информации и принятия решений. Сенсорная подсистема служит для измерения состояния контролируемого объекта, которое осуществляется посредством передачи электрического сигнала в ответ на изменение какой-либо величины в системе. Актюаторная подсистема, наоборот, осуществляет воздействие на объект управления: при подводе к системе энергии реализует управляемое движение [2]. Относительное отставание в методах создания измерительной и исполнительной подсистем является препятствием на пути дальнейшего совершенствования МЭМС [3]. Таким образом, создание методики расчета и проектирования механических компонентов МЭМС является актуальной задачей. Проектируемые конструкции должны удовлетворять традиционным требованиям прочности, долговечности, надежности, а также специфическим требованиям быстродействия, обеспечения требуемых контактных усилий и отсутствия дребезга [4].

Актюаторы в виде тонких биметаллических элементов активно используются в современных технических устройствах. Наибольшее распространение получили биметаллические актюаторы в форме ламели, пластинки, и разного вида оболочек. Отметим, что теорией деформации элементов в форме осесимметричных пологих оболочек и пластин за-

нимались многие отечественные и зарубежные исследователи. Вопрос об устойчивости пологой биметаллической арки рассмотрен С.П. Тимошенко [5]. Влияние температуры на устойчивость чувствительного элемента термостата в форме пологого биметаллического сферического диска было исследовано в работе W.H. Wittricka [6]. Общая теория биметаллических упругих тонкостенных оболочек на основе гипотезы Кирхгофа–Лява для случая малых перемещений и деформаций изложена в работах Э.И. Григолюка [7–13]. Работы С.С. Гаврюшина и др. [14–19] посвящены расчету термобиметаллических чувствительных элементов. В них изложена методика анализа прохлопывающих под воздействием температурной и механической нагрузок тонкостенных осесимметричных оболочек на основе многопараметрического подхода, позволяющего рассматривать задачи о больших прогибах и исследовать закритическое поведение. Предложена новая конструкция термобиметаллического актюатора в виде осесимметричного пологого купола с язычком U-образной формы. Реализация движения является основным свойством актюаторов, поэтому на практике возникает необходимость учитывать большие прогибы, а также использовать материалы, упругие свойства которых не позволяют применять классический закон Гука. Все это приводит к рассмотрению нелинейных соотношений между деформациями и перемещениями (геометрическая нелинейность), а также между деформациями и усилиями (физическая нелинейность).

Особый раздел теории колебаний оболочек представляет исследование их нелинейных колебаний. При этом наибольший интерес при рассмотрении зависимости прогиба от нагрузки вызывает неустановившийся, переходный процесс движения оболочки от ее регулярных колебаний к полной потере устойчивости. Такой процесс обычно включает в себе скачкообразные переходы (бифуркации) от установившегося движения одного типа к некоторому другому движению, при достижении определенного критического значения нагрузки. Обзор результатов исследований свойств переходных процессов в колебаниях нелинейных систем опубликовал Т. Каританиак [20], где построены отображения Пуанкаре и типы фазовых траекторий с различными вариантами неустойчивости. P.J. Holmes [21] подробно исследовал хаотические движения слегка выпученного стержня, подвергающегося боковому синусоидальному возмущению. F.C. Moon [22] установил, что гармонически вынужденное движение выгнутого стержня отчетливо демонстрирует хаотический характер. Бифуркационные механизмы перехода к хаосу в сложных колебаниях балок под действием квазипериодического нагружения проанализированы в статье Yagasaki Takao [23]. N.S. Abhyankar и др. [24] предложили новый метод численного решения дифференциальных уравнений в частных производных, на основе которого провели компьютерные эксперименты для выявления закономерностей

стей перехода к хаосу в колебаниях балочных структур. Ü. Lerik [25] пытался выяснить возможность хаотических реакций в осесимметричных колебаниях упруго-пластических цилиндрических оболочек. В большинстве проведенных компьютерных экспериментов установившиеся колебания имели регулярный характер. Han Qiang и др. [26] провели анализ нелинейных колебаний упругой цилиндрической оболочки и нашли критические условия возникновения хаотического движения. Исследованию потери устойчивости цилиндрических панелей посвящена работа [27]. В работе [19] предложена методика расчета на устойчивость анизотропных оболочек вращения с произвольной формой меридиана при нелинейном докритическом состоянии. В работе [28] исследуется устойчивость сжатой в своей плоскости однородной пластины, лежащей на упругом основании.

Сравнению различных моделей, использующихся для определения собственных частот чувствительного элемента микромеханических гироскопов на этапе их проектирования, посвящена работа [29]. Монография [30] посвящена обобщению результатов по хаотической динамике нелинейных механических конструкций, находящихся под действием полей различной природы. В работах С.А. Мицкевич и др. [31, 32] были исследованы установившиеся колебания балочных МЭМС-резонаторов в вязкой среде и рассмотрена динамика гибких балок при действии ударных нагрузок с учетом белого шума. Нелинейная динамика вибрационных микромеханических гироскопов (ММГ) исследована в работе [33] на примере расчета балочного резонатора с начальной неправильностью с учетом геометрической нелинейности. Построению математической модели и исследованию нелинейных колебаний вращающегося микромеханического гироскопового элемента в виде ортотропной круглой пластины, зажатой в ее центре, посвящена работа [34]. Исследованию хаотической динамики осесимметричных оболочек и контактного взаимодействия механических структур, связанных через краевые условия, посвящены статьи [35–38].

На основании обзора публикаций, посвященных условиям возникновения хаотических движений для элементов оболочечных и балочных структур, можно сделать вывод, что математические модели нелинейных колебаний элементов МЭМС в виде прямоугольных в плане геометрически и физически нелинейных пологих оболочек не рассматривались. Изучению таких явлений посвящена настоящая статья.

#### Основные допущения и гипотезы

Рассмотрим пологую прямоугольную в плане оболочку с размерами  $a$ ,  $b$ ,  $h$  вдоль осей  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  соответственно. Для пологой сферической оболочки стрелу подъема, выраженную в её толщинах, легко определить, зная безразмерный параметр кривизны [39]  $k_1$  или  $k_2$  –  $f=k_1/8$ .

Начало координат расположено в левом верхнем углу оболочки в ее срединной поверхности, оси  $x_1$ ,  $x_2$  параллельны сторонам оболочки, ось  $x_3$  направлена внутрь кривизны (рис. 1). В указанной системе координат оболочка, как трехмерная область  $\Omega$ , определяется как:

$$\Omega = \{x_1, x_2, x_3 / (x_1, x_2, x_3) \in [0, a] \times [0, b] \times [-h/2, h/2]\}.$$

Срединная поверхность обозначена как

$$\Gamma = \{x_1, x_2 / (x_1, x_2) \in [0, a] \times [0, b]\}.$$

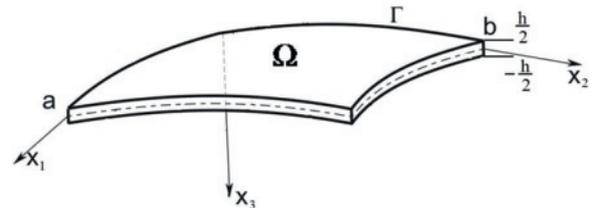


Рис. 1. Геометрические параметры оболочки

Fig. 1. Geometric parameters of the shell

Обозначим перемещения вдоль осей  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  через  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$  соответственно, причем  $u_3 = u_3(x_1, x_2)$ . Все компоненты перемещения считаем значительно меньшими характерного размера оболочки в плане. Деформации срединной поверхности  $\varepsilon_{11}$ ,  $\varepsilon_{22}$ ,  $\varepsilon_{12}$  предполагаем пренебрежимо малыми по сравнению с единицей, но это не означает, что связь между перемещениями и деформациями должна быть линейна.

Математическая модель оболочки строится на основе гипотез Кирхгофа–Лява, при этом геометрическая нелинейность учитывается по Карману.

Физические соотношения примем в виде [40]:

$$\sigma_{ij} = 3k\eta(e_0)e_0 + 2G\gamma(e_i)(e_{ij} - e_0), \quad (i, j = 1, 2, 3),$$

$$e_0 = \frac{1}{3}(e_{11} + e_{22} + e_{33}), \quad (1)$$

здесь  $k$ ,  $G$  – модули объемного сжатия и сдвига;  $e_0$  – средняя деформация;  $\gamma(e_i)$  – функция сдвига;  $\eta(e_0)$  – функция удлинения. Согласно данным [39], примем  $\eta(e_0) = 1$ .

Используя гипотезу плосконапряженного состояния и гипотезу Дюгамеля–Неймана, связь между напряжениями и деформациями запишем в виде:

$$\sigma_{11} = \frac{E\gamma(e_i)}{(1+\nu)(1-\mu)} [e_{11} + \mu e_{22} - (1+\mu)\alpha_T\theta], \quad (1, 2)$$

$$\sigma_{12} = \frac{E\gamma(e_i)}{2(1+\nu)} e_{12}, \quad (2)$$

где  $e_i$  – интенсивность деформаций;  $E$ ,  $\nu$  – модуль Юнга и коэффициент Пуассона;  $\theta$  – приращение температуры;  $\alpha_T$  – коэффициент линейного температурного расширения;  $\mu = \frac{3-2g\gamma(e_i)}{2(3+g\gamma(e_i))}$ ,  $g = \frac{G}{K}$ ;  $T_0$  – начальная температура.

Предположим, что  $\left| \frac{\theta}{T_0} \right| \ll 1$ , то есть приращение температуры  $\theta$  столь мало, что все термоупругие константы материала в формулах (1) и (2) можно считать постоянными и независимыми от температуры.

#### Сведение трехмерной задачи термоупругости к двумерной

Введем интегральные характеристики напряжений:

$$T_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{ij} dx_3, \quad M_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} x_3 \sigma_{ij} dx_3, \\ (i, j = 1, 2, i \neq j) \lim_{x \rightarrow \infty}, \quad (3)$$

Подставляя (1) в (3), интегрируя последние соотношения по  $x_3$  от  $-h/2$  до  $h/2$  и проводя ряд преобразований получим:

$$T_{ij} = \frac{Eh}{1-\nu^2} (\varepsilon_{ij} + \nu \varepsilon_{ij}) + \Delta T_{ij} - N_T - \Delta_T T, \\ M_{ij} = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} (\xi_{ij} + \nu \xi_{ij}) + \Delta M_{ij} - M_T - \Delta_T M, \\ (i, j = 1, 2, i \neq j), \quad (4)$$

$$T_{12} = \frac{Eh}{2(1+\nu)} \varepsilon_{12} + \Delta T_{12}, \quad M_{12} = \frac{Eh^3}{24(1+\nu)} \xi_{12} + \Delta M_{12}, \\ N_T = \frac{E\alpha_T}{1-\nu} \int_{-h/2}^{h/2} \theta dx_3, \quad M_T = \frac{E\alpha_T}{1-\nu} \int_{-h/2}^{h/2} x_3 \theta dx_3, \quad (5)$$

где

$$\Delta T_{ij} = \frac{Eh}{1+\nu} [\varepsilon_{ij} P_1^1 + \varepsilon_{ij} P_1^2 + h(\xi_{ij} P_2^1 + \xi_{ij} P_2^2)], \\ \Delta M_{ij} = \frac{Eh^2}{1+\nu} [\varepsilon_{ij} P_2^1 + \varepsilon_{ij} P_2^2 + h(\xi_{ij} P_3^1 + \xi_{ij} P_3^2)], \\ (i, j = 1, 2; i \neq j), \\ \Delta T_{12} = \frac{Eh}{2(1+\nu)} (\varepsilon_{12} P_1^3 + h \xi_{12} P_2^3), \\ \Delta M_{12} = \frac{Eh^2}{2(1+\nu)} (\varepsilon_{12} P_2^3 + h \xi_{12} P_3^3), \\ \Delta_T T = E\alpha_T W_1, \quad \Delta_T M = E\alpha_T W_2, \\ P_k^n = \frac{1}{h^k} \int_{-h/2}^{h/2} F_n x_3^{k-1} dx_3, \quad n, k = 1, 2, 3, \\ W_i = \int_{-h/2}^{h/2} F_4 \theta x_3^{i-1} dx_3, \quad i = 1, 2, 3, \\ F_1 = \frac{(1-\nu)\gamma(e_i) - (1-\mu)}{(1-\nu)(1-\mu)}, \\ F_2 = \frac{\mu(1-\nu)\gamma(e_i) - \nu(1-\mu)}{(1-\nu)(1-\mu)}, \\ F_3 = \gamma(e_i) - 1, \\ F_4 = \frac{(1-\mu)(1-\nu)\gamma(e_i) - \nu(1+\nu)(1-\mu)}{(1-\nu^2)(1-\mu)}.$$

Разрешая соотношения (4) и (5) относительно деформации срединной поверхности, получим

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{Eh} \left[ \frac{T_{ij} - \nu T_{ii} - (\Delta T_{ij} - \nu \Delta T_{ij})}{+(1-\nu)(N_T + \Delta_T T)} \right], \\ \chi_{ij} = \frac{12}{Eh^3} \left[ \frac{M_{ij} - \nu M_{ij} - (\Delta M_{ij} - \nu \Delta M_{ij})}{+(1-\nu)(M_T - \Delta M_T)} \right], \\ (i, j = 1, 2; i \neq j), \\ \varepsilon_{12} = \frac{2(1+\nu)}{Eh} (T_{12} - \nu \Delta T_{12}), \\ \chi_{12} = \frac{2L(1+\nu)}{Eh^3} (M_{12} - \nu \Delta M_{12}).$$

Согласно теории малых упруго пластических деформаций, функция сдвига  $\gamma = \gamma(e_i)$  определяется из соотношений  $G\gamma(e_i) = \frac{1}{3} \frac{\sigma_i(e_i)}{e_i}$ , откуда получаем

$$\gamma(e_i) = \frac{\sigma_i(e_i)}{3Ge_i}. \quad \text{Здесь } \sigma_i(e_i) \text{ - зависимость интенсивности напряжений от интенсивности деформаций.}$$

#### Вариационная формулировка задачи

Для получения исходных уравнений используем вариационный принцип Био [41]:

$$\delta V + \delta D - \delta K = \iint_A (\bar{F}_0 \delta \bar{u}_0 - \theta \bar{n} \delta \bar{S}) dA, \quad (6)$$

здесь  $\delta V$ ,  $\delta D$ ,  $\delta K$  - вариации обобщенной свободной энергии, диссипативной функции и кинетической энергии соответственно;  $\bar{F}_0$ ,  $\bar{u}_0$  - поверхностная сила и перемещение;  $\bar{n}$  - внешняя нормаль;  $A$  - ограничивающая тело поверхность. Вектор смещения энтропии  $\bar{S}$  связан с приращением энтропии  $s$ , в единице объема, по закону [41]:

$$s = -\text{div} \bar{S} = -\sum_i \frac{\partial S_i}{\partial x_i}.$$

Для понижения кратности интегралов в (6) проинтегрируем неиспользованные члены по  $x_3$  от  $-h/2$  до  $h/2$ . Пренебрегая членами  $\dot{u}_1, \dot{u}_2$ , учитывая (1) и (3) и то, что  $\sigma_{33} = 0$ , получим:

$$\delta K = -\rho h \iint \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} \delta u_3 dx_1 dx_2, \quad (7)$$

$$\iint \sum \sigma_{ij} \delta_{ij} dx_1 dx_2 dx_3 = \\ = \iint_A (T_{11} \delta \varepsilon_{11} + T_{22} \delta \varepsilon_{22} + T_{12} \delta \varepsilon_{12}) dx_1 dx_2 + \\ + \iint_A (M_{11} \delta \chi_{11} + M_{22} \delta \chi_{22} + M_{12} \delta \chi_{12}) dx_1 dx_2, \quad (8)$$

$$\iint_A \bar{F}_0 \delta \bar{u}_0 dA = \iint_A (q - \rho h \varepsilon \frac{\partial w}{\partial t}) \delta w dx_1 dx_2 + \\ + \int_0^b T_{11}^0 \delta u_1 dx_2 + \int_0^a T_{22}^0 \delta u_2 dx_1 + \int_0^a T_{12}^0 \delta u_1 dx_1 + \int_0^b T_{12}^0 \delta u_2 dx_2, \quad (9)$$

здесь  $\varepsilon$  – коэффициент демпфирования среды;  $q$  – интенсивность поперечной нагрузки.

Преобразуем первый интеграл справа в (8):

$$\begin{aligned} & \iint_A (T_{11}\delta\varepsilon_{11} + T_{22}\delta\varepsilon_{22} + T_{12}\delta\varepsilon_{12}) dx_1 dx_2 = \\ & = \delta \iint_A (T_{11}\varepsilon_{11} + T_{22}\varepsilon_{22} + T_{12}\varepsilon_{12}) dx_1 dx_2 - \\ & - \iint_A (\varepsilon_{11}\delta T_{11} + \varepsilon_{22}\delta T_{22} + \varepsilon_{12}\delta T_{12}) dx_1 dx_2. \end{aligned} \quad (10)$$

Из полученных соотношений можно вывести динамические уравнения связанной нелинейной задачи теории пологих оболочек. Уравнения могут быть получены в двух видах: в перемещениях и в смешанной форме. Для получения численных результатов используем второй вид динамических уравнений – уравнений в смешанной форме.

**Дифференциальные уравнения теории гибких геометрически и физически нелинейных микрооболочек в смешанной форме**

Для получения исходных дифференциальных уравнений в смешанной форме вводим функцию усилий  $F$  известным образом.

Проводя в преобразованном выражении (8) интегрирование по частям и варьирование, учитывая то, что контурные интегралы в (9) сократятся с контурными интегралами, полученными в ходе преобразования (10), и учитывая (7), мы от вариационного принципа (6) переходим к системе из трех дифференциальных уравнений: уравнения теплопроводности, уравнения движения микрооболочки и уравнения совместности деформаций:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_3^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t}; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & D\nabla^4 u_3 - L(u_3, F) - \nabla_k^2 F + \nabla^2 (M_T + \Delta_T M) - \\ & - \frac{\partial^2 (\Delta M_{11})}{\partial x_1^2} - \frac{\partial^2 (\Delta M_{22})}{\partial x_2^2} - 2 \frac{\partial^2 (\Delta M_{12})}{\partial x_1 \partial x_2} - \\ & - q + \rho h \left( \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial u_3}{\partial t} \right) = 0; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{Eh} \nabla^4 F = -\nabla_k^2 u_3 - \frac{1}{2} L(u_3, u_3) + \\ & + \frac{1}{Eh} \left[ \frac{\partial^2 (\Delta T_{11} - \nu \Delta T_{22})}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 (\Delta T_{22} - \nu \Delta T_{11})}{\partial x_1^2} - 2(1 + \nu) \frac{\partial^2 (\Delta T_{12})}{\partial x_1 \partial x_2} - \right. \\ & \left. - (1 - \nu) \nabla^2 (N_T + \Delta_T T) \right], \end{aligned} \quad (13)$$

где  $\alpha = \frac{k_T}{\rho}$  – коэффициент температуропроводности;  $L(*, *)$  – известные нелинейные операторы. Подчеркнутые слагаемые являются членами, учи-

тывающими физическую нелинейность материала. При их отбрасывании система уравнений (11)–(13) описывает физически линейную связанную задачу термоупругости гибких пологих микрооболочек в смешанной форме в температурном поле. К полученной системе уравнений необходимо присоединить начальные и граничные условия.

**Безразмерные дифференциальные уравнения теории гибких пологих микро оболочек с учетом связанности полей температуры и деформации**

Искомую систему дифференциальных уравнений (11)–(13), используя теорию подобия и размерности, приводим к безразмерному виду с помощью:

$$\begin{aligned} \bar{x}_1 &= \frac{x_1}{a}, \quad \bar{x}_2 = \frac{x_2}{b}, \quad \bar{x}_3 = \frac{x_3}{h}, \\ \bar{u}_3 &= \frac{u_3}{h}, \quad \lambda = \frac{a}{b}, \quad \bar{\varepsilon} = \varepsilon \frac{h^2}{\alpha}, \\ k_1 &= k_1 \frac{a^2}{h}, \quad \bar{k}_2 = k_2 \frac{b^2}{h}, \quad \bar{F} = \frac{F}{Eh^3}, \\ \bar{q} &= q \frac{a^2 b^2}{Eh^4}, \quad \bar{t} = t \frac{\alpha}{h^2}, \quad \chi = \frac{a^2 b^2 \rho \alpha^2}{Eh^6}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\bar{q}_T = q_T \frac{abh_T}{hk_T}, \quad \bar{\theta} = \theta \frac{\alpha_T ab}{h^2},$$

$$\Delta \bar{T}_{ij} = \Delta T_{ij} \frac{ab}{Eh^3}, \quad \Delta \bar{M}_{ij} = \Delta M_{ij} \frac{ab}{Eh^4}.$$

Система уравнений (16)–(18) при помощи преобразования (19) приводится к безразмерному виду (черточки над безразмерными переменными для сокращения записи опущены):

$$\frac{h^2}{a^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_1^2} + \frac{h^2}{b^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_3^2} = \frac{\partial \theta}{\partial t}; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{12(1-\nu^2)} \times \\ & \times (\lambda^{-2} \frac{\partial^4 u_3}{\partial x_1^4} + 2 \frac{\partial^4 u_3}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + \lambda^2 \frac{\partial^4 u_3}{\partial x_2^4}) - L(u_3, F) - \\ & - \nabla_k^2 F + \lambda^{-1} \frac{\partial^2 (M_T + \Delta_T M)}{\partial x_1^2} + \lambda \frac{\partial^2 (M_T + \Delta_T M)}{\partial x_2^2} - \\ & - \lambda^{-1} \frac{\partial^2 (\Delta M_{11})}{\partial x_1^2} - \lambda \frac{\partial^2 (\Delta M_{22})}{\partial x_2^2} - \\ & - 2 \frac{\partial^2 (\Delta M_{12})}{\partial x_1 \partial x_2} - q + \chi \left( \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial u_3}{\partial t} \right) = 0; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \lambda^{-2} \frac{\partial^4 F}{\partial x_1^4} + 2 \frac{\partial^4 F}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + \lambda^2 \frac{\partial^4 F}{\partial x_2^4} + \\ & + (1 - \nu) \left[ \lambda^{-1} \frac{\partial^2 (N_T + \Delta_T T)}{\partial x_1^2} + \lambda \frac{\partial^2 (N_T + \Delta_T T)}{\partial x_2^2} \right] + \\ & + \nabla_k^2 u_3 + \frac{1}{2} L(u_3, u_3) - \lambda^{-1} \frac{\partial^2 (\Delta T_{22} - \nu \Delta T)}{\partial x_1^2} - \end{aligned}$$

$$-\lambda \frac{\partial^2 (\Delta T_{11} - \nu \Delta T_{22})}{\partial x_2^2} + 2(1 + \nu) \frac{\partial^2 (\Delta T_{12})}{\partial x_1 \partial x_2} = 0. \quad (17)$$

В качестве начальных условий примем нулевое распределение прогибов и скоростей прогиба оболочки, в начальный момент времени  $t=0$ :

$$u_3 \Big|_{t=0} = \frac{\partial u_3}{\partial t} \Big|_{t=0} = \theta \Big|_{t=0} = 0. \quad (18)$$

Граничным условием для уравнения теплопроводности (15) является полная теплоизоляция оболочки:

$$\frac{\partial \theta}{\partial x_3} \Big|_{x_3=0,5} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial n} = 0, \quad (19)$$

где  $n$  – нормаль к границе области  $\Omega$ .

В качестве граничных условий для (16), (17) используем условия шарнирного опирания на гибкие нерастяжимые (несжимаемые) в касательной плоскости ребра.

$$\begin{aligned} u_3 = 0, \quad M_{22} = 0, \quad \varepsilon_{11} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon_{11}}{\partial x_2} - \frac{\partial \varepsilon_{12}}{\partial x_1} = 0 \\ \text{при } x_2 = 0, \quad x_2 = b, \\ u_3 = 0, \quad M_{11} = 0, \quad \varepsilon_{22} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon_{22}}{\partial x_1} - \frac{\partial \varepsilon_{12}}{\partial x_2} = 0 \\ \text{при } x_1 = 0, \quad x_1 = a. \end{aligned} \quad (20)$$

#### Метод решения задачи нелинейной динамики гибких физически нелинейных прямоугольных в плане пологих оболочек

Уравнения в частных производных (15)–(20) сводятся к задаче Коши и к системе алгебраических уравнений относительно  $F$  методом конечных разностей с аппроксимацией  $O(h^2)$  по пространственным координатам.

При решении системы уравнений был использован следующий алгоритм. Используя найденные на предыдущем шаге по времени значения  $w_{ij}$ ,  $\Delta T_{11ij}$ ,  $\Delta T_{22ij}$ ,  $\Delta T_{12ij}$ , решалась система алгебраических уравнений относительно величин  $F_{ij}$  методом Гаусса. Полученные величины  $F_{ij}$  и найденные на предыдущем шаге по времени значения  $\Delta M_{11ij}$ ,  $\Delta M_{22ij}$ ,  $\Delta M_{12ij}$  подставлялись в дифференциальные уравнения (16), (17), после чего производилось интегрирование этих уравнений по времени методом Рунге–Кутты 4-го порядка.

Далее в каждой точке тела вычисляется интенсивность деформаций

$$e_i = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{(e_{11} - e_{22})^2 + (e_{22} - e_{33})^2 + (e_{33} - e_{11})^2 + 3e_{12}^2},$$

и при помощи известной для данного материала зависимости  $\sigma_i(e_i)$  определяется значение интенсивности напряжений  $\sigma_i$ . Функция сдвига

$$\gamma(e_i) = \frac{\sigma_i(e_i)}{3Ge_i}$$

используется для вычисления нелинейных членов, которые будут использованы для расчетов на следующем шаге по времени.

На первом шаге по времени, вследствие начальных условий, все нелинейные члены равны нулю.

#### Численные результаты

Исследуем нелинейные колебания геометрически и физически нелинейных пологих оболочек на прямоугольном плане при действии поперечной знакопеременной нагрузки. Рассмотрим колебания диссипативной системы ( $\varepsilon=1$ ) в виде квадратной в плане ( $\lambda=a/b=1$ ) сферической оболочки, совершающей колебания под действием равномерно распределенной поперечной нагрузки интенсивности  $q=q_0 \sin \omega_p t$ .

Оболочка изготовлена из сплава АМц и имеет следующие геометрические и физические параметры:  $a=b=0,1$  м,  $h=0,89 \cdot 10^{-3}$  м,  $E=69$  ГПа,  $\nu=0,3$ ,  $\rho=2800$  кг/м<sup>3</sup>,  $a/h=10$ . Зависимость  $\sigma_i(e_i)$  аппроксимирована билинейной диаграммой:

$$\sigma_i = Ee_i, \quad e_i \leq e_s, \quad e_s = 1,35 \cdot 10^{-3}; \quad E^* / E = 0,4478.$$

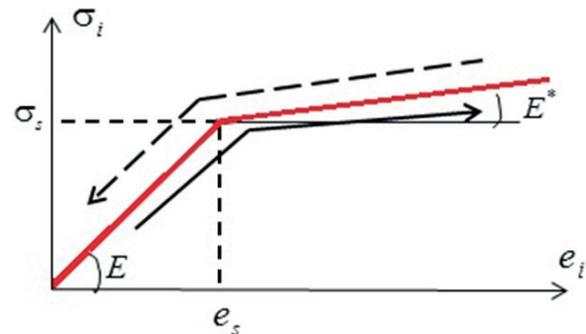


Рис. 2. Диаграмма  $\sigma_i(e_i)$

Fig. 2. Diagram  $\sigma_i(e_i)$

Возникновение остаточных деформаций не учитывается, т. е. рассматривается физическая нелинейность, при которой траектории нагрузки (сплошная линия со стрелкой) и разгрузки (пунктирная линия со стрелкой) совпадают (рис 2). До настоящего времени не исследован вопрос о связи динамического критерия потери устойчивости с характером колебаний и видом траектории нагрузка–разгрузка.

Для изучения характера колебаний была взята оболочка под действием знакопеременной нагрузки с частотой, совпадающей с собственной линейной частотой колебаний оболочки, и частотами, находящимися в окрестностях собственной линейной частоты. Определить аналитически частоту собственных колебаний в нелинейной задаче довольно затруднительно. Для получения частоты собственных линейных колебаний  $\omega_0$  применялся метод Фаэдо–Галеркина.

Исследования показали, что качественная картина процесса колебаний для всех точек оболочки практически одинакова, поэтому дальнейший анализ отнесен к ее центральной точке  $u_3(0,5;0,5)$ . Описывая переходные процессы в движениях оболочки, будем устанавливать вид ее колебаний с помощью анализа графиков зависимостей «нагруз-

ка-прогиб», «нагрузка – интенсивность деформаций», «нагрузка–усилие». Все зависимости строились в одни и те же моменты времени, соответствующие максимальным прогибам оболочки. Распределения интенсивности деформаций для различных колебательных режимов в моменты времени, соответствующие максимальным прогибам оболочки, приведены на рисунках. Так как распределения прогибов по поверхности оболочки в момент достижения своего максимального значения при регулярных колебательных режимах качественно похожи, то на рисунках они не приводятся.

Проводилось сравнение поверхности изгибания в различные моменты времени и интенсивности деформаций в эти же моменты времени на верхней поверхности оболочки  $x_1=x_2=0,5$ ,  $x_3=-0,5$ . Остановимся на примере для оболочечной конструкции  $k_1=k_2=24$  с граничными условиями (25). На рис. 3, 4 выделены небольшие интервалы времени в зависимости  $w(t)$  и в указанных точках построены распределения прогибов  $w$  по плану оболочки и распределение интенсивности деформаций  $e_i$ . Легко заметить, что при действии нагрузок, когда колебания

еще сохраняют регулярную форму (рис. 3), распределения  $w(x_1, x_2)$  и  $e_i(x_1, x_2)$  остаются достаточно гладкими, хотя распределение  $e_i$  всегда, даже при минимальных нагрузках, остается более сложным, чем для  $w$ . Как только колебания переходят в хаотический режим, форма распределения  $w$  и  $e_i$  по плану резко усложняется (рис. 3), образуется большое количество зон местных экстремумов. Таким образом, совместный анализ показал, что основной вклад в соотношение для интенсивности деформации оказывает изменение функции прогиба и ее второй производной, т. е. изгибные деформации.

Рассмотрим оболочку с безразмерным параметром кривизны  $k_1=k_2=18$  и частотой вынуждающих колебаний  $\omega_p$  в пределах [16;21]. Собственная линейная частота колебаний  $\omega_0 \approx 17,6$ .

Зафиксировав частоту вынуждающих колебаний, будем изменять величину нагрузки до появления хаотических эффектов.

При небольших нагрузках колебания носят периодический характер. Начиная с  $q_0=10$  происходит разрушение периодических колебаний. Амплитуда колебаний оболочки при этом резко возрастает (рис. 5, 4) (здесь и в дальнейшем на рисунках

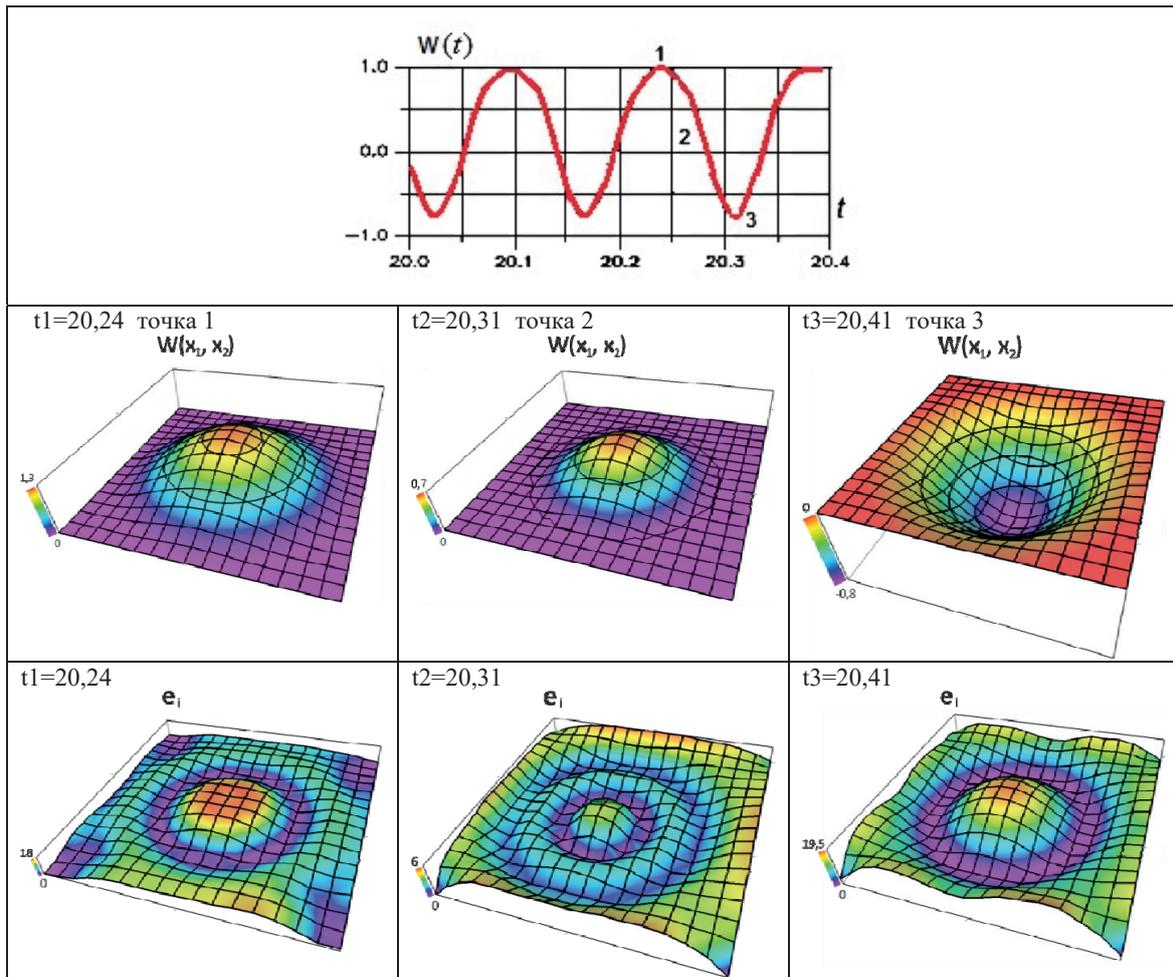


Рис. 3. Зависимость  $w(t)$ , распределения  $w(x_1, x_2)$  и  $e_i(x_1, x_2)$  для случая  $k_1=k_2=24$ ;  $\omega_p=14$ ,  $q_0=65$

Fig. 3. Dependence  $w(t)$ , distributions  $w(x_1, x_2)$  and  $e_i(x_1, x_2)$  for the case  $k_1=k_2=24$ ;  $\omega_p=14$ ,  $q_0=65$

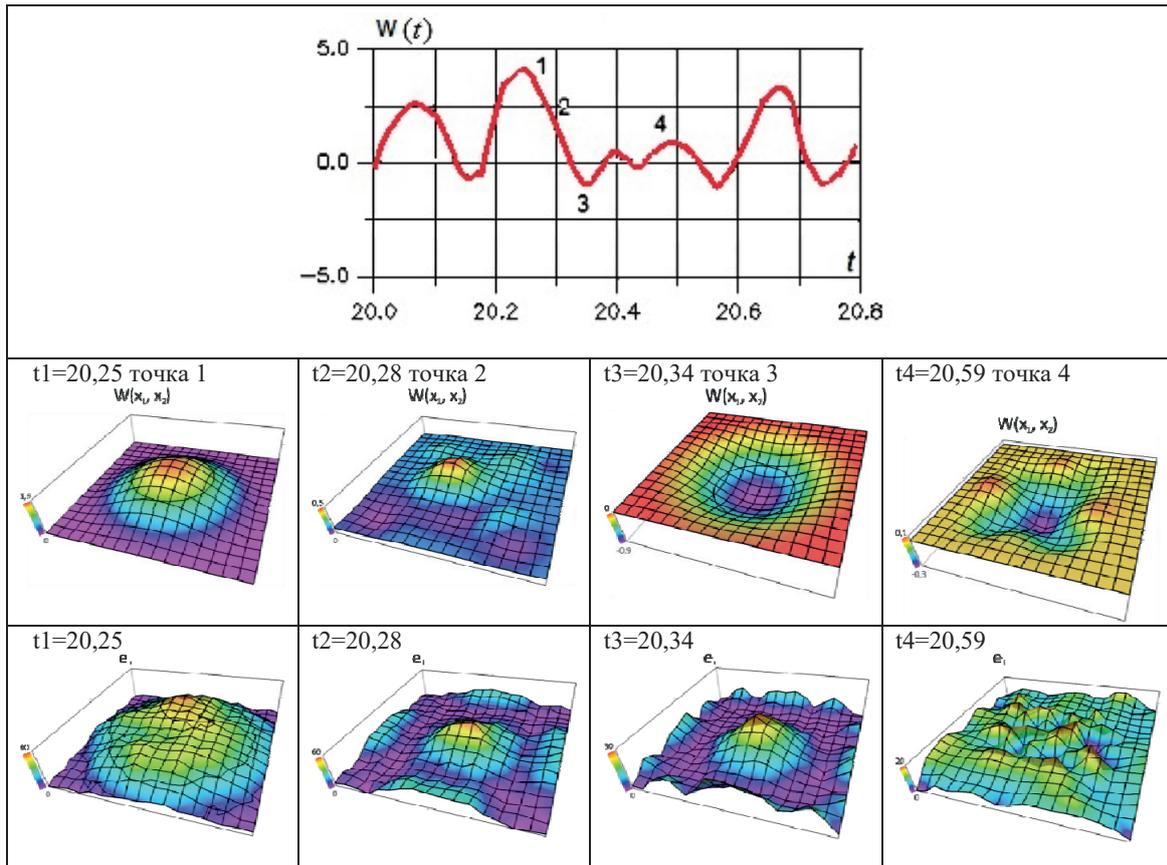


Рис. 4. Зависимость  $w(t)$ , распределения  $w(x_1, x_2)$  и  $e_i(x_1, x_2)$  для случая  $k_1=k_2=24$ ;  $\omega_p=14$ ,  $q_0=200$

Fig. 4. Dependence  $w(t)$ , distributions  $w(x_1, x_2)$  and  $e_i(x_1, x_2)$  for the case  $k_1=k_2=24$ ;  $\omega_p=14$ ,  $q_0=200$

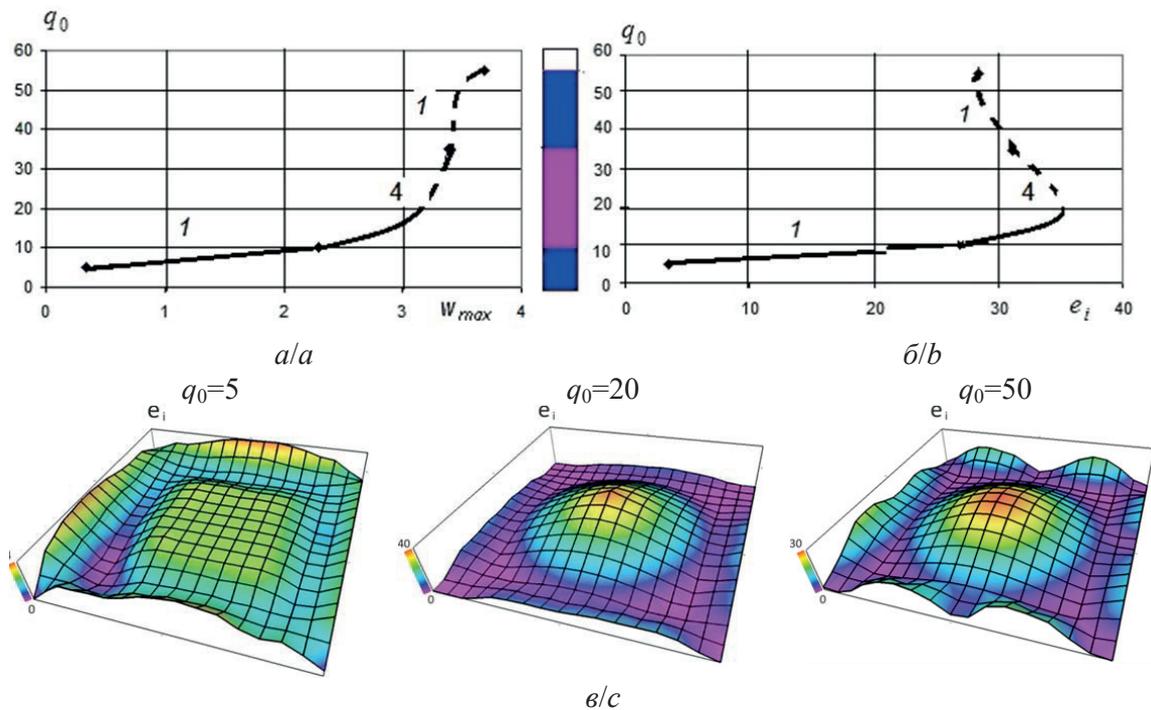


Рис. 5. Зависимость а) нагрузка – максимальный прогиб; б) нагрузка – интенсивность деформаций; в) распределение интенсивности деформаций по плану оболочки при частоте возбуждения  $\omega_p=16$

Fig. 5. Dependence: a) load – maximum deflection; b) load – deformation intensity; c) distribution of deformation intensity within the shell, at excitation frequency  $\omega_p=16$

будут использованы следующие обозначения: 1 – периодические колебания (■); 2 – периодические колебания в режиме бифуркации удвоения периода (■); 3 – периодические колебания в режиме бифуркации утроения периода (■); 4 – двухчастотные квазипериодические колебания (■); 5 – хаотические колебания (□). При  $q_0=12$  происходит полная смена режима колебаний на квазипериодические. С увеличением амплитуды колебаний  $q_0$  происходит обратная перестройка системы. Рост прогибов оболочки значительно замедляется, интенсивность деформаций при этом снижается (рис. 5). Начиная с квазипериодического режима зона наибольшей интенсивности деформаций концентрируется в центре плана оболочки. При  $q_0=40$  система полностью возвращается в периодический режим. Система переходит в хаос при  $q_0=57$ . На рис. 5–7 пунктирные линии соответствуют режимам колебаний при разгрузке (рис. 2), а сплошные линии – процессу активного нагружения.

Рассмотрим оболочку с частотой вынуждающих колебаний, совпадающей с собственной частотой колебаний,  $\omega_p = \omega_0 = 17,6$ .

В данном случае периодический режим сохраняется до  $q_0=70$ . При  $q_0=62$  происходит смена режима колебаний. Прогибы оболочки продолжают возрастать (рис. 6), а интенсивность деформаций начинает снижаться (рис. 6). При дальнейшем увеличении нагрузки происходит качественная перестройка режима колебаний. Наблюдается значительное возрастание амплитуды колебаний, но интенсивность деформаций при этом продолжает падать. При  $q_0=95$  начинается разрушение квазипериодических колебаний, что приводит к наступле-

нию хаоса. Происходит перераспределение зон наибольшей интенсивности деформаций с центра плана оболочки на ее углы.

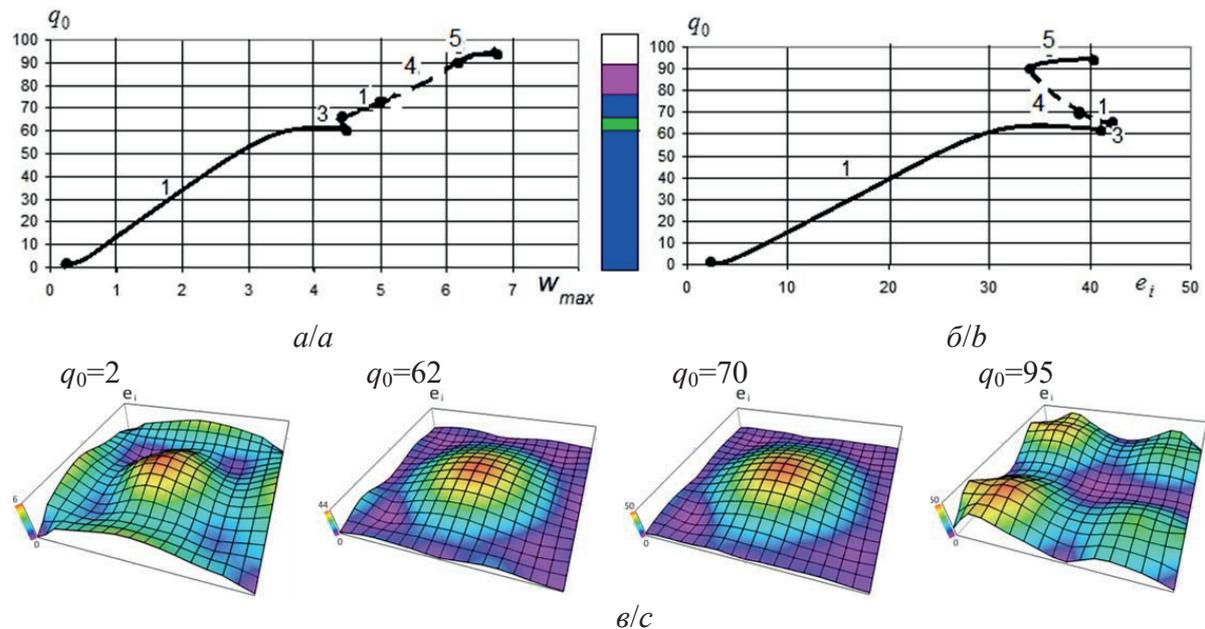
Увеличивая частоту до  $\omega_p=19$ , наблюдаем, что до величины нагрузки  $q_0=80$  система находится в режиме периодических колебаний (1-го типа). Интенсивность деформаций и амплитуда колебаний оболочки плавно возрастают. Хотя прогибы оболочки продолжают возрастать, рост интенсивности деформаций прекращается.

При амплитуде  $q_0=113$  происходит смена режима колебаний на квазипериодические. Об этом свидетельствуют все основные характеристики. При дальнейшем увеличении нагрузки происходит разрушение квазипериодического режима и наступает хаос. С наступлением квазипериодичности отмечается резкий рост прогибов и интенсивности деформаций (рис. 7). Зоны наименьшей интенсивности деформаций находятся на осях симметрии оболочки.

### Заключение

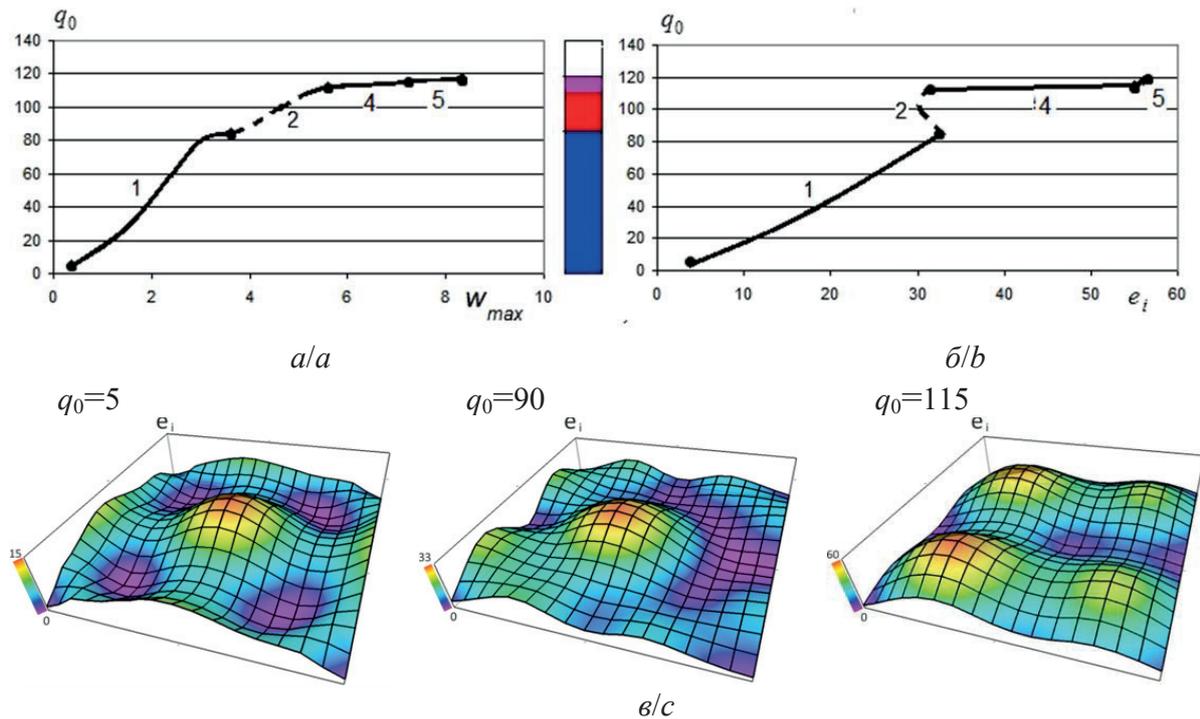
Обобщая выше приведенные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Переходные процессы зависят от кривизны оболочки, частоты вынуждающих колебаний и некоторых других параметров, т. е. единого сценария перехода нет.
2. В случае шарнирного опирания при кривизнах  $k_1=k_2=18$  в основе схемы перехода лежит сценарий типа Рюэля–Такенса, т. е. через разрушение квазипериодических колебаний. Но при некоторых вынуждающих частотах наблюдается включение в указанную схему элементов



**Рис. 6.** Зависимости: а) нагрузка – максимальный прогиб; б) нагрузка – интенсивность деформаций; в) распределение интенсивности деформаций по плану оболочки, при частоте возбуждения  $\omega_p=17,6$

**Fig. 6.** Dependences: а) load – maximum deflection; б) load – deformation intensity; в) distribution of deformation intensity within the shell, at excitation frequency  $\omega_p=17,6$



**Рис. 7.** Зависимости: а) нагрузка – максимальный прогиб; б) нагрузка – интенсивность деформаций; в) распределение интенсивности деформаций по плану оболочки, при частоте возбуждения  $\omega_p=19$

**Fig. 7.** Dependences: a) load – maximum deflection; b) load – deformation intensity; c) distribution of deformation intensity within the shell, at excitation frequency  $\omega_p=19$

других сценариев (например, явление перемежаемости и бифуркации периодических колебаний).

- Для шарнирно опертой оболочки с  $k_1=k_2=24$  наряду со схемой Рюэля–Такенса (с небольшими отклонениями от нее) при некоторых значе-

ниях вынуждающей частоты переход к хаотическому движению происходит через серию бифуркаций периодических колебаний, но без удвоения периода.

Работа выполнена при поддержке гранта РФ № 16-19-10290.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Wiener N. Cybernetics: Control and Communication in the Animal and the Machine 2<sup>nd</sup> ed., 1961. – Cambridge, Mass.: the MIT Press. – 212 p.
- Christiansen D., Alexander C.K., Jurgen R.K. Standard book of electronic engineering. – New York: McGraw-Hill Professional, 2004. – 220 p.
- Нурилин Ю.Р., Пяташев Е.Н. Микротехнологии и микроэлектромеханические системы – перспективное научно-инновационное направление // Компетентность. – 2006. – № 5–6. – С. 3–9.
- Люминарский И.Е. Разработка научных методов расчета нестационарного взаимодействия тонкостенных элементов с жесткими односторонними связями и математических моделей волновых передач: дисс. д-ра наук. – М., 2009. – 365 с.
- Timoshenko S.P. Analysis of bimetal thermostat // Journal of the optical society of America and review of the Scientific Instruments. – 1925. – V. 11. – № 3. – P. 233–255.
- Wittrick W.H., Myers D.M., Blumden W.H. Stability of bimetallic disk // Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics. – 1953. – V. 6. – № 1. – С. 15–31.
- Григолюк Э.И. О перемещениях пологих термобиметаллических полос // Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. – 1950. – Вып. 11. – № 1. – С. 40–45.
- Григолюк Э.И. О равновесии и устойчивости биметаллических полос // Инженерный сборник АН СССР. – 1950. – Т. 7. – С. 89–97.
- Григолюк Э.И. Температурные напряжения в круглой сплошной биметаллической пластинке // Труды каф. Сопромат МВТУ. – 1947. – Т. 3. – С. 55–69.
- Григолюк Э.И. Тонкие биметаллические оболочки и пластины // Инженерный сборник. – 1953. – Т. XVII. – С. 69–120.
- Григолюк Э.И. Уравнения осесимметричных биметаллических упругих оболочек // Инженерный сборник. – 1954. – Т. XVIII. – С. 89–98.
- Григолюк Э.И., Кабанов В.В. Устойчивость оболочек. – М.: Наука, 1978. – 360 с.
- Григолюк Э.И., Шалашилин В.И. Проблемы нелинейного деформирования: метод продолжения решения по параметру в нелинейных задачах механики твердого деформируемого тела. – М.: Наука, 1988. – 232 с.
- Гаврюшин С.С. Алгоритмы исследования больших прогибов гибких оболочек методами продолжения и их численная реализация // Труды XVI Межд. конф. по теории оболочек и пластин. – Н.-Новгород, 1993. – С. 80–89.
- Гаврюшин С.С. Разработка методов расчета и проектирования упругих оболочечных конструкций приборных устройств: дисс. ... д-ра наук. – М., 1994. – 316 с.

16. Гаврюшин С.С. Численное моделирование больших прогибов осесимметричного биметаллического купола при термосило-вом нагружении // Труды МГТУ № 566, «Математическое моделирование сложных технических систем». – М.: Изд-во МГТУ, 1995. – С. 49–69.
17. Гаврюшин С.С. Численное моделирование и анализ процессов нелинейного деформирования гибких оболочек // Изв. АН СССР. МТТ. – 1994. – № 1. – С. 109–119.
18. Гаврюшин С.С., Барышников О.О., Борискин О.Ф. Численные методы в проектировании гибких упругих элементов. – Калуга: ГУП «Облиздат», 2001. – 200 с.
19. Расчет перспективных конструкций актюаторов / С.С. Гаврюшин, А. Макмиллан, А.С. Николаева, Т.Б. Подкопаева // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2015. – № 8 (665). – С. 73–78.
20. Kapitaniak T. Strange non-chaotic transients // Journal of Sound and Vibration. – 1992. – V. 158. – № 1. – P. 189–194.
21. Holms P.J. A nonlinear oscillator with a strange attractor // The Philosophical Transactions of the Royal Society, Ser. A. – 1979. – V. 292. – № 1394. – P. 419–448.
22. Moon F.C. Experimental models for strange attractor vibrations in elastic systems // New approaches to non-linear problems in dynamics: Proc. Conf. – Pacific Grove, Calif., 1979. – Philadelphia, Pa.: SIAM, 1980. – P. 487–495.
23. Yagasaki Takao. Bifurcations and chaos in quasi-periodically forced beam. Theory, simulation and experiment // Journal of Sound and Vibration. – 1995. – V. 183. – № 1. – P. 1–31.
24. Abhyankar N.S., Hall E.K., Hanagud S.V. Chaotic vibrations of beams: numerical solution of partial differential equations // Journal of Applied Mechanics. – 1993. – V. 60. – № 1. – P. 167–174.
25. Lepik Ü. Axisymmetric vibrations of elastic-plastic cylindrical shells by Galerkin's method // International Journal of Impact Engineering. – 1996. – V.18. – № 5. – P. 489–504.
26. Han Qiang, Hu Haiyan, Yang Guitong. A study of chaotic motion in elastic cylindrical shells // European Journal of Mechanics. A. – 1999. – V. 2. – № 18. – P. 351–360.
27. Shahab S., Mirzaeifar R., Bahai H. Coupled modification of natural frequencies and buckling loads of composite cylindrical panels // International Journal of Mechanical Sciences. – 2009. – V. 51. – № 9–10. – P. 708–717.
28. Об устойчивости анизотропных оболочек вращения положительной и отрицательной гауссовых кривизн / А.В. Борисейко, Н.Б. Жукова, Н.П. Семенюк, В.М. Трач // Прикладная механика. – 2010. – Т. 3. – № 46. – С. 30–40.
29. Панкратов В.М., Барулина М.А. Сравнительный анализ различных подходов к расчету собственных частот чувствительных элементов МЭМС-гироскопов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т. 18. – № 3. – С. 196–205.
30. Deterministic Chaos in One Dimensional Continuous Systems / J. Awrejcewicz, V.A. Krysko, I.V. Papkova, A.V. Krysko. – Singapore: World Scientific, 2016. – 576 p.
31. Мицкевич С.А., Захарова А.А., Крысько А.В. Установившиеся колебания балочных МЭМС-резонаторов в вязкой среде при действии локальной ударной нагрузки // Компьютерные науки и информационные технологии: Материалы Международной научной конференции. – Саратов, 2016. – С. 277–280.
32. Динамика гибких балок при действии ударных нагрузок с учетом белого шума / А.О. Синичкина, Е.Ю. Крылова, С.А. Мицкевич, В.А. Крысько // Проблемы прочности и пластичности. – 2016. – Т. 78. – № 3. – С. 280–288.
33. Нелинейная динамика вибрационных микромеханических гироскопов (ММГ). Ч. II. Расчет резонатора в виде балки с начальной неправильностью с учетом геометрической нелинейности / А.В. Крысько, М.В. Жигалов, С.А. Мицкевич, Н.А. Загнборода, В.В. Добриян, И.Е. Кутелов, В.А. Крысько // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 3. – № 1 (67). – С. 7–15.
34. Barulina M.A., Pankratov V.M., Krysko A.V. Mathematical Model of Motion of a Rotary Micromechanical Gyro Sensing Element as an Orthotropic Round Plate Clamped at its Center // 24<sup>th</sup> Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – Saint Petersburg, Russia, 29–31 May 2017. – P. 399–404.
35. Awrejcewicz J., Krysko A.V. Wavelet-based analysis of parametric vibrations of flexible plates // International Applied Mechanics. – 2003. – V. 39. – № 9. – P. 997–1028.
36. Нелинейная динамика сферических гидроакустических приборов, применяемых в нефтегазовой промышленности / С.А. Мицкевич, И.В. Папкова, А.А. Захарова, А.В. Крысько // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2016. – Т. 327. – № 11. – С. 17–23.
37. Noisy contact interactions of multi-layer mechanical structures coupled by boundary conditions / J. Awrejcewicz, V.A. Krysko-jr, T.V. Yakovleva, V.A. Krysko // Journal of Sound and Vibration. – 2016. – V. 369. – P. 77–86.
38. Awrejcewicz J., Krysko-jr. V.A., Yakovleva T.V., Krysko V.A. Alternating chaos versus synchronized vibrations of interacting plate with beams // International Journal of Non-Linear Mechanics. – January 2017. – V. 88. – P. 21–30.
39. Власов В.З. Избранные труды. Общая теория оболочек. Т. 1. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. – 528 с.
40. Kauderer H. Nichtlineare Mechanik. – Berlin: Springer-Verlag, 1958. – 684 p.
41. Biot M.A. Thermoelasticity and irreversible thermodynamics // Journal of Applied Physics. – 1956. – V. 27. – P. 240–253.

Поступила 14.09.2017 г.

#### Информация об авторах

**Мицкевич С.А.**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и системного анализа Физико-технического института Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина.

**Жигалов М.В.**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и моделирования Физико-технического института Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина.

**Захарова А.А.**, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой инженерной графики и промышленного дизайна Физико-технического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Крысько В.А.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой математики и моделирования Физико-технического института Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина.

UDC 539.3

## NONLINEAR DYNAMICS OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEM RESONATORS IN THE FORM OF RECTANGULAR-PLAN SPHERICAL SHELLS TAKING INTO ACCOUNT GEOMETRICAL AND PHYSICAL NON-LINEARITY

**Svetlana A. Mitskevich**<sup>1</sup>,  
svetlana.mitskevich@gmail.com

**Maksim V. Zhigalov**<sup>1</sup>,  
zhigalovm@yandex.ru

**Alena A. Zakharova**<sup>2</sup>,  
zaa@tpu.ru

**Vadim A. Krysko**<sup>1</sup>,  
tak.@san.ru

<sup>1</sup> Yuri Gagarin Saratov State Technical University,  
77, Politechnicheskaya street, Saratov, 410054, Russia.

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance.** Due to the fact that mineral exploration is a high-tech process, the development of methods of constructing new mathematical models, most closely taking into account the true elements of microelectromechanical systems, is important. Microelectromechanical system is a promising instrument of modern Microsystems technology, intensively and dynamically developing scientific and technical direction. The systems are characterized by the unique small weight and size, low power consumption, capable of functioning in harsh environments and the cost, which is several times lower than that of their traditional analogues.

**The main aim** of the study is to construct the mathematical model, which would reflect more complete the real operation of microelectromechanical systems devices. To do this, one should consider large displacements, stress-strain nonlinear dependence, impact load, temperature field. To design the numerical methods that will allow us to consider a distributed mechanical structure as a system with infinite number degrees of freedom; to analyze the nature of complex nonlinear oscillations of the developed mathematical models; to identify the areas of unstable solution of the considered elements of microelectromechanical systems devices, associated with chaotic oscillations.

**The methods:** variational methods, methods of mathematical physics, computational methods to reduce the equations to the Cauchy problem – the method of finite differences of the 2<sup>nd</sup> order of accuracy; solution of the Cauchy problem by the methods of Runge–Kutta; methods of qualitative study of nonlinear dynamics: Fourier transform, wavelet analysis, Poincare section, phase portrait.

**The results and conclusions.** It is established that the transients depend on the geometrical and physical parameters of the shell, the frequency of the driving oscillations and other parameters, i. e. there is no a unified scenario of transition from harmonic oscillations to chaotic ones. The character of oscillations depends substantially on the intensity of deformation. The authors have revealed that the most common scenario is the Ruelle–Takens one. For some values of curvature the modifications of this script were obtained.

### Key words:

Nonlinear dynamics, shell, geometric nonlinearity, physical nonlinearity.

*The research was supported by the RSF grant no. 16–19–10290.*

### REFERENCES

1. Wiener N. *Cybernetics: Control and Communication in the Animal and the Machine*. 2<sup>nd</sup> ed. Cambridge, Mass., the MIT Press, 1961. 212 p.
2. Christiansen D., Alexander C.K., Jurgen R.K. *Standard book of electronic engineering*. New York, McGraw-Hill Professional, 2004. 220 p.
3. Nurilin Yu.R., Pyatyshev E.N. Microtechnology and microelectromechanical systems is a promising research and innovation direction. *Kompetentnost*, 2006, no. 5–6, pp. 3–9. In Rus.
4. Lyuminarskiy I.E. *Razrabotka nauchnykh metodov rascheta natsionarnogo vzaimodeystviya tonkostennykh elementov s zheshtimi odnostoronnimi svyazyami i matematicheskikh modeley volnovykh peredach*. Dis. Dokt. nauk [Development of scientific methods for calculating unsteady interaction of thin-walled elements with rigid unilateral constraints and mathematical models of the wave gear. Dr. Diss.]. Moscow, 2009. 365 p.
5. Timoshenko S.P. Analysis of bimetal thermostat. *Journal of the optical society of America and review of the Scientific Instruments*, 1925, vol. 11, no. 3, pp. 233–255.
6. Wittrick W.H., Myers D.M., Blumden W.H. Stability of bimetallic disk. *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 1953, vol. 6, no. 1, pp. 15–31.
7. Grigolyuk E.I. O peremeshcheniyakh pologikh termobimetallicheskih polos [On movement of gentle thermos-bimetallic strips]. *Trudy MVTU im. N. E. Baumana*, 1950, Iss. 11, no. 1, pp. 40–45.
8. Grigolyuk E.I. O ravnovesii i ustoychivosti bimetallicheskih polos [On equilibrium and stability of bimetallic poles]. *Inzhenernyy sbornik AN SSSR*, 1950, vol. 7, pp. 89–97.
9. Grigolyuk E.I. Temperaturnye napryazheniya v krugloy sploshnoy bimetallicheskoj plastinke [Thermal stresses in circular solid bimetal plate]. *Trudy kaf. Sopromat MVTU*, 1947, vol. 3, pp. 55–69.

10. Grigolyuk E.I. Tonkie bimetallicheskie obolochki i plastiny [Thin bimetallic shells and plates]. *Inzhenernyy sbornik*, 1953, vol. XVII, pp. 69–120.
11. Grigolyuk E.I. Uravneniya osesimmetrichnykh bimetallicheskiikh uprugikh obolochek [The equations of axisymmetric bimetallic elastic shells]. *Inzhenernyy sbornik*, 1954, vol. XVIII, pp. 89–98.
12. Grigolyuk E.I., Kabanov V.V. *Ustoychivost obolochek* [Stability of shells]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 360 p.
13. Grigolyuk E.I., Shalashilin V.I. *Problemy nelineynogo deformirovaniya: metod prodolzheniya resheniya po parametru v nelineynykh zadachakh mekhaniki tverdogo deformiruemogo tela* [Problems of nonlinear deformation: method of solution continuation by the parameter in nonlinear problems of mechanics of deformable bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 232 p.
14. Gavryushin S.S. Algoritmy issledovaniya bolshikh progibov gibkikh obolochek metodami prodolzheniya i ikh chislennaya realizatsiya [Algorithms for analysis of large deflections of flexible shells continue methods and their numerical implementation]. *Trudy XVI Mezhd. konf. po teorii obolochek i plastin* [Proc. of the conference on the theory of shells and plates] N.-Novgorod, 1993. pp. 80–89.
15. Gavryushin S.S. *Razrabotka metodov rascheta i proektirovaniya uprugikh obolocheknykh konstruksiy pribornyykh ustroystv*. Dis. Dokt. nauk [Development of methods of calculation and design of elastic shell structures of equipment devices. Dr. Diss.]. Moscow, 1994. 316 p.
16. Gavryushin S.S. Chislennoe modelirovanie bolshikh progibov osesimmetrichnogo bimetallicheskogo kupola pri termosilovom nagruzhении [Numerical modeling of large deflections of axisymmetric bimetallic dome under thermal and force loadings]. *Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh sistem: Trudy MGTU № 566* [Mathematical modeling of complex engineering systems. MGTU Proc. no. 566]. Moscow, MGTU Publ., 1995. pp. 49–69.
17. Gavryushin S.S. Chislennoe modelirovanie i analiz protsessov nelineynogo deformirovaniya gibkikh obolochek [Numerical modeling and analysis of nonlinear processes of deformation of flexible shells]. *Mechanics of Solids*, 1994, no. 1, pp. 109–119.
18. Gavryushin S.S., Baryshnikova O.O., Boriskin O.F. *Chislennyye metody v proektirovanii gibkikh uprugikh elementov* [Numerical methods in the design of flexible elastic elements]. Kaluga, Oblizdat Publ., 2001. 200 p.
19. Gavryushin S.S., Makmillan A., Nikolaeva A.S., Podkopayeva T.B. Calculations of Actuator Promising Designs. *Proceeding of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2015, no. 8 (665), pp. 73–78. In Rus.
20. Kapitaniak T. Strange non-chaotic transients. *Journal of Sound and Vibration*, 1992, vol. 158, no. 1, pp. 189–194.
21. Holms P.J. A nonlinear oscillator with a strange attractor. *The Philosophical Transactions of the Royal Society, Ser. A*, 1979, vol. 292, no. 1394, pp. 419–448.
22. Moon F.C. Experimental models for strange attractor vibrations in elastic systems. *New approaches to non-linear problems in dynamics. Proc. Conf.* Pacific Grove, Calif., 1979. Philadelphia, Pa., SIAM, 1980. pp. 487–495.
23. Yagasaki Takao. Bifurcations and chaos in quasi-periodically forced beam. Theory, simulation and experiment. *Journal of Sound and Vibration*, 1995, vol. 183, no. 1, pp. 1–31.
24. Abhyankar N.S., Hall E.K., Hanagud S.V. Chaotic vibrations of beams: numerical solution of partial differential equations. *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME*, 1993, vol. 60, no. 1, pp. 167–174.
25. Lepik Ü. Axisymmetric vibrations of elastic-plastic cylindrical shells by Galerkin's method. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, vol. 18, no. 5, pp. 489–504.
26. Han Qiang, Hu Haiyan, Yang Guitong. A study of chaotic motion in elastic cylindrical shells. *European Journal of Mechanics. A*, 1999, vol. 2, no. 18, pp. 351–360.
27. Shahab S., Mirzaeifar R., Bahai H. Coupled modification of natural frequencies and buckling loads of composite cylindrical panels. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2009, vol. 51, no. 9–10, pp. 708–717.
28. Boriseyko A.V., Zhukova N.B., Semenyuk N.P., Trach V.M. On the stability of anisotropic shells of revolution with positive and negative Gaussian curvatures. *International Applied Mechanics*, 2010, vol. 3, no. 46, pp. 30–40. In Rus.
29. Pankratov V.M., Barulina M.A. A comparative analysis of different approaches to calculating the natural frequencies of the sensitive elements of MEMS gyroscopes. *Mechatronics, automation, control*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 196–205. In Rus.
30. Awrejcewicz J., Krysko V.A., Papkova I.V., Krysko A.V. *Deterministic Chaos in One Dimensional Continuous Systems*. Singapore, World Scientific, 2016. 576 p.
31. Mitskevich S.A., Zakharova A.A., Krysko A.V. Ustanovivshiesya kolebaniya balochnykh mems-rezonatorov v vyzkoy srede pri deystvii lokalnoy udarnoy nagruzki [Steady-state vibrations of beam MEMS resonators in a viscous medium under the influence of a local shock loads]. *Kompyuternyye nauki i informatsionnyye tekhnologii. Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. [Computer sciences and information technologies. International conference]. Saratov, 2016. pp. 277–280.
32. Sinichkina A.O., Krylova E.Ysu., Mitskevich S.A., Krysko V.A. Dynamics of flexible beams under the action of shock loads taking into account white noise. *Journal Problems of Strength and Plasticity*, 2016, vol. 78, no. 3, pp. 280–288. In Rus.
33. Krysko A.V., Zhigalov M.V., Mitskevich S.A., Zagniboroda N.A., Dobriyan V.V., Kutepov I.E., Krysko V.A. Nonlinear dynamics of a vibratory micromechanical gyroscopes (MMG). P. II. Calculation of the resonator in the form of a beam with an initial irregularity taking into account the geometric nonlinearity. *Vestnik Saratov State Technical University*, 2012, vol. 3, no. 1 (67), pp. 7–15. In Rus.
34. Barulina M.A., Pankratov V.M., Krysko A.V. Mathematical Model of Motion of a Rotary Micromechanical Gyro Sensing Element as an Orthotropic Round Plate Clamped at its Center. *24<sup>th</sup> Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. Saint Petersburg, Russia, 29–31 May 2017. pp. 399–404.
35. Awrejcewicz J., Krysko A.V. Wavelet-based analysis of parametric vibrations of flexible plates. *International Applied Mechanics*, 2003, vol. 39, no. 9, pp. 997–1028.
36. Mitskevich S.A., Papkova I.V., Zakharova A.A., Krysko A.V. Nonlinear dynamics of spherical hydroacoustic devices used in oil and gas industry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 11, pp. 17–23. In Rus.
37. Awrejcewicz J., Krysko-jr. V.A., Yakovleva T.V., Krysko V.A. Noisy contact interactions of multi-layer mechanical structures coupled by boundary conditions. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, vol. 369, pp. 77–86.
38. Awrejcewicz J., Krysko-jr. V.A., Yakovleva T.V., Krysko V.A. Alternating chaos versus synchronized vibrations of interacting plate with beams. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, January 2017, vol. 88, pp. 21–30.
39. Vlasov V.Z. *Izbrannyye trudy. Obshchaya teoriya obolochek* [Selected works. General theory of shells]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Press, 1962. Vol. 1, 528 p.
40. Kauderer H. *Nichtlineare Mechanik* [Nonlinear mechanics]. Berlin, Springer-Verlag, 1958. 684 p.
41. Biot M.A. Thermoelasticity and irreversible thermodynamics. *Journal of Applied Physics*, 1956, vol. 27, pp. 240–253.

Received: 14 September 2017.

**Information about the authors**

*Svetlana A. Mitskevich*, Cand. Sc., associate professor, Yuri Gagarin Saratov State Technical University.

*Maksim V. Zhigalov*, Dr. Sc., professor, Yuri Gagarin Saratov State Technical University.

*Alena A. Zakharova*, Dr. Sc., professor, head of the department, National Research Tomsk Polytechnic University.

*Vadim A. Krysko*, Dr. Sc., professor, head of the department, Yuri Gagarin Saratov State Technical University.

УДК 550.837.6

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКОВО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ НА ПОЛИМЕТАЛЛЫ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ С КОНТРОЛИРУЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ В РАЙОНЕ РУДНОГО АЛТАЯ

Бабушкин Сергей Михайлович<sup>1</sup>,  
bab@gs.sbras.ru

Егоров Алексей Николаевич<sup>2</sup>,  
uk\_ch\_alex@mail.ru

Неведрова Нина Николаевна<sup>3,4</sup>,  
NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

Шапаренко Илья Олегович<sup>3</sup>,  
ShaparenkoI@ipgg.sbras.ru

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. академика Коптюга, 3.

<sup>2</sup> ТОО «Геологоразведочная компания "Топаз"», Республика Казахстан, 070001, г. Усть-Каменогорск, ул. Геологическая, 1.

<sup>3</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. академика Коптюга, 3.

<sup>4</sup> Новосибирский государственный университет, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью поиска новых промышленных рудопроявлений в связи с тем, что большая часть разведанных месторождений Убинского рудного поля уже отработана.

**Цель работы:** уточнение строения и выявление перспективных на руду объектов в глубоких горизонтах и фланговых частях Убинского рудного поля Рудного Алтая с использованием электромагнитных методов постоянного и переменного тока.

**Методы исследования:** основной объем полевых данных получен методом электромагнитного зондирования становлением поля с индуктивными соосными и разнесенными установками. Дополнительно выполнены измерения методом электротомографии на постоянном токе. Обработка, интерпретация, визуализация данных осуществлялась с помощью интерактивных программных комплексов моделирования и инверсии ЭРА, EMS, ZondTEM1D. Обоснование результатов проведено на основе анализа и сопоставления данных комплекса геолого-геофизических методов.

**Результаты.** По данным метода электромагнитного зондирования становлением поля построены разрезы по профилям наблюдений, площадные распределения удельного электрического сопротивления на нескольких интервалах глубин, а также трехмерные модели перспективных на руду зон. Впервые выявлено три типа аномальных зон, соответствующих рудным объектам, отличающихся размерами и глубиной залегания. Наибольшая глубина залегания аномальных объектов получена в юго-восточной части Убинской площади. По результатам электротомографии прослежено проявление разломных структур в верхней части разреза. Обоснованы последующие работы методами электроразведки, включающие более глубинную съемку в центральной и юго-восточной части участка и более детальные измерения в пределах выделенных перспективных зон.

**Выводы.** Применение электроразведочных методов эффективно для поисков полиметаллов в районе Рудного Алтая. По данным электромагнитного зондирования становлением поля подтверждена перспективность на полиметаллы юго-восточной части Убинской площади, где получены наибольшие глубины залегания рудных объектов и по комплексу геологических и электроразведочных данных рекомендована электроразведочная съемка до глубин 700–1200 м.

### Ключевые слова:

Рудный Алтай, Убинское рудное поле, метод электромагнитного зондирования становлением поля, электротомография, геоэлектрические разрезы, трехмерные геоэлектрические модели, низкоомные зоны перспективные на полиметаллы.

### Введение

Методы электроразведки с контролируемыми и естественными источниками традиционно широко применяются для поисков и разведки полиметаллических месторождений. Эти методы особенно эффективны при наличии интенсивного оруденения. Сульфиды и другие полиметаллы создают значимые геоэлектрические аномалии, так как имеют очень низкие значения удельного электрического сопротивления (УЭС), на несколько порядков отличающиеся от вмещающих высокоомных горных

пород. В случае вкрапленных либо маломощных жильных рудных структур электромагнитные методы позволяют выделять перспективные на руду области, обычно приуроченные к разломным нарушениям, границам блоков, а также имеющиеся зоны сопутствующих метасоматических изменений (сульфитизации, графитизации, и др.).

Анализ публикаций по этой тематике показывает, что большинство исследователей используют широкий спектр геофизических методов, их комплексирование. Вместе с электроразведкой прив-

лекают, например, магниторазведку, сейсморазведку гравиразведку, электрохимические методы, гамма-спектрометрические измерения и др. [1]. Например, при исследованиях медно-никелевого оруденения в Норильске работы проводились с помощью магнитотеллурических методов, электротомографии, вызванной поляризации (ВП), геомагнитной съемки [2]. Такой широкий комплекс дает положительные результаты, но, конечно, повышаются и финансовые затраты. Для группы методов геоэлектрики используется внутреннее комплексование, т. е. выбирают несколько разных модификаций для решения поставленной задачи. К менее затратным можно, например, отнести успешные работы двумя методами геоэлектрики при поисках ильменитовых руд в Приморье. Месторождение на глубинах 100–120 м исследовалось с помощью вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и ВП [3]. В электроразведочной практике часто применяют совместно методы ВЭЗ и электромагнитное зондирование становлением поля (ЗС). При современных исследованиях по данным метода ВЭЗ можно детально расчленив самую верхнюю часть разреза в пределах нескольких метров и получить информацию до глубин в первые сотни метров, в то время как метод ЗС имеет преимущества, заключающиеся в более высокой глубинности (первые километры) и производительности полевых работ. В целом геофизический комплекс должен быть рациональным и максимально учитывать физико-геологические условия участков исследования, которые расположены в разных рудных провинциях, отличающихся разнообразием геологических обстановок.

В настоящее время нельзя обойти вниманием методы электротомографии на постоянном токе (ЭТ). Они наиболее эффективны среди методов геоэлектрики для малоглубинных изысканий на рудные полезные ископаемые. ЭТ относится к сравнительно новым технологиям автоматизированных многоэлектродных наблюдений с высокой разрешающей способностью по сравнению с классическими ВЭЗ и электропрофилеированием [4–6]. Для этой группы методов имеются развитые аппаратные и интерпретационные средства исследования неоднородных, сложно-построенных геологических массивов, глубинность достигает в среднем до 100–150 м в зависимости от разреза [6]. Методы электротомографии, основы которых заложены в конце прошлого столетия, постоянно совершенствуются. В частности, в последние годы разработан аппаратный комплекс для наземных наблюдений методом ЭТ, с глубинностью примерно до 300 м [7].

На современном этапе следует учитывать, что поиски и разведка полиметаллов осуществляются на все больших глубинах. В частности, в Рудном Алтае эти глубины могут превышать 500 м, поэтому по-прежнему актуальны глубинные методы геоэлектрики с контролируемым источником, среди

которых нестационарные электромагнитные зондирования являются ведущими. Модификация зондирования становлением поля с индуктивным возбуждением позволяет выполнять измерения без заземлений в широком диапазоне глубин, с компактным оборудованием [8]. Новые аппаратные разработки с использованием модульных приемных систем и многовитковых компактных рамок в качестве измерительной установки обеспечивают высокую производительность работ, низкие погрешности измерений во всем временном диапазоне [9]. Кроме того, при определенных условиях можно использовать ЗС как поисковый моно-метод, конечно, с привлечением достаточного числа априорных геологических, скважинных данных и результатов предшествующих геофизических работ.

Методика интерпретации для сложно-построенных сред наиболее развита для методов постоянного тока. Вместе с тем в последнее десятилетие разработаны подходы к совместной инверсии данных разных методов: ВЭЗ и ЗС, использованных для построения глубинной геоэлектрической модели участка в Томской области [10], данных аудиоманнитотеллурики и электротомографии для решения рудных задач [11]. Для метода становления электромагнитного поля совершенствуются способы обработки полевых данных с использованием трехмерного моделирования и инверсии, развиваются технологии двух-трехмерной визуализации, привлекаются индуктивные методы вызванной поляризации [12–14].

В данной статье рассмотрены поисково-оценочные электроразведочные работы методом становления поля, выполненные в районе Рудного Алтая на участке Убинский, перспективном на полиметаллы. В настоящее время решение поисковых задач в этом регионе связано с целым рядом трудностей, обусловленных в первую очередь сложными геолого-геофизическими моделями перспективных на руду территорий. Осложняющими факторами являются большие глубины залегания рудных объектов, разнородный литологический состав вмещающей толщи, изменяющиеся в широком диапазоне геофизические характеристики рудных тел, присутствие разнонаправленных разломных структур и зачастую горный рельеф, не позволяющий выполнить измерения с необходимым шагом. При постановке работ на участке Убинский оценивались преимущества и недостатки разных модификаций электроразведки, учитывались геологические, экономические и экологические аспекты, наличие априорных данных. На исследуемой площади ранее был выполнен комплекс геофизических методов (магниторазведка, гравиразведка, электроразведочные работы методом ВП-СГ, геохимическое картирование). Главной целью исследования являлось уточнение строения участка и выявление перспективных на руду объектов в глубоких горизонтах и фланговых частях Убинского рудного поля.

### Геологическая изученность участка исследования

Рудный Алтай относится к крупнейшим колчеданным провинциям. На сегодня имеется значительный объем материалов по геологическому строению и металлогении этого региона. Убинская площадь, в пределах которой проводятся электроразведочные измерения, находится в Прииртышском рудном районе юго-западного Алтая. Участок работ расположен в зоне сочленения Алейского антиклинория с Быструшинским прогибом. По данным скважин, результатам петрофизических измерений, литературным источникам, известны литолого-стратиграфические характеристики породных комплексов участка. В основании разреза залегают метаморфические сланцы нижнего палеозоя – корбалихинская свита. Выше с угловым несогласием разрез слагают свиты среднего девона: холозовская (песчаники с прослоями конгломератов, туфов, лав), лосишенская рудоносная (алевролиты, известняки, песчаники, тела туфов риолитовых порфиров); а также таловская и гериховская свиты верхнего девона (глинистые алевролиты, песчаники, туфы и лавы). Залегание толщ девона, субгоризонтальное на севере участка, сменяется на более крутое в южной его части. Сверху древние отложения перекрыты рыхлыми кайнозойскими глинистыми породами, мощность которых неустойчива и изменяется от нескольких метров до 250 м. Четвертичные осадки сосредоточены по долинам рек с максимальной мощностью около 50 м. Интрузивные образования развиты в северо-западном и южном обрамлении этой площади, где слагают достаточно крупные массивы – Маралихинский и Лосишинский соответственно. На дневной поверхности наблюдаются выходы метаморфических сланцев нижнего палеозоя, вулканогенно-осадочных пород девона и пестрых по составу интрузивов [15]. С учетом геологических и электрофизических характеристик горных пород, слагающих участок, было выяснено, что они хорошо дифференцированы по удельному электрическому сопротивлению, что дает основания для применения электроразведки.

В целом Верх-Убинское рудное поле в структурном отношении представлено тектоническим блоком, погружающимся на юг под рудовмещающие отложения до глубин 0,8–1,5 км. Блок ограничен по данным грави-магниторазведки на юге Шемонаихинско-Секисовской разломной зоной, на востоке – Убинским палеоуступом и на западе – габбро-гранитоидами алейского комплекса. Фактически это моноклиналь с преобладающим пологим падением к юго-западу, осложненная взбросами и надвигами. Субширотные и меридиональные разломы контролируют рудные тела. Меридиональные разломы пересекают весь разрез рудного поля. Широтные разломы более четко проявляются в автохтонной части разреза.

### Характеристика полезных ископаемых

Рудное поле Прииртышского района включает медноколчеданные и колчеданно-полиметаллические месторождения. Разведанные месторождения и рудопроявления приурочены к отложениям лосишинской, таловской и гериховской свит и связаны с субвулканическими образованиями риолитовых порфиров. На участке исследования выявлены два типа колчеданно-полиметаллического оруденения. Первый тип ассоциируется с вытянутыми пластообразными телами, либо линзами, согласно залегающими в туфогенно-осадочных отложениях лосишенской свиты. Второй тип – штокообразный и жильный, приурочен к крутопадающим зонам повышенной трещиноватости или/и дробления. По результатам предшествующих работ, рудные тела локализованы в основном в отложениях нижней части лосишенской свиты, в которой могут присутствовать два рудных горизонта. По данным бурения, в центральной части площади в зоне Родникового рудопроявления получено промышленное содержание рудных компонентов. Лунихинское рудопроявление выявлено по данным ВП. С помощью геохимического картирования установлены два крупных поля аномально повышенной концентрации Cu, Pb, Zn (рис. 1) [15].

Все известные рудные тела месторождений Верх-Убинского, Покровского и рудопроявлений характеризуются сложным внутренним строением с тектоническими нарушениями, большой изменчивостью состава и невыдержанными содержаниями рудных и сопутствующих компонентов. Эти факторы усложняют поисково-разведочные работы. Можно отметить, что значительная часть полиметаллических месторождений, включая крупные, уже отработана, но по ряду геолого-геофизических данных на участке исследования имеются перспективы нахождения новых оруденений с промышленным содержанием Cu, Pb, Zn. Оценка ресурсов Au и Ag не проводилась.

### Аппаратурно-методические средства электроразведочных работ

Основным методом исследования является зондирование становлением электромагнитного поля, основанное на измерениях поля переходных процессов в земле. Для возбуждения поля создается импульсное переключение тока в питающей (генераторной) установке. Стандартным приёмом является включение постоянного тока в генераторной установке и через строго определённое время резкое его выключение. Наиболее широкое распространение получило ступенчатое изменение тока по определённому закону, например, импульс выключения описываемый функцией Хэвисайда. Выключение тока в источнике приводит к возникновению в проводящей земле неустановившегося электромагнитного поля, и далее изучается про-

цесс его установления. Глубина проникновения поля переходных процессов в землю возрастает с увеличением времени, прошедшего с момента включения тока, и называемого временем становления. При этом измеряемый в приёмной установке сигнал падает до нуля, изменяясь сложным образом. График зависимости нормированного наблюдаемого сигнала от времени становления называется кривой становления поля ( $\rho$ ). Вид этой кривой определяется распределением электропроводности в разрезе [16].

Главным преимуществом зондирования становлением поля по сравнению с частотным зондированием и методами сопротивлений является возможность применения установок, размеры которых существенно меньше глубины залегания целевого объекта. Множество существующих модификаций этого метода отличаются способами возбуждения поля и набором регистрируемых компонент. Наибольшее распространение получили модификации с индуктивным возбуждением и регистрацией производной вертикальной компоненты магнитного поля, имеющие ряд принципиальных преимуществ. Применение индуктивных генераторно-приемных установок не требует заземлений, на индуктивную составляющую поля практически не влияют высокоомные экраны и приповерхностные неоднородности, имеется повышенная устойчивость к промышленным и магнитотеллурическим помехам. Так как измерения проводятся вблизи источника, увеличивается локальность и детальность исследования, практически снимается вопрос о положении точки записи [17]. В целом модификация обладает высокой разрешающей способностью. Учитывая перечисленные преимущества для работ на Убинской площади, использована именно эта модификация.

Для успешной реализации полевых измерений привлечены современные аппаратные разработки. Аппаратура метода имеет ряд особенностей, определяемых характером измеряемого сигнала. Сигнал становления поля за короткое время изменяется в очень широком диапазоне (на 5–6 порядков). На малых временах становления ЭДС в приемной петле может достигать десятков вольт, а на поздних уменьшаться до долей микровольт. Поэтому измерительная аппаратура должна обладать высокой чувствительностью на поздних временах, т. е. достаточным минимальным уровнем измеряемого сигнала и широким динамическим диапазоном (отношение максимального измеряемого сигнала к минимальному), что позволит выполнить регистрацию в необходимом временном диапазоне, начиная с самых ранних времен (0,02 мс). Важной характеристикой аппаратуры, влияющей на глубинность исследования, является максимальная величина тока, которую создает генераторное устройство.

Все эти особенности учтены в цифровой телеметрической аппаратуре серии «Байкал МЭРС-Т». В измерительном блоке предусмотрена многока-

нальная телеметрическая система, предназначенная для организации как профильной, так и площадной системы регистрации высокой плотности. Полевой измеритель состоит из устройства управления, АЦП, усилителя, встроенного источника питания. Измерительные модули располагаются непосредственно у приемных конструкций, которых может быть несколько и любых типов (петли, линии, многовитковые датчики). Предусмотрено четыре независимых входа для регистрации сигналов от разных секций приемной петли (отличающихся, например, количеством витков). Прибор герметичен, защищен от воздействия факторов окружающей среды. В комплекте с измерительным блоком разработан коммутатор тока ГТИ-200, с помощью которого можно создать ток до 200 А. Для возбуждения импульсного тока в генераторном контуре используется коммутатор тока, собранный на IGBT транзисторах. Источниками напряжения на входе генератора являются аккумуляторная батарея необходимой ёмкости с напряжением от 12 до 600 В и генератор переменного тока мощностью до 100 кВт. В генераторе реализована цифровая запись формы токовых импульсов. Синхронизация генератора и приемника осуществляется по каналу GPS. Минимальная амплитуда измеряемого сигнала обеспечена на уровне 0,2–0,5 мкВ. Переносные многовитковые датчики (модульные рамки) являются наиболее перспективной разработкой метода ЗС в качестве приемной конструкции. При использовании на полевых работах они заменяют петлю больших размеров, что дает возможность оперативно провести измерения, значительно увеличивая производительность работ. Многовитковый датчик, выполненный в виде круга с площадью 1,28 м<sup>2</sup>, при измерениях является эквивалентом приемной одновитковой рамки со стороной 156,767 м. Применение аппаратуры «Байкал МЭРС-Т» в полевых условиях с широким временным интервалом регистрации и возможностью измерять слабые сигналы в доли мкВ позволяет продлить кривую зондирования до более поздних времен и определять параметры глубоко залегающих горизонтов с высокой достоверностью [9].

#### Методика измерений методом ЗС

Для проведения съемки на участке Убинский в качестве генераторной установки использована незаземленная петля квадратной формы со стороной равной 300 м. При проведении работ на тестовом участке ток в генераторной петле был выбран в 15 А с погрешностью не более 1 %. Измерения выполнены с помощью переносного датчика, на разных расстояниях соответственно от центра генераторной установки (от 0 до 0,4–0,5 км). Таким образом приемные пункты были расположены как внутри генераторного контура, так и вне его. В процессе измерения записывались два дубля переходного процесса с количеством накоплений в каждом дубле не менее 300. Погрешность регистрации переходного процесса в информативной области времен

становления (0,1–100 мс) составила менее 5 %. Максимальная глубинность исследования порядка 500–600 м была достигнута за счет измерения сигнала с минимальной амплитудой в 0,2–0,5 мкВ. В начале и в конце каждого маршрута проводились контрольные зондирования в одном из выбранных приемных пунктов сети. Масштаб геофизической съемки 1:10000 обеспечивается расстоянием между профилями в 100 м и шагом по профилю в

40 м. Таким образом, сеть наблюдений состоит из системы субмеридиональных профилей и объединяет пикеты измерений всех генераторных контуров, увязанные между собой. Всего на площади исследования было разложено 11 генераторных контуров и выполнено 2224 физических наблюдения (рис. 1). Фактическая площадь электроразведочных работ составила 8000000 м<sup>2</sup>. До начала работ в пакете MapInfo был подготовлен проект, в котором

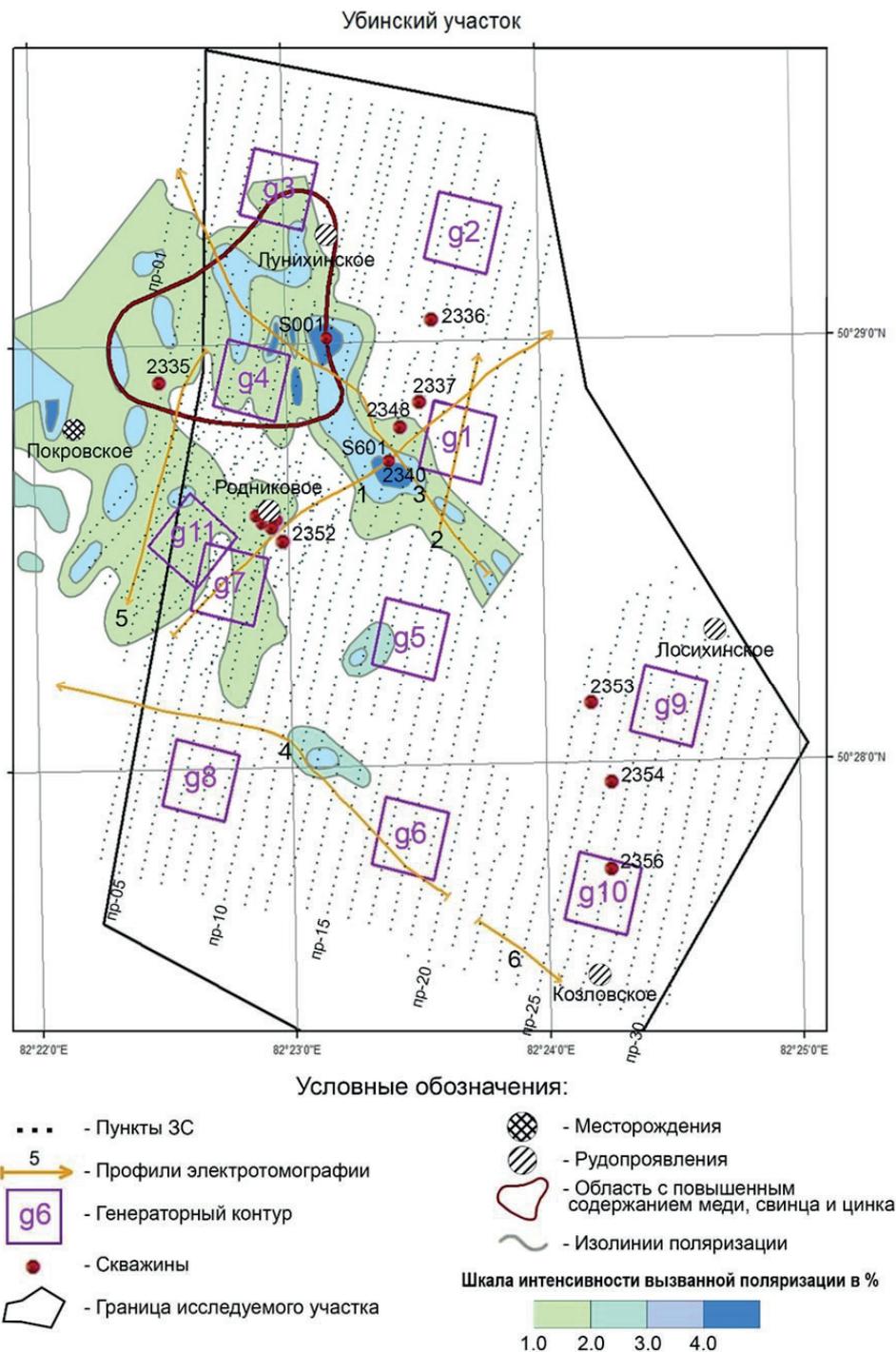


Рис. 1. Размещение профилей и пунктов ЗС, профилей электротомографии на участке Убинский

Fig. 1. Placement of profiles and points of sounding and electrical resistivity tomography profiles in Ubinsk area

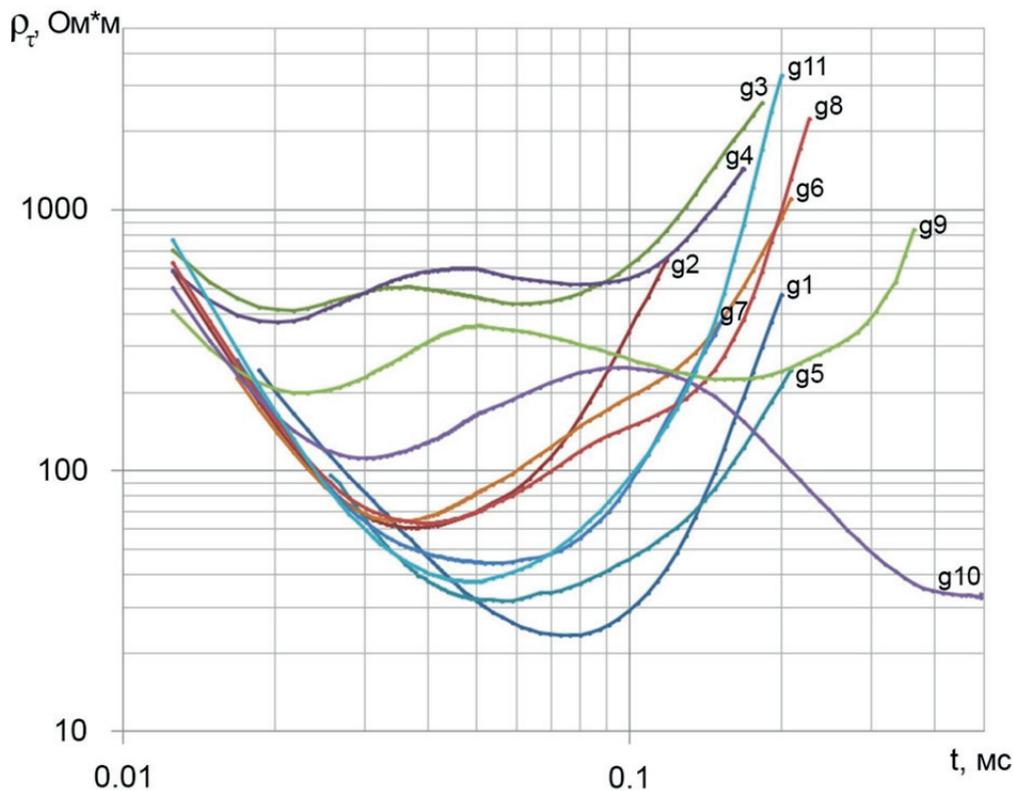
определена траектория профилей, координаты генераторных контуров и приемных пикетов. На основании этих данных были запрограммированы GPS-приемники Garmin, которые используются оператором *in situ* при постановке наблюдений. Непосредственно перед началом работ была установлена базовая станция с контроллерами ProMark 3, с помощью которых с шагом 50 м фиксируется истинная конфигурация генераторного контура для расчета его площади и устанавливается положение приемных пунктов. Методика проведения топографических работ обеспечивает точность определения координат пунктов в среднем 1 м в плане и 2 м по высотной привязке.

В перспективных по предшествующим геолого-геофизическим данным зонах Убинского участка для детализации геоэлектрических параметров верхней части разреза были выполнены дополнительные измерения методом электротомографии с использованием электроразведочной станции «Скала-48». В аппаратуре реализован развитый пользовательский интерфейс, позволяющий полностью контролировать процесс измерений. В рабочем состоянии на дисплее отображается соответствующая режиму таблица, по которой можно определять расположение и геометрию измери-

тельной установки и просматривать результаты наблюдений [6]. Профили ЭТ показаны на рис. 1.

#### Интерпретация полевых данных ЗС. Обсуждение результатов

Обработка и интерпретация полевых данных ЗС осуществлялась в два этапа. Вначале была выполнена предварительная обработка с помощью специализированных программных средств, результатом которой являются сами измеренные сигналы (ЭДС), очищенные от помех, и их трансформанты – кривые кажущегося удельного электрического сопротивления ( $\rho_r$ ), проводимость. Характерные кривые  $\rho_r$  от разных генераторных контуров указывают на значительную дифференциацию по удельному электрическому сопротивлению площади участка, так как тип и уровень кривых изменяется практически для каждого контура (рис. 2). Анализ показал, что значения минимума кривых  $\rho_r$  и временной интервал измерений в пунктах регистрации, расположенных на разных частях площади исследования, варьируют более чем на порядок. По поведению кривых уже можно сделать вывод, что на юго-востоке площади низкоомные объекты находятся на больших глубинах по сравнению с северо-западной частью.



Условные обозначения:  
g1-g11 - номер генераторного контура

Рис. 2. Характерные кривые кажущегося удельного электрического сопротивления по данным ЗС на участке Убинский

Fig. 2. Representative curves of the apparent resistivity according to the data of sounding in Ubinsk area

Количественная интерпретация выполнена на следующем этапе с использованием интерактивных программных комплексов моделирования и инверсии: Эра, EMS, разработанных в ИНГГ СО РАН [18], и ZondTEM1D [19]. Все эти комплексы позволяют осуществлять интерпретацию полевых данных ЗС в классе горизонтально-слоистой модели. Кроме инверсии в системах предусмотрена возможность численного моделирования. Каждый комплекс содержит несколько функциональных пакетов, с помощью которых можно оценить результаты интерпретации. Для полученных геоэлектрических параметров вычисляются погрешности их определения, оценивается степень влияния на электромагнитное поле, области локальной эквивалентности, кроме того, выполняется оценка глубинности зондирования. Для успешной инверсии полевых данных важное значение имеет выбор начального приближения. Для нестационарного электромагнитного зондирования это неформальная процедура, которая по большому счету зависит от опыта специалиста-геофизика. По участку исследования собран большой объем геолого-геофизических данных. По ряду скважин известны литологические характеристики и мощности породных комплексов, имеются результаты геофизиче-

ских методов. Адекватная стартовая модель построена на основе всех имеющихся априорных материалов.

Для Убинского участка была использована концепция профильной интерпретации. Эффективность процесса интерпретации повышается последовательной работой с данными по профилю, как правило, для каждого следующего зондирования вначале используется модель, полученная для предыдущего пикета, что ускоряет процесс подбора. Имеется возможность увязки и коррекции моделей соседних зондирований. При этом удовлетворяются два критерия: достижение минимума невязки полевой и теоретической кривых, а также близость модели априорным данным. Для успешной инверсии выбирается оптимальный алгоритм минимизации и возможные ограничения на варьирования любого геоэлектрического параметра, заданием границ внутри которых параметр может изменяться. Возможность интерпретации в классе горизонтально-слоистой модели обусловлена высокой локальностью использованных установок. В результате практически для каждого зондирования получены геоэлектрические модели в рамках заданной погрешности, которые содержат от 5 до 8 слоев. Примеры интерпретации приведены на рис. 3, а, б.

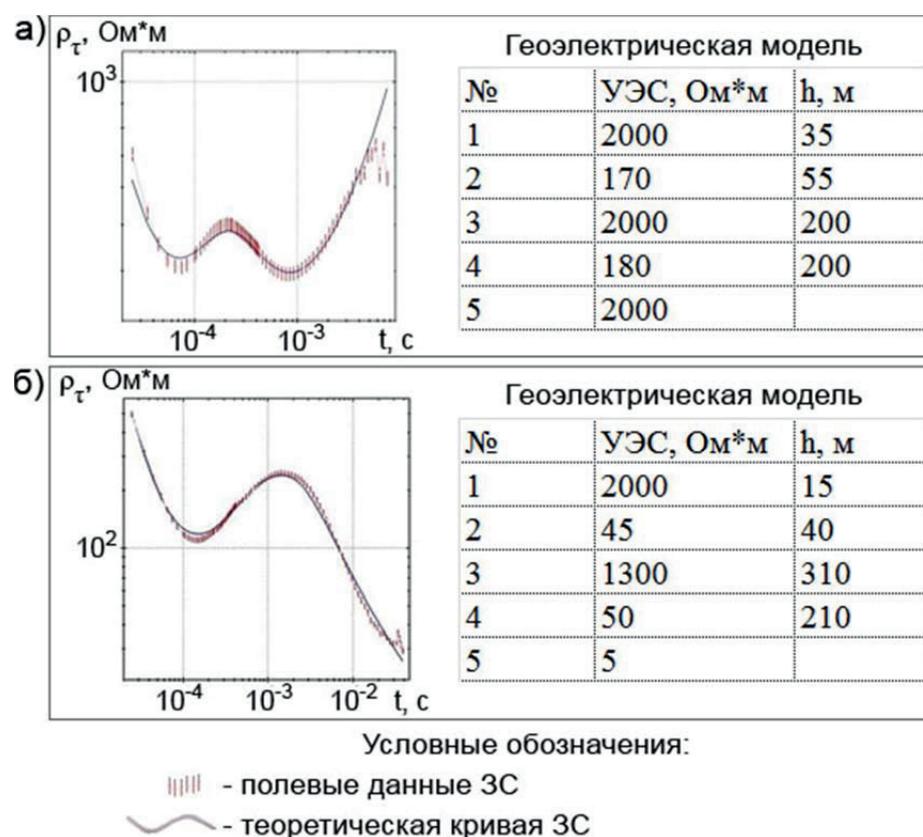
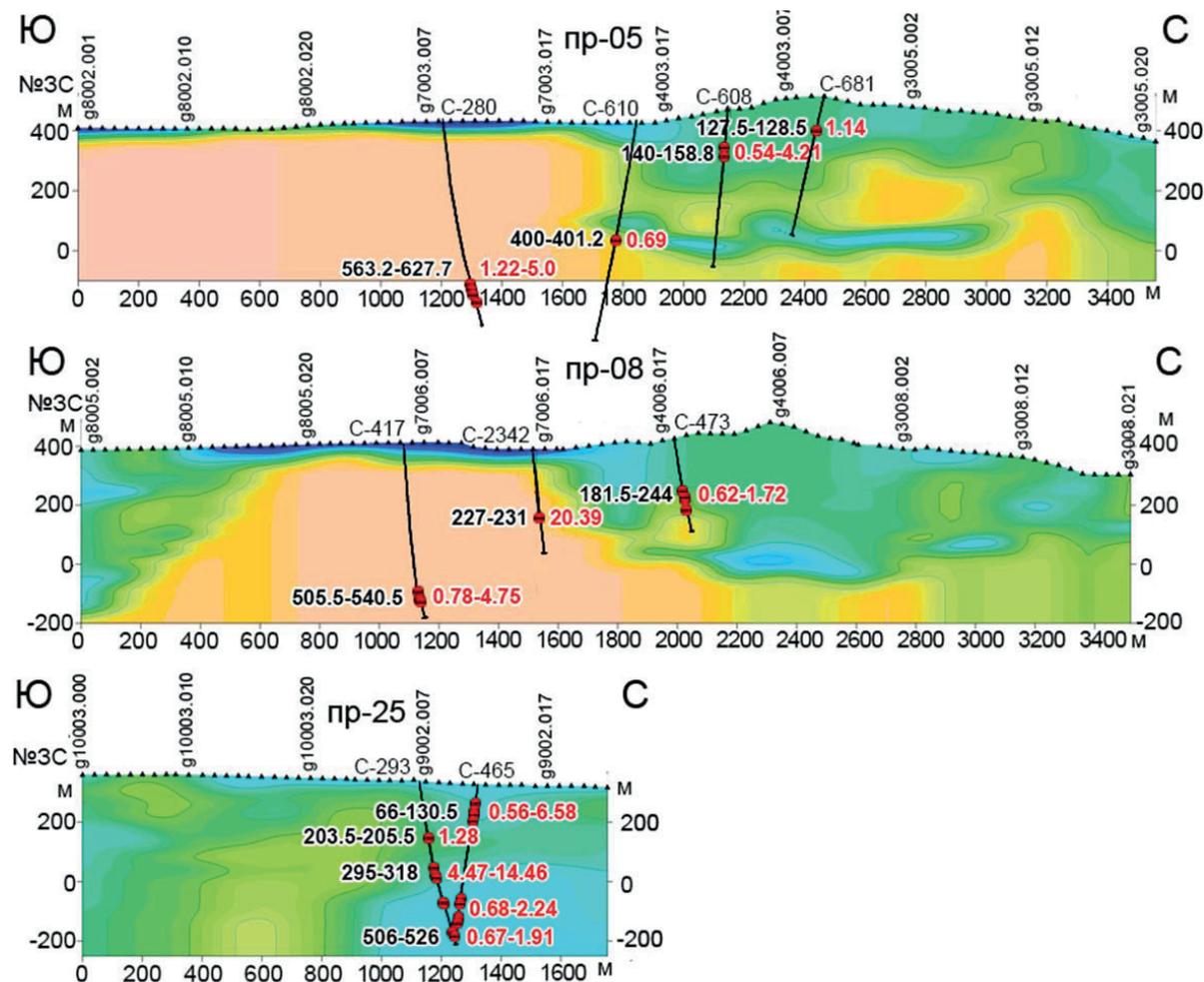


Рис. 3. Примеры интерпретации данных в программном комплексе EMS; а) ЗС № 10 профиля 6 от генераторного контура g3; б) ЗС № 10 профиля 25 от генераторного контура g10

Fig. 3. Examples of sounding data interpretation in EMS software; а) sounding point no. 10 of the profile 6 from the generator circuit g3; б) sounding point no. 10 of the profile 25 of the generator circuit g10

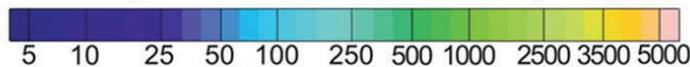
Оба зондирования выполнены в разных частях площади. Полученные геоэлектрические модели одного типа и характеризуются чередованием проводящих и высокоомных горизонтов, но значения удельного электрического сопротивления существенно отличаются. Данные ЗС № 10 профиля 6 (генераторный контур g3) получены в северо-западной части площади в районе Лунихинского рудопоявления. В геоэлектрической модели содержатся два проводящих горизонта с УЭС – 170 и 180 Ом·м. Для геоэлектрической модели ЗС № 10 профиля 25, полученного в юго-восточной части в

зоне Козловского рудопоявления (генераторный контур g10), наблюдаются значительно более низкие значения УЭС проводящих горизонтов – в 45, 50 Ом·м, и большая суммарная мощность. В целом результаты количественной интерпретации подтверждают различие в строении северо-западного и юго-восточного участков, первый из них имеет явно выраженный высокоомный опорный горизонт (фундамент) со значениями УЭС в 2000 Ом·м. Для юго-восточного блока в основании геоэлектрического разреза находятся низкоомные породы со средними значениями УЭС в 300–500 Ом·м.



Условные обозначения:

Удельное электросопротивление (Ом\*м)



C-681 - Скважина

Интервалы глубин, в м - 227 - 0.73 - Содержание металла, в %

Рис. 4. Геоэлектрические разрезы через Убинский участок; разрезы по профилям 5 и 8 через Лунихинское рудопоявление; разрез по профилю 25 (Козловское, Лосихинское рудопоявления)

Fig. 4. Geoelectric sections through the Ubinsk area; sections along profiles 5 and 8 through Lunikhin ore formation; section along profile 25 (Kozlovskoe, Losikhinsky ore occurrences)

В частности, кривая  $\rho_{\tau}$  ЗС № 10 не имеет выхода на правую асимптоту, так как на глубине 365 м находится объект с очень низким удельным электрическим сопротивлением, токи в нем концентрируются и не проходят глубже.

По результатам интерпретации выполнены визуализации в виде разрезов по всем профилям наблюдений, площадные распределения УЭС на нескольких интервалах глубин, а также объемные трехмерные модели перспективных на руду зон. Визуализация геоэлектрических разрезов по профилям выполнена с помощью программы ZondTEM1D (zond-geo.ru). Разработки этой программы направлены на удобство работы интерпретатора и предоставляют широкий выбор средств визуализации, имеется режим работы с площадными данными произвольной системы измерений. В качестве примера приведены полученные разрезы по субмеридиональным профилям 5, 8 и 25, которые отражают разные геоэлектрические ситуации (рис. 4). Профили 5 и 8, выполненные по западному краю площади исследования, на юге пересекают интрузивный высокоомный блок, перекрытый маломощными, но очень проводящими четвертичными осадками, поэтому полученная здесь глубинность (не более 100 м) недостаточна для анализа перспектив, хотя в пробуренных скважинах С-280 и С-417 наблюдается высокое содержание металлов в интервалах 563–627 и 505–540 м, соответственно. В этой зоне необходимы дополнительные измерения с более мощным источником. В северо-западной части обоих профилей в зоне развития пород девона глубинность зондирований достигает примерно 400 м, и на этой глубине в разрезах выделяется хорошо проводящий протяженный аномальный объект небольшой мощности, а также проводящие зоны в верхней части разрезов до глубин 200–250 м, соответствующие по координатной привязке Лунихинскому рудопроявлению. По данным нескольких скважин, на профилях 5 и 8 (С-610, С-608, С-681), пробуренных на границах между проводящими и высокоомными блоками, получены промышленные содержания металлов. Скорее всего границы блоков, к которым приурочены рудопроявления, являются разломными.

Профиль 25 выполнен на юго-востоке площади и пересекает Козловское рудопроявление на юге и Лосихинское рудопроявление на севере. На разрезе по этому профилю выделяются хорошо проводящие зоны, более протяженные и мощные, чем на северо-западе площади. По глубине эти зоны распространены более чем на 400 м. По ряду скважин (С-293 и С-465), пробуренных вблизи профиля, получены промышленные содержания металлов. Судя по полученным данным геоэлектрики, на этом участке перспективные зоны могут быть обнаружены и глубже 400 м.

В целом на разрезах по профилям 1–19 проводящие объекты со значениями УЭС в 25–50 Ом·м на северо-западе участка и до 100–200 Ом·м на юго-востоке представлены в виде горизонтальных и наклонных образований, которые прослежива-

ются в интервале глубин, начиная с абсолютных отметок 300–200 до 0–(–200) м.

Наиболее мощные и протяженные низкоомные аномальные зоны со значениями УЭС от 25 до 200 Ом·м выделены на разрезах профилей 20–33 (юго-восток площади) в интервалах глубин от дневной поверхности вплоть до абсолютных отметок –200, –400 м. На всех построенных разрезах имеются низкоомные приповерхностные отложения со значениями УЭС от 5–10 до 20–25 Ом·м, мощность которых изменяется в широких пределах от 10 до 100 м. Приповерхностные очень проводящие осадки близки по значениям сопротивлений структурам рудного происхождения.

Карты распределения УЭС по площади на разных абсолютных отметках в глубину (срезы) построены через 50 м и отражают геоэлектрическое строение исследуемой площади в целом. По представленным на рис. 5 нескольким срезам можно сделать вывод, что у аномальных зон разная протяженность в вертикальном и горизонтальном направлениях. По анализу этих распределений были выделены участки с тремя типами аномальных зон: северо-западный, промежуточный и юго-восточный (рис. 5).

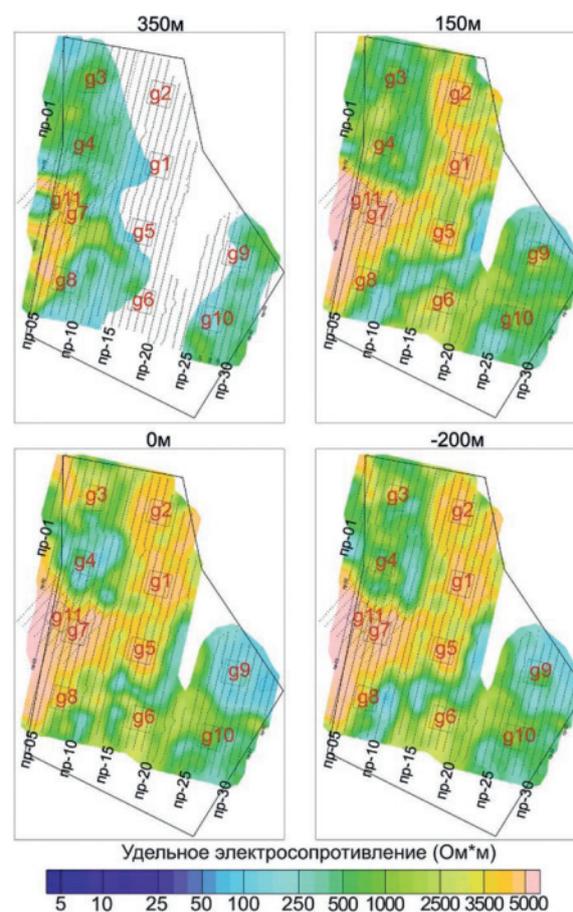


Рис. 5. Распределение УЭС на разных абсолютных отметках в интервале глубин +350, –350 м

Fig. 5. UES distribution at different absolute elevations in the depth range of +350, –350 m

Северо-западный участок приурочен к области работ с генераторными контурами  $g_3, g_2, g_{11}$ . Аномалии этого участка отражают локальные проводящие объекты в основном небольшого объема, расположенные на разной глубине. Они начинают проявляться с абсолютных отметок в 350 м и прослеживаются до глубины в 0 м. Выход на опорный высокоомный горизонт наблюдается на срезах с абсолютными отметками  $-50$  и  $-100$  м, т. е. максимальная глубина нижней кромки аномалий достигает 200 м. Самые низкие значения УЭС в  $25-50$  Ом·м отмечаются на абсолютных отметках от 100 до 0 м. Второй участок с аномалиями линейного типа выделен в зоне работ с контурами  $g_1, g_5, g_6, g_8$ . На этом участке также наблюдаются отдельные проводящие объекты различного размера. Цепочка низкоомных аномалий фактически пересекает площадь работ с юго-востока на северо-запад на срезах в 250, 150, 50, 0 м. Значения УЭС в  $25-50$  Ом·м получены в интервале абсолютных отметок 250–200 и 0–(–100) м. С ростом глубины площади аномалий уменьшается и начиная с абсолютной отметки в  $-50$  м видны только отдельные небольшие объекты в самой южной части. На третьем юго-восточном участке, расположенном в зоне работы с контурами  $g_6, g_9, g_{10}$ , наблюдается самый крупный низкоомный объект, который начинает проявляться локальными аномалиями начиная от дневной поверхности. Глубже на абсолютных отметках в 50–200 м площадь аномальной зоны увеличивается и достигает максимума на срезах с отметками 0–(–300) м.

Объемная геоэлектрическая модель участка построена от дневной поверхности до абсолютной отметки в  $-400$  м. С целью наглядного представления аномальных объектов, для оценки их конфигурации и размеров, был выполнен расчет изоповерхностей по значению УЭС в 180 Ом·м (рис. 6). Построение отражает сложную геометрию аномалеобразующих тел.

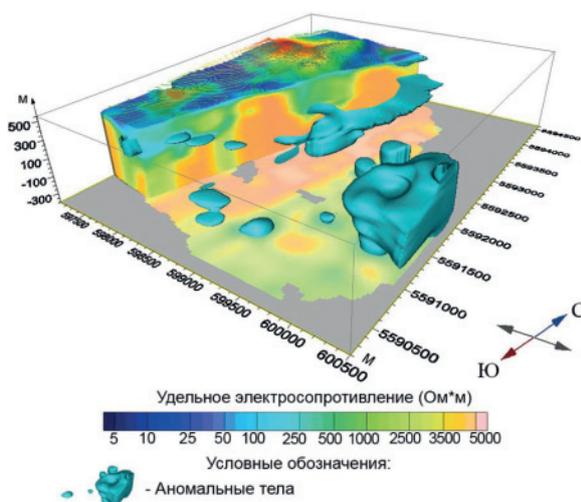


Рис. 6. Трехмерные модели аномалеобразующих объектов участка Убинский

Fig. 6. Three-dimensional models of anomalous objects of the Ubinsk area

На рис. 6 хорошо видно, что низкоомные тела выделяются по площади участка на нескольких интервалах глубин и имеют разные размеры. Наиболее массивный аномальный объект обнаружен на юго-восточном участке и имеет сложное строение, так как до глубин примерно в 200 м представлен локальными вертикальными телами, которые далее объединяются в одну аномалию, достигающую в диаметре 1000 м. На центральном участке видны как локальные аномалии небольших размеров, так и вытянутая по горизонтали практически линейная аномальная зона. Более детальное расчленение аномальных зон на собственно рудные тела, уточнение их конкретных размеров возможно только при постановке специальных детальных работ по методике 3D на каждой выделенной аномалии, отнесенной к перспективным.

*Результаты опытных работ методом электротомографии.* Дополнительно к нестационарным электромагнитным зондированиям были выполнены экспериментальные работы методом электротомографии по пяти профилям, четыре из которых сосредоточены в северо-западном перспективном участке, где обнаружены в основном небольшие аномальные объекты, приуроченные, скорее всего, к разломным границам блоков. По предшествующему опыту работ в районе Горного Алтая разломные структуры хорошо прослеживаются методом электротомографии в приповерхностных осадках.

На Убинской площади измерения были выполнены с использованием симметричной установки Шлюмберже. Для создания профиля необходимой длины применялась нагоняющая расстановка (roll along). 48 электродов объединены в косу общей длиной в 240 м, разделенную на два сегмента по 24 электрода с шагом 5 м между ними. После начального измерения на двух сегментах происходит перенос первого сегмента для продолжения непрерывного профиля и так несколько раз до достижения нужной длины [20, 21]. Интерпретация выполнена с помощью программных комплексов RES2Dinv [5], ERTlab [22]. Разрезы электротомографии по профилям 3 и 5 длиной соответственно 1000 и 700 м отражают верхнюю часть разреза до глубин в среднем в 100 м (рис. 7).

Разломы на разрезах показаны по геологическим данным. Видно, что эти известные разломы проходят в основном на границах высокоомных и низкоомных блоков, разделяя их. Разлом в средней части профиля 3 с пологим углом падения проходит по нижней границе цепочки низкоомных аномалий. Таким образом, метод электротомографии позволяет построить детальную геоэлектрическую модель верхней части разреза.

#### Заключение

Площадные системы наблюдений и представление результатов в виде объемных моделей является современной тенденцией развития нестационарных электромагнитных методов с контролируе-

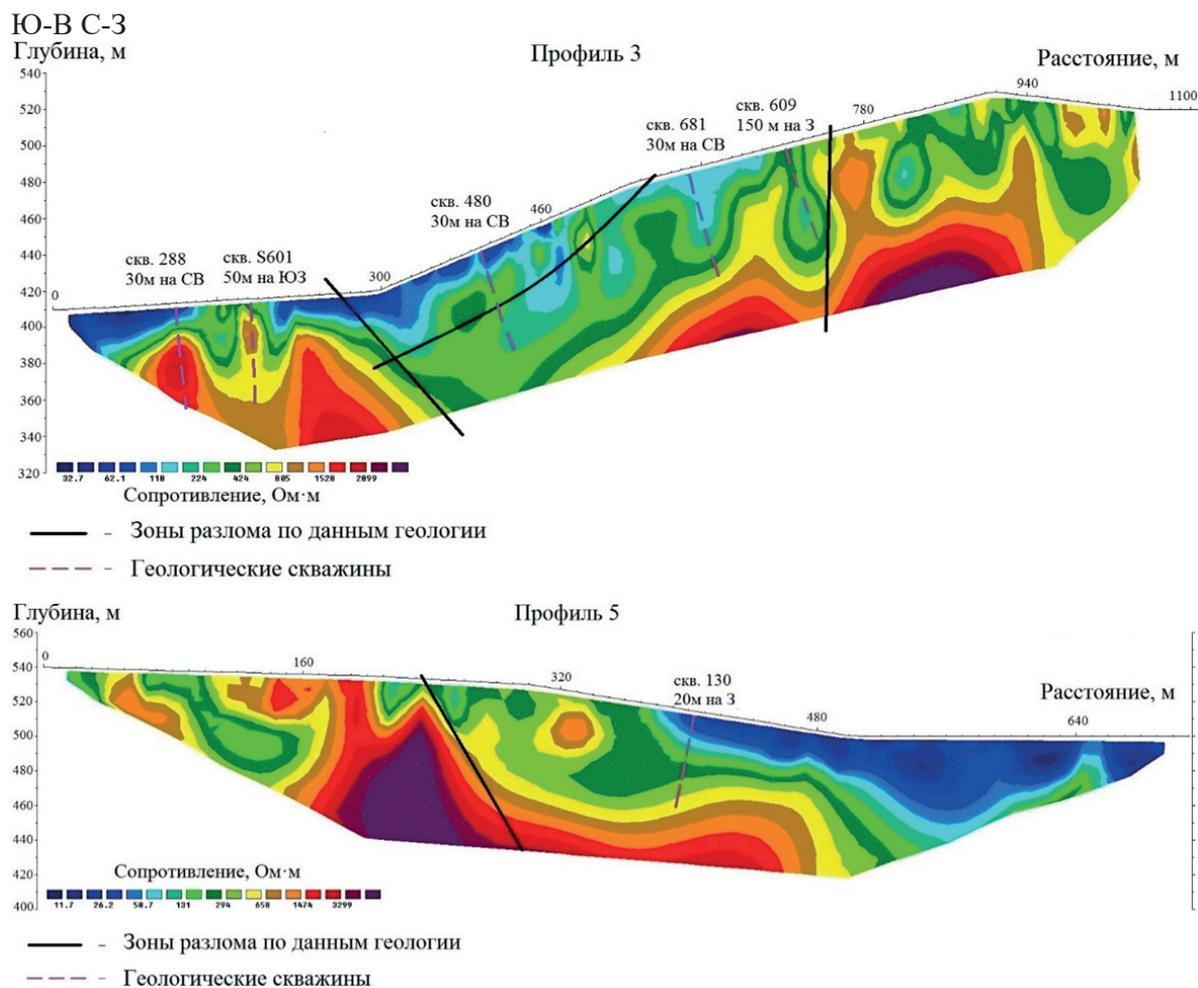


Рис. 7. Разрезы по профилям электротомографии

Fig. 7. Resistivity sections constructed by electrical resistivity tomography profiles

мым источником. 3D технологии электроразведки открывают новые перспективы в прогнозно-поисковых работах на минеральное сырье. В настоящее время разработан подход к проведению ЭМ исследований в сложно построенных средах, включающий этапы проектирования геофизического эксперимента, построения референтной модели среды, численного моделирования с использованием трехмерных программ для определения шага съемки, параметров генераторно-приемных установок. Развиваются программно-алгоритмические средства обработки и интерпретации полевых данных, визуализации результатов также с привлечением 3D программ. Таким образом, площадные зондирования с закрепленным источником поля в сочетании с трехмерной интерпретацией и визуализацией результатов наблюдений обеспечивают необходимую разрешающую способность метода ЗС в условиях латеральной и вертикальной неоднородности среды и выходов коренных пород на дневную поверхность.

В результате выполненных электроразведочных работ получено трехмерное распределение геоэлектрических параметров в пределах Убинско-

го участка, по которому хорошо выделяются аномальные низкоомные зоны. Эти зоны расположены на разной глубине, и их размеры сильно варьируют. Учитывая данные скважин, пробуренных в последнее время, значительную часть выделенных аномалий после геологической интерпретации и разбраковки можно отнести к перспективным на полиметаллы,

Вместе с тем в выполненной работе присутствуют некоторые недостатки. В частности, по данным ЗС, полученным на юго-западе площади в районе высокоомного интрузивного блока, перекрытого очень проводящими четвертичными осадками с понижением значений УЭС до 5 Ом·м, получена недостаточная глубинность для определения поисковых критериев. Но следует отметить, что это небольшой по площади участок. На нем можно оперативно повторить съемку, увеличив мощность источника.

Опытно-методические работы на Убинской площади показали преимущества и недостатки использованной методики измерений электромагнитных зондирований. Сделан вывод, что вначале работ необходимо выбирать несколько тестовых

участков, отличающихся по геологическому строению, для верификации наиболее важных геоэлектрических параметров, таких как глубинность исследования, параметры установок. Но в целом, учитывая полученные результаты, применение метода ЗС эффективно для поиска полиметаллов в районе Рудного Алтая, по данным этого метода подтверждена перспективность юго-восточной части участка, по комплексу геологических и электроразведочных данных сделан вывод о приуроченности руды Родниковского рудопроявления к зоне субширотных разломов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгалъ А.С., Христенко Л.А. Результаты и перспективы геофизических исследований при поисках золота на восточном склоне Кузнецкого Алатау // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2008. – № 2. – Вып. 12. – С. 57–69.
2. Комплексирование геофизических методов при поисках медно-никелевых руд на объектах ГМК «Норильский Никель» / Е.В. Андреева, А.А. Бобачев, И.М. Варенцов, М.И. Верещагина, В.А. Куликов, А.Г. Яковлев, Д.В. Яковлев // Разведка и охрана недр. – 2006. – № 8. – С. 71–79.
3. Шкабарня Н.Г., Стволов Б.Л. Интерпретация данных электрического зондирования при поисках ильменитовых руд в Приморье // Геология и геофизика. – 1996. – Т. 37. – № 4. – С. 111–114.
4. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting. – 1996. – № 44 (1). – P. 131–152.
5. Loke M.H. resistivity and IP imaging // Geotomo Software Pty Ltd. – 2015. URL: <http://www.geotomosoft.com> (дата обращения 15.09.2017).
6. Новый подход к малоглубинным электромагнитным зондированиям / Е.В. Балков, Д.И. Фадеев, Ю.Г. Карин, А.К. Манштейн, Ю.А. Манштейн, Г.Л. Панин // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 5. – С. 783–791.
7. Куликов В.А., Бобачев А.А., Яковлев А.Г. Применение электротомографии при решении рудных задач до глубин 300–400 м // Геофизика. – 2014. – № 2. – С. 39–46.
8. Коротков Ю.В. Возможности индуктивной импульсной электроразведки в поиске и разведке россыпей золота и платиноидов // Геофизика. – 2016. – № 2. – С. 54–60.
9. Бабушкин С.М., Неведрова Н.Н. Аппаратурные и методические средства при поисках рудных месторождений методом нестационарного электромагнитного зондирования // Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология: ИНТЕРЭКСПО ГЕО-Сибирь-2015. XI междунар. науч. конгр. – Новосибирск, 17–21 апреля 2017. – Т. 2 – С. 271–275.
10. О комплексировании методов ВЭЗ и ЗС в ближней зоне / П.В. Иванов, Д.А. Алексеев, А.П. Бобачев, П.Ю. Пушкарев, А.Г. Яковлев // Инженерные изыскания. – 2011. – № 11. – С. 42–51.
11. Куликов В.А., Каминский А.Е., Яковлев А.Г. Совместная двумерная инверсия данных электротомографии и аудиомангито-

Обоснованы перспективы дальнейших работ на Убинской площади: с целью уточнения глубинного строения центральной (Родниковского рудопроявление) и юго-восточной части площади рекомендуется выполнить электроразведочные измерения до глубин в 700–1200 м. При планировании заложения скважин рекомендованы предварительные детальные работы методами электроразведки (ЗС, электро-томография, ВП) в зонах перспективных аномалий на предмет уточнения их размеров и выявления возможных ореолов вкрапленного оруденения в верхней части разреза для лучшей локализации рудных тел.

- теллурических зондирований при решении рудных задач // Записки Горного института. – 2017. – Т. 223. – С. 9–19.
12. Тригубович Г.М., Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г. ЗД-электроразведка становлением поля. – Новосибирск: Сибирская издательская фирма «Наука» РАН, 2009. – 217 с.
13. Kamenetsky F.M., Trigubovich G.M., Chernyshev A.V. The geological medium induced polarization as an electromagnetic phenomenon // Extended Abstracts. 22<sup>nd</sup> EM Induction Workshop. – Weimar, Germany, August 24–30, 2014. – P. 4.
14. Displacement currents in geoelectromagnetic problems / V. Mogilatov, M. Goldman, M. Persova, Y. Soloveichik // Journal of Applied Geophysics. – 2014. – V. 105. – P. 133–137.
15. Отчет о результатах поисково-оценочных работ на полиметаллы на участке Убинский. ТОО ГРК «Топаз» / А.Н. Егоров, В.И. Маслов, А.В. Петрич, И.Л. Сериков, С.Л. Милованов, А.Г. Зоркина, Е.Ф. Дауытов. – Усть-Каменогорск, 2016. – 210 с.
16. Wait J.R. Transient electromagnetic field in the conducting medium // Geophysics. – 1951. – V. 2. – № 16. – P. 213–221.
17. Kaufman A.A., Oristaglio M., Alekseev D. Principles of Electromagnetic Methods in Surface Geophysics. – Amsterdam: Elsevier, 2014. – P. 313–464.
18. Система интерпретации данных зондирования методом переходных процессов EMS / О.Г. Хабинов, И.А. Чалов, А.А. Власов, Е.Ю. Антонов // ГЕО-Сибирь-2009: Сборник материалов V Международного научного конгресса. – Новосибирск, 2009. – С. 108–113.
19. Каминский А.Е. Программа ZondTEM1D. URL: <http://zond-geo.ru> (дата обращения 15.09.2017).
20. Perrone A., Lapenna V., Piscitelli S. Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: a review // Earth-Science reviews. – 2014. – № 135. – P. 65–82.
21. Ability of high-resolution resistivity tomography to detect fault and fracture zones: application to the Tournemire experimental platform, France / C. Gelis, M. Noble, J. Cabrera, S. Penz, H. Chauris, E.M. Cushing // Pure and Applied Geophysics. – 2016. – № 173. – P. 573–589.
22. Morelli G., LaBrecque D.J. Advances in ERT inverse modelling // European Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 1996. – V. 1. – № 2. – P. 171–186.

Поступила 20.09.2017 г.

#### Информация об авторах

**Бабушкин С.М.**, заместитель директора филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук».

**Егоров А.Н.**, главный геолог ТОО «Геологоразведочная компания "Топаз"».

**Неведрова Н.Н.**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, доцент Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент Новосибирского государственного университета.

**Шапаренко И.О.**, инженер Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 550.837.6

## RESULTS OF POLYMETALLS SEARCH-EXPLORATION INVESTIGATIONS USING ELECTRICAL SURVEYING METHODS WITH CONTROLLED SOURCES IN GORNY ALTAI

**Sergey M. Babushkin<sup>1</sup>,**

[bab@gs.sbras.ru](mailto:bab@gs.sbras.ru)

**Alexey N. Egorov<sup>2</sup>,**

[uk\\_ch\\_alex@mail.ru](mailto:uk_ch_alex@mail.ru)

**Nina N. Nevedrova<sup>3,4</sup>,**

[NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru](mailto:NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru)

**Ilya O. Shaparenko<sup>3</sup>,**

[ShaparenkoI@ipgg.sbras.ru](mailto:ShaparenkoI@ipgg.sbras.ru)

<sup>1</sup> Seismological Branch of Federal Research Center «Russian Academy of Sciences Geophysical Survey», 3, Academician Koptyug Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>2</sup> Geological Prospecting Company «Topaz», 1, Geologicheskaya street, 070001, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan.

<sup>3</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 3, Academician Koptyug Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>4</sup> Novosibirsk State University, 2, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance** of the work is caused by the need to search for new industrial ore manifestations, due to the fact that most of the explored deposits have already been worked out.

**The aim** of the research is to identify ore promising objects in deep horizons and flanking parts of the Ubinsk ore field of the Rudny Altai using electromagnetic methods of direct and alternating current.

**Methods of research.** Transient electromagnetic method with inductive installations and DC electrical resistivity tomography were used to obtain field data. Interpretation was carried out using interactive simulation and inversion software complexes ERA, EMS, ZondTEM1D. The results were justified based on the analysis and comparison of geological and geophysical data.

**Results.** According to the transient electromagnetic method the authors have plotted the sections along the observation profiles, area distributions of the electrical resistivity at several depth intervals, as well as three-dimensional models of promising zones of ore. For the first time, three types of anomalous zones were identified, corresponding to ore objects, differing in size and depth of occurrence. According to the results of electrical resistivity tomography, the manifestation of fault structures in the upper part of the section is traced. The subsequent detailed work is grounded by methods of electrical prospecting within the allocated perspective zones.

**Conclusions.** The use of electroprospecting methods is effective for the search for polymetals in the area of Rudny Altai. According to the sounding, the authors confirmed the prospects for polymetallic rocks in the southeastern part of the Ubinsk area, where the greatest depths of ore occurrence objects have been obtained. Geological and electro-prospecting data were recommended for electric survey to of 700–1200 m depth.

### Key words:

Rudny Altai, Ubinsk ore field, transient electromagnetic method, electrical resistivity tomography, geoelectrical sections, three-dimensional geoelectrical models, anomalous zones promising for polymetals.

### REFERENCES

1. Dolgal A.S., Khristenko L.A. Results and development of geophysical researches for prospecting of ore gold into the eastern flank of Kuznetsk Ala-Tau. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*, 2008, no. 2, Iss. 12, p. 57–69. In Rus.
2. Andreeva E.V., Bobachev A.A., Varentsov I.M., Vereshchagina M.I., Kulikov V.A., Yakovlev A.G., Yakovlev D.V. Kompleksirovanie geofizicheskikh metodov pri poiskakh medno-nikelevykh rud na obyektakh GMK «Norilsky Nikel» [Complexing of geophysical methods in searching for copper-nickel ores at the sites of MMC «Norilsk Nickel»]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2006, no. 8, pp. 71–79.
3. Shkabarnya N.G., Stvolov B.L. Interpretation of electrical sounding data in the search for ilmenite ores in Primorye. *Russian Geology and Geophysics*, 1996, vol. 37, no. 4, pp. 111–114. In Rus.
4. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 1996, no. 44 (1), pp. 131–152.
5. Loke M.H. resistivity and IP imaging. Geotomo Software Pty Ltd. 2015. Available at: <http://www.geotomosoft.com> (accessed 15 September 2017).
6. Balkov E.V., Fadeev D.I., Karin Yu.G., Manshteyn A.K., Manshteyn Yu.A., Panin G.L. A new approach to shallow electromagnetic sounding. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, no. 5, pp. 783–791. In Rus.
7. Kulikov V.A., Bobachev A.A., Yakovlev A.G. Application of electrical resistivity tomography in deep mining prospecting. *Geophysics*, 2014, no. 2, pp. 39–46. In Rus.
8. Korotkov Yu.V. Possibilities of inductive pulse geoelectricians in search and investigation of gold and platinoids placers. *Geophysics*, 2016, no. 2, pp. 54–60. In Rus.

9. Babushkin S.M., Nevedrova N.N. Apparaturnye i metodicheskie sredstva pri poiskakh rudnykh mestorozhdeniy metodom nestatsionarnogo elektromagnitnogo zondirovaniya [Instrumental and methodical means in the search for ore deposits by the method of non-stationary electromagnetic sensing]. *Nedropolzovanie. Gornoe delo. Novye napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh. Geojekologiya. Materialy XI mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Subsoil use. Mining. New directions and technologies for prospecting, exploration and development of mineral deposits. Geocology. Materials of the 10<sup>th</sup> International Scientific Conference]. Novosibirsk, 2017. Vol. 2, pp. 271–275.
10. Ivanov P.V., Alekseev D.A., Bobachev A.P., Pushkarev P.Yu., Yakovlev A.G. On integrated application of the VES and TEM geophysical methods. *Inzhenernye izyskaniya*, 2011, no. 11, pp. 42–51. In Rus.
11. Kulikov V.A., Kaminsky A.E., Yakovlev A.G. Combined 2D inversion of electrotomographic and audio-magnetotelluric sounding data to solve mining problems. *Zapiski Gornogo instituta*, 2017, vol. 223, pp. 9–19. In Rus.
12. Trigubovich G.M., Persova M.G., Soloveychik Yu.G. *3D-elektrozazvedka stanovleniem polya* [3D electrical prospecting by sounding]. Novosibirsk, Nauka RAN Publ., 2009. 217 p.
13. Kamenetsky F.M., Trigubovich G.M., Chernyshev A.V. The geological medium induced polarization as an electromagnetic phenomenon. *Extended Abstracts, 22<sup>nd</sup> EM Induction Workshop*. Weimar, Germany, August 24–30, 2014. pp. 4.
14. Mogilatov V., Goldman M., Persova M., Soloveichik Y. Displacement currents in geoelectromagnetic problems. *Journal of Applied Geophysics*, 2014, vol. 105, pp. 133–137.
15. Egorov A.N., Maslov V.I., Petrich A.V., Serikov I.L., Milovanov S.L., Zorkina A.G., Dautov E.F. *Otchet o rezultatakh poiskovo-otsenochnykh rabot na polimetally na uchastke Ubinsky* [Report on results of polymetals prospecting in Ubinsk area]. Ust-Kamenogorsk, Topaz Publ., 2016. 210 p.
16. Wait J.R. Transient electromagnetic field in the conducting medium. *Geophysics*, 1951, vol. 2, no. 16, pp. 213–221.
17. Kaufman A.A., Oristaglio M., Alekseev D. *Principles of Electromagnetic Methods in Surface Geophysics*. Amsterdam, Elsevier, 2014. pp. 313–464.
18. Khabinov O.G., Chalov I.A., Vlasov A.A., Antonov E.Yu. Sistema interpretatsii dannykh zondirovaniya metodom perehodnykh protsessov EMS [System for interpretation of transient electromagnetic sounding data EMS]. *GEO-Sibir-2009: Sbornik materialov V Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa* [Geo-Sibir. Materials of V<sup>th</sup> International scientific congress]. Novosibirsk, 2009. pp. 108–113.
19. Kaminsky A.E. *Programma ZondTEM1D* [ZondTEM1D]. Available at: <http://zond-geo.ru> (accessed 15 September 2017).
20. Perrone A., Lapenna V., Piscitelli S. Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: a review. *Earth-Science reviews*, 2014, no. 135, pp. 65–82.
21. Gelis C., Noble M., Cabrera J., Penz S., Chauris H., Cushing E.M. Ability of high-resolution resistivity tomography to detect fault and fracture zones: application to the Tournemire experimental platform, France. *Pure and Applied Geophysics*, 2016, no. 173, pp. 573–589.
22. Morelli G., LaBrecque D.J. Advances in ERT inverse modelling. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 1996, vol. 1, no. 2, pp. 171–186.

Received: 20 September 2017.

#### Information about the authors

**Sergey M. Babushkin**, Deputy Director, Seismological Branch of Federal Research Center «Russian Academy of Sciences Geophysical Survey».

**Alexey N. Egorov**, Chief geologist, Geological Prospecting Company «Topaz».

**Nina N. Nevedrova**, Dr. Sc., leading researcher, Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

**Ilya O. Shaparenko**, engineer, Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

УДК 624.139.68

## КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ СООРУЖЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИЯХ СО СКЛОНОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Конюшков Владимир Викторович<sup>1</sup>,  
v.konyushkov@mail.ru

Веселов Анатолий Александрович<sup>1</sup>,  
gbk@spbgasu.ru

Кондратьева Лидия Никитовна<sup>1</sup>,  
kondratjevaln@yandex.ru

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, 5.

**Актуальность.** Изыскания, проектирование, строительство и эксплуатация различных сооружений в регионах с горным и предгорным рельефом являются сложными комплексными задачами. Территории с горным рельефом, как правило, характеризуются склоновыми процессами: обвалами, осыпями, оползнями, эрозией и т. д. Эти процессы могут возникать самостоятельно в природных условиях, а также при воздействии производственно-хозяйственной деятельности человека. Научными исследованиями устойчивости склонов и откосов занимаются специалисты из различных отраслей производства и промышленности: при строительстве и эксплуатации автомобильных и железных дорог, гидротехническом строительстве, разработке карьеров с месторождениями полезных ископаемых, в горнодобывающей промышленности, при освоении и благоустройстве новых территорий и т. д. В случае развития аварийной ситуации от воздействия природных и техногенных факторов необходимо принимать своевременные компенсационные мероприятия по обеспечению устойчивости склонов и откосов. Для этого необходимо проводить качественные и своевременные инженерные изыскания. Безопасное функционирование отраслей производства и промышленности в сложных условиях склонов и откосов необходимо сопровождать комплексным анализом результатов инженерных изысканий и квалифицированным проектированием, строительством и эксплуатацией строящихся и существующих сооружений.

**Цель исследования:** комплексный анализ результатов инженерных изысканий территории с горным рельефом для оценки активности склоновых процессов на исследуемой территории, безопасного проектирования, строительства и эксплуатации сооружений.

**Объект исследования:** территория со сложным рельефом с признаками проявления склоновых процессов.

**Методика** исследования базируется на многофакторном анализе результатов инженерных изысканий путем выявления основных признаков развития склоновых процессов на исследуемой территории. По результатам анализа выполняется районирование территории с признаками наличия или отсутствия склоновых процессов.

**Результаты исследования:** районирование территории по признакам проявления склоновых процессов по результатам различных видов инженерных изысканий: геодезических, геологических, гидрометеорологических, экологических и геотехнических.

### Ключевые слова:

Инженерные изыскания, склоновые процессы, оползни, обвалы, осыпи, эрозия, природные и техногенные воздействия, геотехнический мониторинг.

### Введение

Работы по изысканиям, проектированию, строительству и эксплуатации территорий со сложным горным и предгорным рельефом характеризуется повышенной сложностью [1, 2]. Начальным этапом любого проектирования и строительства является проведение инженерных изысканий. Главными требованиями к изысканиям являются: достоверность, достаточность, правильная интерпретация результатов и возможность прогноза изменений с учетом природных условий и техногенных воздействий.

Последствия недоучета развития склоновых процессов могут быть достаточно серьезны: от начальных признаков в виде незначительной эрозии, суффозии и поверхностных оползней до тяжелых необратимых аварийных ситуаций: осыпей, обвалов и глубоких оползней [3, 4]. Одним из эффективных способов решения этой проблемы является районирование территорий по степени опасности

склоновых процессов на основе комплексного анализа результатов инженерных изысканий. Преимуществами данного способа являются натурные исследования территории на конкретных участках с выявлением основных признаков, свидетельствующих о наличии либо отсутствии оползневой опасности [5, 6].

Научная новизна настоящего исследования заключается в многофакторном аналитическом анализе результатов инженерных изысканий, на основе которого выявляется степень опасности развития склонового процесса и дается прогноз оползневой опасности.

Цель исследования заключается в том, чтобы уже на этапе проведения инженерных изысканий иметь полное представление об основных характеристиках территории, на основе которых можно рекомендовать наиболее оптимальные мероприятия по безопасному проектированию, строительству и эксплуатации сооружений в этих условиях.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- оценить влияние формы и углов наклона рельефа территории на оползневую опасность;
- оценить влияние напластований грунтов, их физико-механических свойств и гидрогеологических условий на развитие склонового процесса;
- проанализировать влияние гидрометеорологических условий территории на активизацию склоновых процессов;
- исследовать влияние геоботанических условий территории на устойчивость склонов и откосов;
- определить необходимый и достаточный состав и объемы работ по геотехническому мониторингу для прогнозирования развития склоновых процессов во времени.

Все эти задачи можно решить путем проведения инженерных изысканий на основе детально проработанного технического задания. Обязательными требованиями к составу и объемам работ по инженерным изысканиям являются указания СП 47.13330.2016. Согласно этому нормативному документу к инженерным изысканиям относятся:

- геодезические;
- геологические;
- гидрометеорологические;
- экологические;
- геотехнические.

В основной комплекс работ при проведении инженерных изысканий включают:

- определение основных характеристик рельефа территории на основе составления топографо-геодезических планов;
- определение напластований грунтов, их физико-механических свойств путем проведения полевых и лабораторных исследований;
- изучение режимов инфильтрации, стока и фильтрации поверхностных и подземных вод по наблюдениям за гидрологическими постами, а также анализ региональных особенностей климата путем периодических наблюдений по метеостанциям;
- исследование геоботанических условий территории при экологических изысканиях;
- проведение геотехнического мониторинга с начала изысканий, на период проектирования и строительства и периодические наблюдения на протяжении всего срока эксплуатации объекта.

Результаты инженерных изысканий должны быть взаимосвязаны между собой для их совместного комплексного анализа [7–10].

#### Геодезические изыскания

Как правило, инженерные изыскания начинаются с анализа архивных данных по результатам ранее проведенных топографо-геодезических изысканий. Затем согласно техническому заданию на геодезические изыскания выполняется обновление топографо-геодезических планов. На планах выполняется отображение рельефа территории в виде горизонтальных изолиний высот. По топогра-

фо-геодезическим планам можно выполнить анализ сложности рельефа, оценить характерные особенности геоморфологии, проложить временные дороги для проезда техники, определить наиболее оптимальные участки для строительства и эксплуатации сооружений.

В геоморфологическом отношении территория исследуемого участка расположена в районе хребта Псежако и относится к провинции Западного Кавказа. Территория расположена в областях с низкорным и среднегорным рельефом. Рельеф характеризуется разнообразием геоморфологических элементов. Здесь выделяются водораздельные гребни, денудационные склоны различной крутизны, пологие террасовидные участки склонов, балки, промоины, ложбины, русловые части и пойменные части постоянных водотоков.

Площадка изысканий расположена вдоль существующей автодороги и проходит по высокой пойме и первой надпойменной террасе рек Ачипсе и Лаура. Далее трасса поднимается по эрозионно-денудационным склонам хребта Псежако, преимущественно северо-западной и северной экспозиции. Склоны на этом участке трассы неровные, нарушенные оползнями (как старыми, стабилизировавшимися, так и активными), эрозионными обвальными-осыпными уступами, проявлениями крипа. Крутизна склонов изменяется от 17 до 45°; преобладают склоны средней крутизны (20–30°). На склонах развиты постоянные и временные водотоки.

На высотной отметке 1140 м трасса выходит на относительно выровненную приводораздельную часть хребта Псежако. Хребет Псежако относится к высокогорным и среднегорным, относительно выположенным и слабо расчленённым хребтам, имеет направление, параллельное Главному Кавказскому хребту.

Рельеф северной части хребта Псежако сформировался в период плейстоценовых оледенений и за счёт элювиально-делювиальных денудационных процессов существенно изменялся в голоцене. Грунты склона в этом направлении могут быть отнесены к элювиально-делювиально-флювиогляциальным накоплениям. Базисом эрозии для этого участка являются в первую очередь водотоки, стекающие со склонов гор. Кроме того, рельеф осложнён древнеоползевыми деформациями, а также следами современного смещения поверхностного рыхлого слоя грунта (явление крипа).

Протяжённость хребта Псежако порядка 5 км, с перепадами высот от 547 м в западной части (р. Лаура) до 1936 м в восточной его оконечности. Превышение гребневой части хребта над подножием его склонов повсеместно достигает 800–1000 м и более.

Поверхность исследованной территории неровная, холмистая, частично заросшая лесом, пересекается многочисленными поверхностными водотоками. В зонах понижения происходит скопление воды, образуются мочажины. Угол падения поверхности прилегающих к дороге склонов изменя-

ется от 17 до 55°. Экспозиция склона преимущественно северная.

Участок изысканий расположен в верховьях бассейна реки Мзымта. Его пересекают правобережные притоки реки Мзымта – реки Ачипсе, Лаура, многочисленные поверхностные водотоки, являющиеся притоками этих рек. Некоторые небольшие водотоки носят сезонный характер.

Важным результатом геодезических изысканий является схема территории с отображением углов наклонов рельефа [11]. На рис. 1 приведена схема территории с районированием углов наклонов рельефа. По схеме можно увидеть, что область, выделенная пунктирной линией, обладает наибольшими углами наклона рельефа – до 55°, и, следовательно, наибольшими рисками развития опасных склоновых процессов.

#### Геологические изыскания

Результатами геологических изысканий являются: определение мощности и распространения напластований грунтов, гидрогеологические условия территории, физико-механические свойства разделенных инженерно-геологических элементов, а также районирование территории по наличию или отсутствию склоновых процессов.

Согласно результатам инженерно-геологических изысканий, на исследуемой территории начиная от планировки, были определены следующие классы: дисперсные и крупнообломочные грунты, а также скальные породы. В геологическом строении объекта изысканий принимают участие четвертичные отложения и коренные ни-

жнеюрские породы. В пределах участка изысканий выявлены отложения следующего генезиса:

- техногенные (t);
- аллювиальные (a);
- делювиально-пролювиальные (dp);
- элювиальные (e).
- нижнеюрские (J1).

По результатам инженерных изысканий на объекте выделены следующие инженерно-геологические элементы:

**ИГЭ-1а (tQIV). Насыпной грунт – древесный грунт с суглинистым твердым заполнителем, неоднородный, водонасыщенный, средней прочности.** Содержание заполнителя составляет 42 %. Заполнитель представлен суглинком легким пылеватым твердым и полутвердым. Особенностью данного слоя является неоднородность состава (внутри слоя вскрываются маломощные линзы щебнистого грунта и суглинка) и наличие редких включений строительного мусора, асфальта. Слой имеет мощность от 0,5 до 6,2 м и встречается фрагментарно на изучаемой территории, слагает насыпи дорог и обратную засыпку подпорных стен. Залегает преимущественно с поверхности, и под другими насыпными грунтами. ИГЭ-1а подстилается грунтами делювиально-пролювиального генезиса различного состава. Глубина залегания подошвы насыпного грунта колеблется в пределах от 0,5 до 6,2 м, абсолютные отметки подошвы – от 560,6 до 1432,3 м.

**ИГЭ-1б (tQIV). Насыпной грунт – суглинок легкий пылеватый древесный твердый.** Грунт коричневато-серый, характеризуется неоднородно-

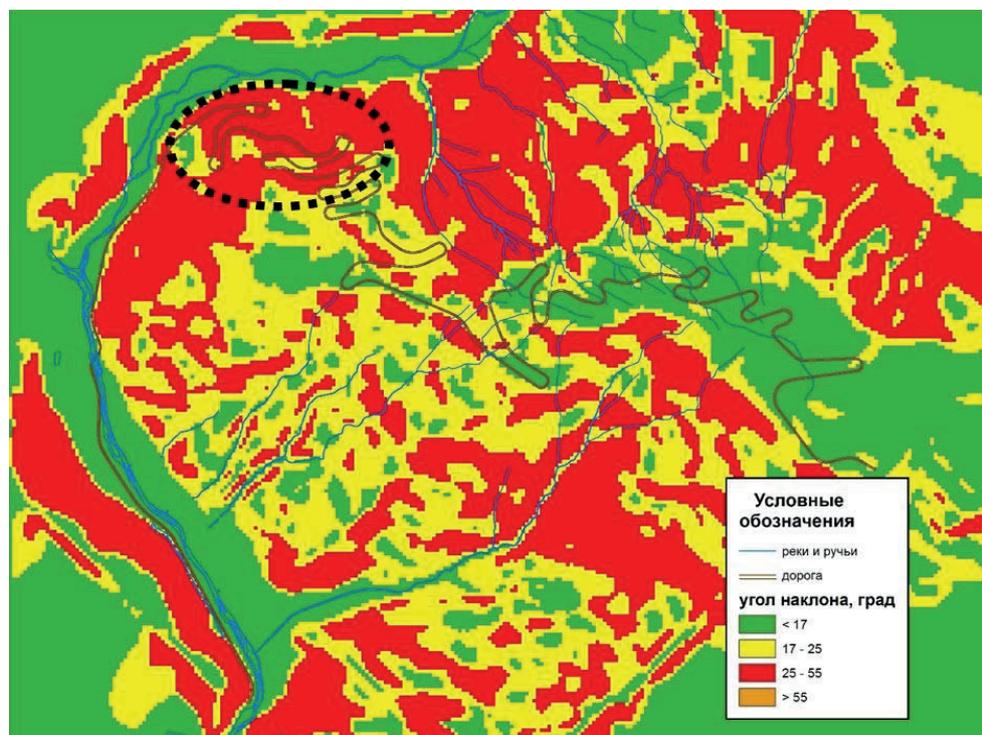


Рис. 1. Схема территории с цветовой районированием углов наклона рельефа по результатам геодезических изысканий [11]

Fig. 1. Scheme of the territory zoning with the color angles of slope of the terrain according to the results of geodetic surveys [11]

стью состава (внутри слоя вскрываются гнезда и линзы дресвяного грунта, суглинка дресвяного тугопластичного и полутвердого, глины твердой) и наличием редких включений строительного мусора, асфальта. Насыпной дресвяный суглинок широко распространен на рассматриваемой территории и слагает насыпи дорог, отсыпку подпорных стен и других сооружений. Залегает с поверхности, подстилается грунтами делювиально-пролювиального генезиса различного состава. Вскрытая мощность изменяется от 0,4 до 9,5 м, абсолютные отметки подошвы слоя – от 553,7 до 1419,6 м.

**ИГЭ-2а (dpQIV). Дресвяный грунт с суглинистым твердым заполнителем, неоднородный, водонасыщенный, средней прочности.** Заполнитель представлен серовато-коричневым суглинком легким пылеватым твердым, содержание заполнителя 44 %. Обломочный материал представлен аргиллитом, редко – песчаником. Грунт неоднородный, содержит линзы и прослой суглинка гравелистого и дресвяного различной консистенции, глины твердой и тугопластичной, щебенистого грунта, редкие глыбы аргиллита. ИГЭ-2а залегают под насыпными грунтами и под делювиально-пролювиальными суглинками щебенистыми полутвердыми, подстилается грунтами различного генезиса – делювиально-пролювиальными и элювиальными отложениями, коренными нижнеюрскими породами. Вскрытая мощность слоя изменяется в широких пределах – от 0,9 до 17,0 м, абсолютные отметки подошвы – от 575,8 до 1411,0 м.

**ИГЭ-3 (dpQIV). Щебенистый грунт неоднородный, средней степени водонасыщения, средней прочности.** Щебенистый грунт серовато-коричневого цвета вскрыт фрагментарно на всей территории участка, залегают преимущественно под насыпными грунтами и под суглинком щебенистым полутвердым делювиально-пролювиального генезиса, в единичных случаях вскрыт с поверхности. Подстилается в основном элювиальными отложениями, редко – суглинком щебенистым полутвердым делювиально-пролювиального генезиса. Обломочный материал представлен аргиллитом, редко песчаником. Слой неоднородный, в его составе вскрываются маломощные линзы и прослой дресвяного грунта с супесчаным и суглинистым заполнителем, суглинка твердого, редкие глыбы малопрочного аргиллита. Вскрытая мощность изменяется в пределах от 1,1 до 14,5 м, абсолютная отметка подошвы – от 596,5 до 1424,2 м, глубина подошвы – от 2,0 до 19,5 м.

**ИГЭ-5а (dpQIV). Суглинок легкий пылеватый дресвяный твердый.** Широко распространен на изучаемой территории, залегают под техногенными образованиями, под грунтами делювиально-пролювиального генезиса, а также выклинивается на поверхность. Подстилается элювиальными отложениями и коренными нижнеюрскими породами. Суглинки серовато-коричневого цвета, с обломками аргиллита, редко песчаника, вмещают маломощные линзы и прослой дресвяного и щебе-

нистого грунтов с суглинистым заполнителем, в единичных случаях – глины твердой и тугопластичной, суглинка дресвяного тугопластичного. Вскрытая мощность слоя изменяется в широких пределах от 1,3 до 30,0 м, абсолютная отметка подошвы – от 633,8 до 1419,8 м, глубина подошвы – от 1,8 до 30,0 м.

**ИГЭ-6б (dpQIV). Суглинок легкий пылеватый щебенистый полутвердый.** Широко распространен на изучаемой территории, залегают под техногенными образованиями, под грунтами делювиально-пролювиального генезиса, а также в единичных случаях выклинивается на поверхность. Подстилается элювиальными отложениями и коренными нижнеюрскими породами. Грунты неоднородны, в слое суглинков щебенистых (обломочный материал представлен аргиллитом, редко песчаником) вскрываются маломощные линзы и прослой дресвяного и щебенистого грунтов с суглинистым заполнителем, суглинка твердого, в единичных случаях – супеси твердой. Вскрытая мощность слоя изменяется в широких пределах от 0,8 до 16,5 м, абсолютная отметка подошвы – от 550,7 до 1428,4 м, глубина подошвы – от 0,8 до 30,0 м.

**ИГЭ-а2 (аQIII-IV). Гравийный грунт неоднородный, водонасыщенный, прочный.** Гравийный грунт серого цвета распространен локально в долине р. Ачипсе и залегают с поверхности, под насыпными грунтами или под аллювиальными галечниковыми грунтами. Содержание заполнителя 28 % (по отдельным образцам до 45 %), представлен суглинком легким песчанистым полутвердой консистенции, с линзами и прослоями суглинка легкого пылеватого гравелистого полутвердого. Слой содержит включения валунов и гальки различной степени окатанности и формы; обломочный материал представлен диоритами, порфиридами, сланцами, туфами. Максимальная вскрытая мощность данного слоя составляет 19,4 м, глубина подошвы слоя изменяется от 5,0 до 25,8 м.

**ИГЭ-а3 (аQIII-IV). Галечниковый грунт неоднородный, водонасыщенный, прочный.** Галечниковый грунт распространен локально в долине р. Ачипсе и залегают с поверхности, под насыпными грунтами или под аллювиальными гравийными грунтами. Галечниковый грунт с суглинистым заполнителем 28 % (по отдельным образцам до 38 %), заполнитель – суглинок легкий пылеватый полутвердый. Слой содержит включения валунов, обломочный материал различной степени окатанности и формы, представлен диоритами, порфиридами, сланцами, туфами. Вскрытая мощность слоя от 2,8 до 4,4 м, абсолютная отметка его подошвы изменяется от 543,7 до 556,8 м, максимальная глубина залегания подошвы составляет 2,8 м, минимальная – 6,4 м.

**ИГЭ-92г (еQIII). Дресвяный грунт с суглинистым твердым заполнителем, неоднородный, водонасыщенный, средней прочности.** Распространен практически на всей изучаемой территории под техногенными и делювиально-пролювиальными отло-

жениями, подстиляется элювиальным щебенистым грунтом, элювиальным суглинком дресвяным твердым или коренными породами. Цвет грунта изменяется от серого до черного, заполнитель (44 %, по единичным образцам до 50 %) представлен преимущественно суглинком легким пылеватым твердым, в единичных случаях – супесью пластичной и твердой; внутри толщ ИГЭ-92г вскрыты отдельные блоки (глыбы) аргиллита средней прочности, линзы щебенистого грунта с суглинистым заполнителем и суглинка дресвяного твердого. Максимальная вскрытая мощность элювиального дресвяного грунта составила 25,9 м, абсолютные отметки подошвы слоя изменяются от 564,2 до 1397,3 м.

**ИГЭ-93г (еQIII). Щебенистый грунт, неоднородный, средней степени водонасыщения, средней прочности.** Распространен повсеместно под техногенными и делювиально-пролювиальными отложениями, а также под элювиальным дресвяным грунтом, подстиляется элювиальным суглинком дресвяным твердым или коренными породами, в редких случаях элювиальным дресвяным грунтом. Цвет грунта изменяется от серого до черного, содержание заполнителя 26 % (по отдельным образцам до 40 %), заполнитель представлен суглинком легким пылеватым твердым и тугопластичным. Грунт неоднородный, в слое встречены отдельные блоки (глыбы) аргиллита средней прочности, линзы дресвяного грунта с супесчаным заполнителем, суглинка полутвердого и суглинка дресвяного твердого. Максимальная вскрытая мощность элювиального щебенистого грунта составила 29,0 м, абсолютные отметки подошвы слоя изменяются от 575,3 до 1411,1 м, глубина подошвы слоя – от 4,7 до 40,0 м.

**ИГЭ-95г (еQIII). Суглинок легкий пылеватый дресвяный твердый.** Вскрыт локально под элювиальными крупнообломочными грунтами, а также под делювиально-пролювиальными отложениями, подстиляется преимущественно коренными нижнеюрскими породами. Цвет грунта изменяется от серого до черного, в толще ИГЭ-95г встречены линзы и прослой суглинка дресвяного тугопластичного, суглинка щебенистого твердого, дресвяного грунта с суглинистым заполнителем, в единичных случаях – супеси дресвяной твердой. Максимальная вскрытая мощность элювиального дресвяного суглинка составила 17,5 м, абсолютные отметки подошвы изменяются от 611,8 до 1050,3 м, глубина подошвы слоя – от 12,0 до 30,0 м.

**ИГЭ-9а (I<sub>1</sub>). Аргиллит низкой прочности, средней плотности, среднепористый, сильновыветрелый, размягчаемый.** Вскрыт под грунтами различного генезиса и подстиляется коренными нижнеюрскими аргиллитами средней прочности и прочными. Цвет аргиллита изменяется от серого до черного, встречены прослой аргиллита очень низкой прочности, плотного, средневыветрелого. Максимальная вскрытая мощность слоя составила 22,0 м, абсолютные отметки изменяются от 574,8 до 1405,8 м, глубина подошвы слоя – от 10,7 до 31,4 м.

**ИГЭ-9г (I<sub>1</sub>). Аргиллит средней прочности, очень плотный, слабопористый, размягчаемый.** Распространен на всей территории участка, залегает под четвертичными отложениями различного генезиса, реже под коренными породами (аргиллитами низкой прочности, песчаниками, порфиритами), подстиляется коренными нижнеюрскими аргиллитами прочными. Цвет аргиллита изменяется от серого до черного, внутри толщ встречены небольшие прослой аргиллита прочного. Максимальная вскрытая мощность слоя составила 35,3 м, абсолютные отметки изменяются от 549,0 до 1404,6 м, глубина подошвы слоя – от 30,0 до 40,0 м.

**ИГЭ-9д (I<sub>1</sub>). Аргиллит прочный, очень плотный, слабопористый, размягчаемый.** Вскрыт единичными скважинами на участке, залегает преимущественно под коренными нижнеюрскими аргиллитами низкой прочности и средней прочности. Цвет аргиллита изменяется от серого до черного. В толще аргиллита прочного встречены небольшие прослой аргиллита средней прочности. Максимальная вскрытая мощность составила 22,0 м, абсолютные отметки изменяются от 622,8 до 1355,4 м, глубина подошвы слоя – от 18,0 до 40,0 м.

**ИГЭ-10 (I<sub>1</sub>). Песчаник кварцевый прочный, очень плотный, слабопористый, неразмягчаемый.** Вскрыт единичными скважинами и залегает в основном под делювиально-пролювиальными грунтами, подстиляется порфиритами. В толще песчаника встречаются маломощные прослой аргиллита и алевролита. Вскрытая мощность слоя изменяется от 4,4 до 12,7 м, абсолютные отметки подошвы слоя – от 815,3 до 1356,4 м.

**ИГЭ-11 (I<sub>1</sub>). Порфирит очень прочный, очень плотный, непористый, неразмягчаемый.** Порфирит мелкозернистый серого цвета распространен локально (приурочен к интрузивным телам), залегает под делювиально-пролювиальными и элювиальными отложениями различного состава, подстиляется в основном коренными аргиллитами нижнеюрского возраста. Вскрытая мощность слоя изменяется от 4,5 до 18,2 м, абсолютные отметки подошвы слоя – от 629,3 до 1329,3 м, глубина подошвы – от 12,5 до 32,0 м.

#### Гидрогеологические изыскания

На территории объекта изысканий выделено два основных комплекса водоносных пластов: в четвертичных отложениях в виде вод порово-пластового типа и в коренных горных породах в виде трещинных вод спорадического распространения.

Порово-пластовые воды представлены водоносным горизонтом в гравийно-галечниковых грунтах. Основными источниками питания подземных вод являются поверхностные воды и атмосферные осадки, значительно в меньшей степени в питании горизонта участвуют подземные воды склоновых и коренных отложений. Режим подземных вод горизонта тесно связан с режимом поверхностных вод (гидравлическая связь с р. Ачипсе). Наиболее высо-

кие уровни подземных вод устанавливаются в весенний паводковый период, связанный с таянием снега и ливневыми осадками. Низкие уровни подземных вод наблюдаются в долинах рек к концу межженного периода, приходящегося на август. Коэффициент фильтрации водовмещающих гравийно-галечниковых отложений изменяется в широких пределах. Для аллювия с гравийно-глинистым и гравийно-суглинистым заполнителем значения коэффициента фильтрации не превышают 1–8 м/сут. По мере уменьшения содержания пылевато-глинистых частиц в заполнителе в средней части крупных долин коэффициенты фильтрации увеличиваются до 25–50 м/сут. Для низовьев крупных рек наиболее характерны коэффициенты фильтрации 60–250 м/сут. Коэффициенты фильтрации гравийных и галечниковых грунтов (ИГЭ-а2, ИГЭ-а3), определенные по результатам опытных экспресс-откачек, составляют 13–35 м/сут.

Поровые воды спорадически распространены в крупнообломочных четвертичных отложениях (ИГЭ-2а, ИГЭ-3, ИГЭ-5а, ИГЭ-6б, ИГЭ-9г, ИГЭ-9зг, ИГЭ-95г). Питание подземных вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, разгрузка – в поверхностные водотоки. Глубина залегания уровней воды в среднем изменяется от 1,9 до 9,8 м, максимальная глубина достигает 21 м. На отдельных участках горизонт полностью сдренирован (скважины при бурении оказывались часто безводными). Характер колебания уровней по сезонам года неоднозначен и зависит от периодов дождей и снеготаяния. Поднятие уровня грунтовых вод иногда обусловлено действием барражного эффекта на участках, прилегающих к подпорным стенам на свайном основании, где дренаж недостаточно эффективен. Фильтрационные параметры крайне неоднородны. Значения коэффициентов фильтрации, определенные по результатам опытных наливов и откачек, изменяются от  $8,5 \cdot 10^{-5}$  до 4,2 м/сут.

Трещинные воды спорадически распространены в нижне-среднеюрских отложениях и приурочены к верхней зоне повышенной трещиноватости, выявленной на отдельных участках горных пород. Водовмещающие отложения представлены преимущественно аргиллитами различной степени прочности и песчаниками (ИГЭ-9а, ИГЭ-9г, ИГЭ-9д, ИГЭ-10, ИГЭ-11). Питание подземных вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, а разгрузка – за счет дренажа ручьями, реками, в виде родников на склонах. При выходе ручьев на собственные конусы выноса они являются источниками питания подземных вод. Выполненные за последние годы гидрогеологические исследования позволили выявить характер залегания и крайне неоднородную степень обводненности массива горных пород нижне-среднеюрских отложений до глубины 100 м (ниже этой глубины юрские отложения не исследовались). Глубина залегания уровней, как правило, более 10 м, в среднем 12–23 м, по отдельным скважинам водораз-

дельной зоны достигает 30–70 м. Самые низкие уровни наблюдаются в октябре–ноябре, самые высокие – в мае–июле. В результате дождей и снеготаяния наблюдается довольно существенный подъем уровней, а в летний засушливый период их достаточно интенсивный спад. Фильтрационные параметры водоносного горизонта крайне неоднородны. Коэффициенты фильтрации изменяются от 0,0001 до 1,2 м/сут.

#### Физико-механические свойства грунтов

В таблице приведены физико-механические свойства грунтов. Из таблицы можно увидеть, что прочностные свойства крупнообломочных гравийно-дресвяных грунтов (2а, а2) имеют достаточно низкие значения: угол внутреннего трения –  $\varphi=14...20,9^\circ$ ; сцепление –  $c=0,006...0,042$  МПа. Для проверки достоверности значений прочностных характеристик грунтов природных склонов можно воспользоваться уравнением (1) для равноустойчивого откоса профессора Н.Н. Маслова [12]:

$$\psi_{stable} = \arctg \left( \operatorname{tg} \varphi_1 + \frac{c_1}{P} \right), \quad (1)$$

где  $\psi_{stable}$  – значение угла заложения склона в стабилизированном (устойчивом) состоянии, град;  $\varphi_1$  – значение угла внутреннего трения грунта, град.;  $c_1$  – значение сцепления грунта по результатам инженерно-геологических изысканий, кПа;  $P$  – нормальное давление на расчетной глубине от планировки от собственного веса грунтов и внешних нагрузок, кПа.

По вышеприведенной формуле легко вычислить интервалы предельных значений угла заложения равноустойчивых откосов при нормальном давлении в интервале 100...400 кПа. В зависимости от величины нормального давления при вышеприведенных значениях прочностных характеристик грунтов предельный угол заложения составит  $\alpha=20...34^\circ$ . Таким образом, при данных прочностных характеристиках грунтов угол заложения склона более  $34^\circ$  будет заведомо неустойчив, что, однако, не согласуется с фактическим состоянием склонов на данной территории с углами заложения до  $55^\circ$ . Согласно требованиям п. 6.3.3.9 СП 47.133330.2016, при инженерно-геологических изысканиях в районах развития склоновых процессов значения физико-механических характеристик грунтов необходимо уточнять обратными расчетами устойчивости склонов.

Если природный склон по результатам инженерных изысканий находится в стабилизированном состоянии, то для уточнения фактического значения угла внутреннего трения крупнообломочных, гравийно-галечниковых и дресвяных грунтов с глинистым заполнителем можно рекомендовать зависимость (2):

$$\alpha \approx \varphi_{correct} \approx \varphi_{rec}, \quad (2)$$

где  $\varphi_{correct}$  – корректируемое значение угла внутреннего трения грунта, приравняваемое к углу зало-

**Таблица.** Физико-механические свойства грунтов

**Table.** Physico-mechanical properties of soils

Характеристика грунта Characterization of soil		Номер слоя/Number of layer																
		1а	1б	а2	а3	2а	3	5а	6б	92г	93г	95г	9а	9г	9д	10	11	
Нормативные значения / Normative values	Метод сдвига целика Method of shifting a rear sight	Плотность грунта $\rho$ , г/см <sup>3</sup> Soil density, $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	2,13	2,04	2,09	2,11	2,08	1,86	2,07	2,05	2,27	2,38	2,17	2,11	2,66	2,69	2,60	2,70
		Сцепление $C$ , МПа Cohesion $C$ , МПа	0,01	0,017	0,019	0,018	0,057	0,040	0,033	0,027	-	-	-	-	-	-	-	-
		Угол внутреннего трения $\varphi$ , град. Internal friction angle $\varphi$ , deg.	27	24,5	27	36,5	17	23	18	20	-	-	-	-	-	-	-	-
	Метод ДальНИИС Method of DalNIIS	Сцепление $C$ , МПа Cohesion $C$ , МПа	0,022	0,036	0,009	0,010	0,022	0,014	0,040	0,028	0,022	0,018	0,031	-	-	-	-	-
		Угол внутреннего трения $\varphi$ , град. Internal friction angle $\varphi$ , deg.	20	20	24	23	20	20	20	20	20	20	20	-	-	-	-	-
	Модуль деформации (ДальНИИС) $E$ , МПа Modulus of deformation (DalNIIS) $E$ , МПа		31,0	27,6	33,2	37,4	31,6	39,1	23,6	28,2	34,6	46,3	23,5	-	-	-	-	-
Предел прочности на одноосное сжатие в сухом состоянии, $R_c$ (d), МПа Ultimate strength for uniaxial compression in dry condition, $R_c$ (d), МПа		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,1	70,3	86,4	119,1	275,5	
Предел прочности на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии, $R_c$ (w), МПа Ultimate strength for uniaxial compression in water saturated condition, $R_c$ (w), МПа		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,1	35,9	50,5	95,3	192,1	
Расчетные значения / Calculated values	$\alpha=0,95$	Плотность грунта $\rho$ , г/см <sup>3</sup> Soil density, $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	1,97	1,96	2,05	2,07	1,98	1,68	2,02	1,97	2,18	2,23	2,10	2,09	2,63	2,67	2,60	2,67
		Удельное сцепление $C$ , МПа Cohesion, $C$ , МПа	0,015	0,024	0,006	0,007	0,042	0,036	0,022	0,019	0,015	0,012	0,021	0,03	0,05	0,15	0,15	0,30
		Угол внутреннего трения $\varphi$ , град. Internal friction angle, $\varphi$ , deg.	17,4	17,4	20,9	20	14	17	15,6	17,4	17,4	17,4	17,4	26,6	28,8	38,7	38,7	40,4
	$\alpha=0,85$	Плотность грунта $\rho$ , г/см <sup>3</sup> Soil density, $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	2,04	1,99	2,07	2,09	2,02	1,76	2,04	2,00	2,22	2,29	2,13	2,10	2,64	2,68	2,59	2,68
		Сцепление $C$ , МПа Cohesion, $C$ , МПа	0,022	0,036	0,009	0,010	0,048	0,037	0,033	0,028	0,022	0,018	0,031	0,038	0,062	0,187	0,187	0,375
		Угол внутреннего трения $\varphi$ , град. Internal friction angle, $\varphi$ , deg.	20	20	23	22	15	20	18	20	20	20	20	32,0	34,5	45,0	45,0	46,7

жения склона ( $\alpha$ ) и рекомендуемому значению угла внутреннего трения в Приложении А СП 22.13330.2016 или по табл. 5 в СП 23.13330.2012, град;  $\alpha$  – значение угла заложения природного склона, град.;  $\varphi_{rec}$  – рекомендуемое значение угла внутреннего трения крупнообломочного грунта в зависимости от значения коэффициента пористости ( $e$ ) в Приложении А СП 22.13330.2016 или вида полускального грунта по табл. 5 в СП 23.13330.2012, град.

Поскольку сопротивление на сдвиг гравийно-галечниковых грунтов с глинистым заполнением определяется также сцеплением, то необходимо проверить достоверность значений сил сцепления

глинистого заполнителя. Для склона в стабилизированном состоянии можно рекомендовать зависимость (3) по определению сцепления:

$$c_{correct} = \frac{\operatorname{tg}(\alpha - \varphi_{correct}) \cdot P}{\operatorname{tg} \varphi_{correct}}, \quad (3)$$

где  $c_{correct}$  – корректируемое значение сцепления грунта, кПа;  $\alpha$  – фактический угол заложения склона, град.;  $\varphi_{correct}$ ,  $P$  – обозначения, соответствующие указанным в уравнении (1).

Уравнение (3) было определено для стабилизированного состояния склона при значениях углов заложения склона 34...55°, интервале давлений 100...400 кПа и при выполнении условия (4):

$$\alpha > \varphi_{correct} \quad (4)$$

В случае если условие (4) не выполняется, имеет место следующее неравенство (5):

$$\alpha < \varphi_{correct} \quad (5)$$

Уравнение (3) в этом случае также изменится и будет носить следующий вид (6):

$$c_{correct} = \frac{\text{tg}(\varphi_{correct} - \alpha) \cdot P}{\text{tg} \varphi_{correct}} \quad (6)$$

#### Районирование территории по степени опасности склоновых процессов

Для склонов в нестабилизированном состоянии при инженерно-геологических изысканиях необходимо в обязательном порядке выполнять районирование территории по степени опасности склоновых процессов [13, 14]. На рис. 2 приведена схема территории с районированием развития оползневых и эрозионных процессов по результатам инженерно-геологических изысканий. Районирование было разбито на три района и три подрайона:

**I** – районы условно неопасные – уклоны рельефа не превышают  $5^\circ$ , редко слабые процессы подтопления, на карте обозначены зеленым цветом;

**II** – районы потенциально опасные – уклоны рельефа от  $5$  до  $15^\circ$ , оползневые тела в стадии временной стабилизации, слабые процессы эрозии и

солифлюкции, на карте обозначены желтым цветом;

**III** – районы опасные – уклоны рельефа превышают  $15^\circ$ . В пределах этого района выделены три подрайона.

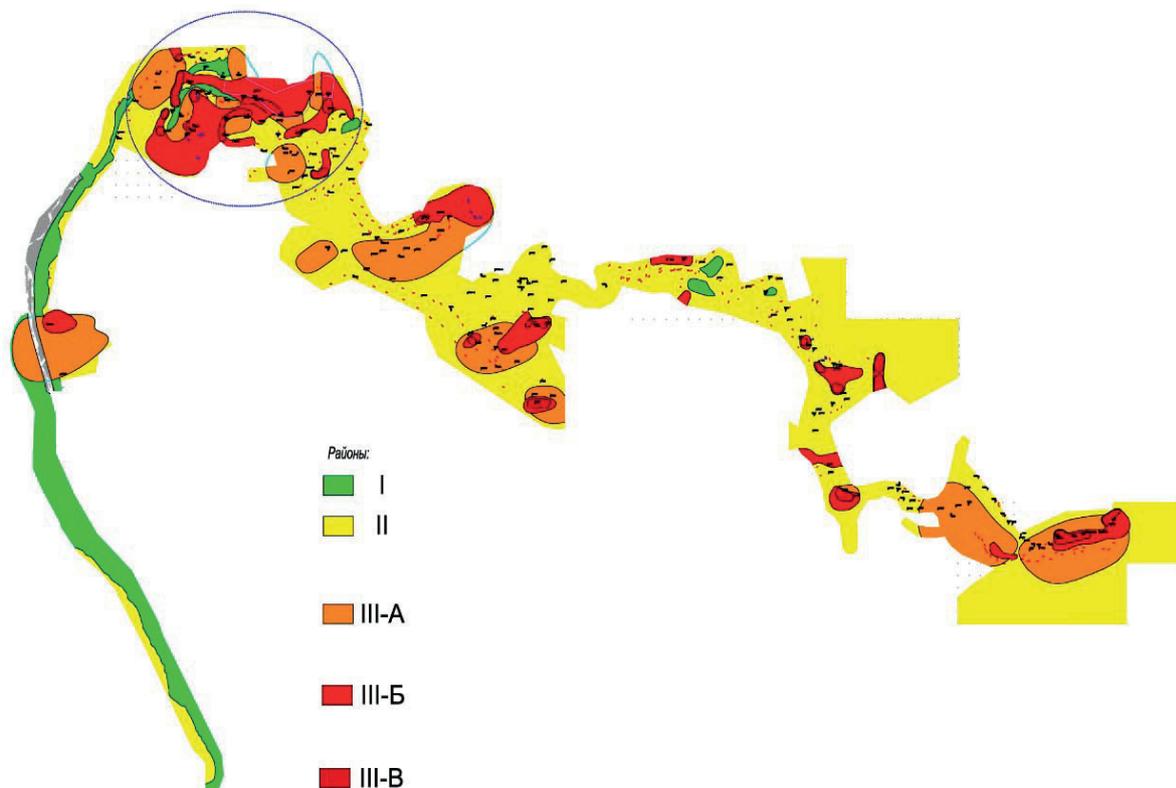
Подрайоны:

**III-A** – подрайон низкой степени опасности – уклоны рельефа от  $15$  до  $25^\circ$ , активное развитие эрозионных процессов и солифлюкции, подтопление, оползневые тела в стадии временной стабилизации, на карте обозначен оранжевым цветом.

**III-B** – подрайон средней степени опасности – уклоны рельефа от  $25$  до  $35^\circ$ , невысокие подрезки склонов, небольшие стенки отрыва оползневых тел, активные оползни и суффозия в техногенных отложениях, возможно развитие неглубоких деформаций (до  $5$  м), на карте обозначен розовым цветом.

**III-B** – подрайон высокой степени опасности – уклоны рельефа свыше  $35^\circ$ , высокие крутые подрезки склонов; наиболее активные инженерно-геологические процессы, оказывающие воздействие на инженерные сооружения; возможно развитие глубинных деформаций (от  $5$ ... $20$  м), на карте обозначен красным цветом.

Как видно на рис. 2, подрайоны со средней и высокой степенью опасности склоновых процессов преобладают в выделенной области с наиболее крутыми углами заложения склонов.



**Рис. 2.** Схема территории с районированием развития склоновых процессов по результатам инженерно-геологических изысканий [11]

**Fig. 2.** Scheme of the territory with zoning of slope process development on the results of engineering-geological surveys [11]

### Гидрометеорологические изыскания

Исследуемая территория обладает контрастным сложным рельефом с близким расположением к побережью Черного моря, что определяет климатические особенности района. Наличие высоких горных хребтов с высотными отметками, превышающими 3000 м и более, и значительных падений высотных отметок до 200 м, территориальное распространение на границах региона Чёрного, Азовского, Каспийского морей обуславливают различные условия взаимодействия территории с вторжениями холодных и тёплых воздушных масс и соответственно резкую вариативность климата.

Горная система Большого Кавказа расположена на пути движения влажных воздушных масс с запада на восток, что благоприятствует выпадению на юго-западном склоне обильных атмосферных осадков, по количеству которых данный район намного превышает многие регионы Российской Федерации.

По условной классификации атмосферных процессов год делится на две характерные половины. Холодное полугодие (ноябрь–апрель) отличается активизацией циклонической деятельности, что способствует выпадению в это время до 60 % годового количества атмосферных осадков. В тёплое полугодие (май–октябрь) кратковременные, сильные ливни сменяются засушливыми периодами. Расположение исследуемой территории в относительно низких широтах обуславливает интенсивный приток солнечной радиации, в связи с этим характерной особенностью климата является обилие солнечного света.

Климатические условия Большого Кавказа и Черноморского побережья отличаются исключительно высокой пространственно-временной изменчивостью.

По климатическому районированию территория относится к следующим климатическим подрайонам:

- IV Б (приморская часть до высотной отметки 200 м по абсолютной системе высот);
- IV Б1 (интервал высотных отметок 200...400 м по абсолютной системе высот);
- III Б1 (интервал высотных отметок 400...600 м по абсолютной системе высот);
- II Б1 (интервал высотных отметок 600...1000 м по абсолютной системе высот);
- II Б (интервал высотных отметок 1000...1600 м по абсолютной системе высот);
- II В (интервал высотных отметок 1600...3000 м по абсолютной системе высот).

Для территории характерны проявления сильных ливневых дождей с количеством осадков 120 мм за интервал времени менее 12 часов. Наибольший зафиксированный суточный максимум наблюдался в июне 1956 г. и составил 298 мм.

Расчетная продолжительность количества дней с осадками для 600 м БС составляет 176 дней/год, а на высоте 1650 м по БС – 199 дней/год. Средняя суточная интенсивность выпадения атмосферных

осадков составит для высоты 600 м – 11,5 мм/сутки, а для высоты 1650 м БС – 15,0 мм/сутки.

Количество дней с осадками в холодный период года (XI–III) оценивается в среднем для высоты 600 м БС – 90 дней, для высоты 1880 м БС – 108 дней, при максимальном количестве на данных высотах соответственно 138 и 150 (т. е. каждый день осадки) дней.

Продолжительность дней с обильными осадками (более 30 мм/сутки) для высоты 600 м составляет 15 дней, для высоты 1650 м БС – 29 дней.

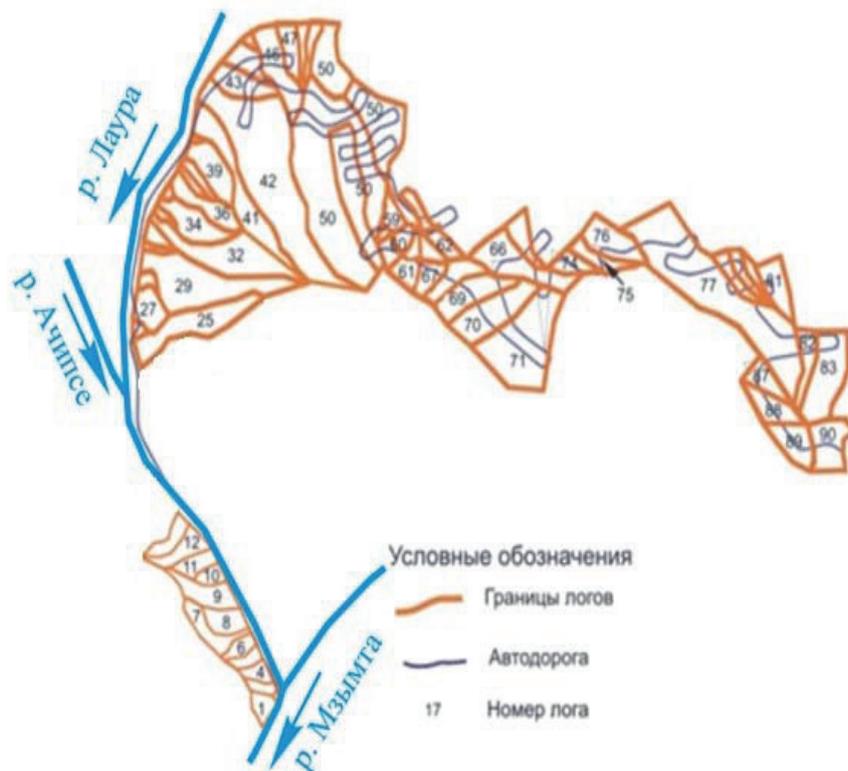
Осадки в период май–октябрь выпадают преимущественно в жидком виде в период ноябрь–апрель в твердой или смешанной фазе.

Развитие склоновых процессов часто активизируется при интенсивной инфильтрации атмосферных осадков, образовании поверхностных водосточков и изменении естественного режима фильтрации подземных вод [15, 16]. Для оценки потенциальных мест развития склоновых процессов по результатам инженерно-гидрометеорологических изысканий выполняется районирование территории с отображением искусственных и природных выемок: логов, оврагов, ложбин и т. д. На рис. 3 приведена схема территории с районированием логов, с действующими водотоками, по результатам инженерно-гидрометеорологических изысканий. Как видно из схемы, наибольшая концентрация логов расположена в северо-западной части территории, которая, как было указано ранее, имеет наибольшие углы наклона рельефа.

### Экологические (дендрологические или геоботанические) изыскания

Согласно дендрологическому (геоботаническому) обследованию территории, преобладающим видом древесно-кустарниковой растительности является бук восточный. На сухих склонах встречается дуб иберийский, каштан посевной, пихта кавказская, граб обыкновенный. На влажных и переувлажненных участках – ольха черная, тополь белый, ясень обыкновенный. Изредка среди аборигенной лесной растительности встречаются небольшие группы или одиночные экземпляры вишневидных птиц (черешни) и высокогорного клёна. Расположение древесно-кустарниковой растительности на участке неравномерное при причине вырубки части лесного массива и подрезки природных склонов для строительства автомобильной подъездной дороги, поэтому лесная растительность произрастает только на межтрассовых участках.

Согласно многочисленным исследованиям, вырубка деревьев и подрезка природных склонов приводит к ослаблению прочности грунтового массива, нарушению естественных водосточков и переувлажнению (или наоборот осушению) грунтового массива. Это в свою очередь активизирует опасные геологические процессы: оползни, эрозию, наклоны и падение деревьев и т. д. В данном случае на территории в результате неорганизованной вырубки деревьев, срезки растительного слоя



**Рис. 3.** Схема территории с районированием логов с действующими водотоками, по результатам инженерно-гидрометеорологических изысканий [11]

**Fig. 3.** Scheme of the territory with zoning of ravines with the existing watercourses by the results of engineering-hydrometeorological surveys [11]

и подрезки природных склонов произошла активизация склоновых процессов.

Склоновые процессы часто активизируются вследствие техногенного воздействия от строительства и эксплуатации. При освоении территорий на природную среду оказываются значительные воздействия при вырубке древесно-кустарниковой растительности, срезки почвенно-растительного слоя, изменения режима фильтрации поверхностных и подземных вод и т. д. В связи с этим в стандартную программу экологических изысканий рекомендуется включать исследования антропогенных изменений природной среды в процессе освоения, строительства и эксплуатации территорий и на основе этих работ выполнять районирование территории. На рис. 4 приведена схема территории с районированием мест интенсивной вырубке лесов, срезки почвенно-растительного слоя и изменения режима фильтрации поверхностных и подземных вод по результатам инженерно-экологических изысканий.

#### Геотехнические изыскания

Геотехнические изыскания заключаются в проведении мониторинга за деформациями зданий, сооружений, конструктивных элементов и грунтового массива [17–19]. По результатам анализа измерений выполняется районирование участков на

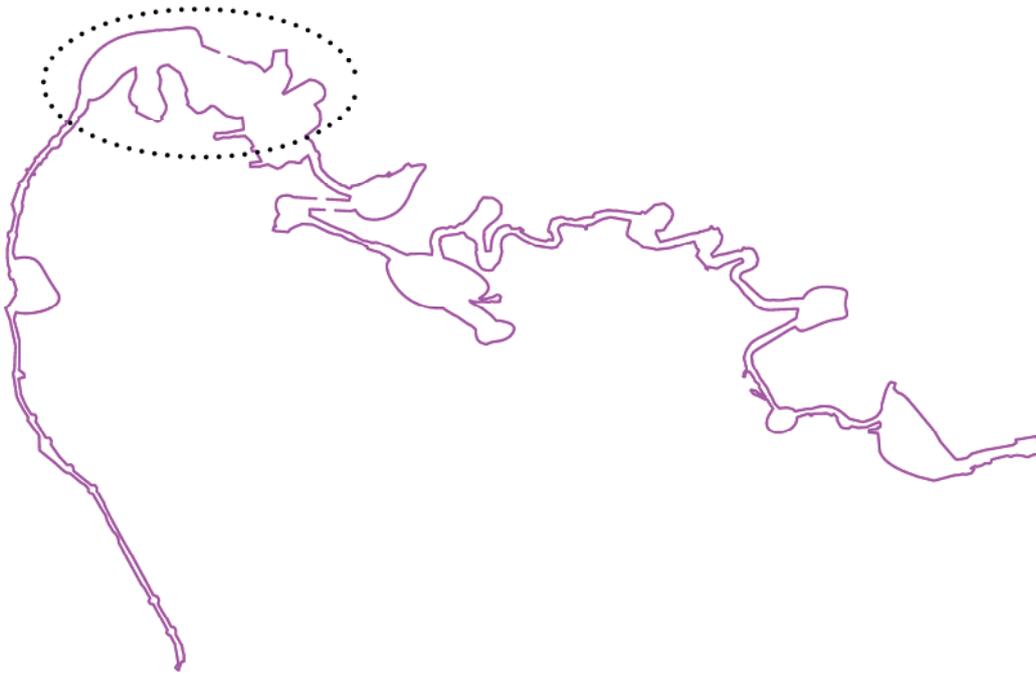
стабилизированное, условно стабилизированное и нестабилизированное состояния.

Как правило, в состав мониторинга входят следующие работы [20, 21]:

- определение устойчивости каркасной сети;
- определение координат и высот временных и постоянных опорных реперов;
- определение координат и высот элементов наблюдательной сети;
- измерение деформаций зданий, сооружений и грунтового массива;
- обработка и анализ результатов измерений;
- составление технических отчетов с выводами и рекомендациями.

Основными сложностями при производстве мониторинга являются:

- разнонаправленные деформации сооружений вследствие температурно-влажностных воздействий: промерзания–оттаивания–увлажнения–высушивания;
- развитие неравномерных деформаций грунтового основания, склонов и откосов из-за периодической либо постоянной активизации склоновых процессов;
- неизбежные погрешности проведения измерений в условиях горной местности с наличием различных аномальных особенностей климата и рельефа (резкие перепады высотных отметок,



**Рис. 4.** Схема территории с районированием мест интенсивной вырубке лесов, срезки почвенно-растительного слоя и подрезки природных склонов по результатам экологических изысканий [11]

**Fig. 4.** Scheme of the territory with zoning the areas of intense deforestation, cutting of soil and vegetation and trimming of natural slopes by the results of ecological surveys [11]



	- измерения не проводилось
■	- деформации менее 10 мм/год
■	- деформации от 10 мм/год до 20 мм/год
■	- деформации превышают 20 мм/год

**Рис. 5.** Схема территории с районированием и цветным отображением скорости развития деформаций по результатам геотехнических изысканий [11]

**Fig. 5.** Scheme of the territory with zoning and color display of deformation development rate according to the results of geotechnical investigations [11]

обильные дожди, снег, град, туман, метели, снежные лавины, сели и т. д.).

На рис. 5 приведена схема территории с районированием и цветовым отображением скорости развития деформаций по результатам геотехнических изысканий. В зависимости от скорости развития деформаций во времени интервалы цветовой шкалы составляют:

- стабилизированное состояние – менее 10 мм/год;
- условно стабилизированное состояние – 10...20 мм/год;
- нестабилизированное состояние – более 20 мм/год.

Как видно на рис. 5, выделенная пунктирной линией область, как и в результатах предыдущих изысканий, является наиболее опасной по степени активности проявления склоновых процессов.

#### Заключение

1. Инженерные изыскания рекомендуется разделять на стадии: предпроектная, проектная, рабочая и эксплуатационная. Это позволит опти-

мизировать состав и объемы изысканий в зависимости от требований, конкретизируемых на различных этапах исследований.

2. Результаты инженерных изысканий необходимо выполнять таким образом, чтобы они дополняли и подтверждали друг друга. При этом требуется обеспечение совместной работы различных специалистов на всех этапах изысканий.
3. Главными требованиями к инженерным изысканиям являются их достоверность и точность. Наиболее эффективным результатом служит районирование территории по различным признакам проявления склоновых процессов.
4. При проектировании, строительстве и эксплуатации сооружений на территориях с развитием склоновых процессов необходимо выполнять комплексный анализ результатов инженерных изысканий, что позволит предотвратить излишние материальные затраты и в то же время обеспечит безопасность существующих и строящихся сооружений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Deformation and failure of the Xiaochatou Landslide under rapid drawdown of the reservoir water level based on centrifuge tests / Fan Lei, Zhang Guanghai, Li Bo, Tang Huiming // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Official Journal of the International Association for Engineering Geology and the Environment. – 2017. – № 3. – P. 891–900.
2. Kaya Ayberk. Geotechnical assessment of a slope stability problem in the Citlakale residential area (Giresun, NE Turkey) // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Official Journal of the International Association for Engineering Geology and the Environment. – 2017. – № 3. – P. 875–889.
3. Tang Huiming, Yong Rui, Ez Eldin M.A.M. Stability analysis of stratified rock slopes with spatially variable strength parameters: the case of Qianjiangping landslide // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Official Journal of the International Association for Engineering Geology and the Environment. – 2017. – № 3. – P. 839–853.
4. Strokova L.A. Numerical model of surface subsidence during subway tunneling // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2009. – V. 46 (3). – P. 117–119.
5. Пургина Д.В., Строкова Л.А., Кузеванов К.И. Моделирование гидрогеологических условий для противоположных измерений на участке набережной реки Кама в городе Перми // Известия Томского Политехнического Университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 1. – С. 116–127.
6. Monitoring and engineering geology analysis of the Zhangmu landslide in Tibet, China / Ma Fengshan, Li Zhanlu, Wang Jie, Ding Kuo // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Official Journal of the International Association for Engineering Geology and the Environment. – 2017. – № 3. – P. 855–873.
7. Karst hazard assessment in the design of the main gas pipeline (South Yakutia) / L.A. Strokova, E.M. Dutova, A.V. Ermolaeva, I.N. Alimova, A.B. Strelnikova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27. – No. article 012032.
8. Real time monitoring instrument designed for the deformation and sliding period of colluvial landslides / Y.B. Fan, S.W. Yang, L.K. Xu, C. Feng, B.F. Liang // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Official Journal of the International Association for Engineering Geology and the Environment. – 2017. – № 3. – P. 829–838.
9. Безуглова Е.В., Мадий С.И., Подтелков В.В. Оползневой риск транспортных природно-технических систем. – Краснодар: КубГАУ, 2015. – 238 с.
10. Influence of uncertainty in the initial groundwater table on long-term stability of reservoir landslides / Kun Song, Lu Gongda, Zhang Guodong, Liu Yiliang // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Official Journal of the International Association for Engineering Geology and the Environment. – 2017. – № 3. – P. 901–908.
11. Конюшков В.В. Инженерная защита территорий от склоновых процессов с учетом природных условий и техногенных воздействий // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 2 (61). – С. 137–142.
12. Добров Э.М. Механика грунтов. – М.: ИЦ «Академия», 2013. – 266 с.
13. Современная активность оползней южного склона хребта Псехако в бассейне реки Мзымта / Е.С. Слышкина, А.В. Бершов, А.А. Баранов, И.Е. Сас, А.В. Гаврилов // Инженерные изыскания. – 2016. – № 13. – С. 68–78.
14. Ольховатенко В.Е. Основы инженерной геологии и механики грунтов. – Томск: Изд-во ТГАСУ, 2008. – 311 с.
15. Симонян В.В. Изучение оползневых процессов геодезическими методами. – М.: МГСУ, 2015. – 171 с.
16. Пендин В.В., Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. – М.: Ленанд, 2014. – 310 с.
17. Конюшков В.В., Веселов А.А., Белый А.А. Инженерное освоение и благоустройство территории на зольных грунтах для расширения контейнерного терминала морского порта в г. Санкт-Петербурге // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 3 (62). – С. 70–83.
18. Деревенец Ф.Н., Мадий С.И. Оценка предельного сопротивления свай при взаимодействии с оползневым грунтом // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2016. – № 4. – С. 14–18.
19. Mangushev R.A., Konyushkov, V.V., D'yakonov I.P. Analysis of Practical Application of Screw-in Cast Piles // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2014. – V. 51. – Iss. 5. – P. 11–16.
20. Справочник геотехника. Глава 11. Расчет устойчивости откосов и склонов / В.А. Ильичев, Р.А. Мангушев, А.М. Караулов,

- А.Н. Богомолов, К.В. Королев, С.И. Маций. – М.: АСВ, 2016. – С. 588–651.
21. Мангушев Р.А., Конюшков В.В., Сапин Д.А. Инженерно-геотехнические изыскания при строительстве и реконструкции в

условиях плотной городской застройки // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 5. – С. 47–54.

*Поступила 23.10.2017 г.*

#### **Информация об авторах**

**Конюшков В.В.**, кандидат технических наук, доцент кафедры геотехники Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета.

**Веселов А.А.**, доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета.

**Кондратьева Л.Н.**, доктор технических наук, профессор кафедры геотехники Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета.

UDC 624.139.68

## COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF ENGINEERING SURVEYS FOR DESIGN, CONSTRUCTION AND EXPLOITATION OF STRUCTURES IN THE AREAS WITH LANDSLIDE PROCESSES

Vladimir V. Konyushkov<sup>1</sup>,

v.konyushkov@mail.ru

Anatoliy A. Veselov<sup>1</sup>,

gbk@spbgasu.ru

Lidiya N. Kondratyeva<sup>1</sup>,

kondratjevaln@yandex.ru

<sup>1</sup> St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,  
5, Vtoraya Krasnoarmeyskaya street, St. Petersburg, 190005, Russia.

**The relevance.** Survey, design, construction and operation of various structures in regions with mountainous terrain are complex tasks. Areas with mountainous terrain are usually characterized by slope processes: landslides, taluses, erosions, etc. These processes can occur independently in natural conditions, and due to the impact of production activities of man. Specialists from different branches of production and industry are included in scientific studies of stability of slopes and escarpments: construction and operation of roads and railways, hydraulic engineering, quarrying deposits of minerals in mining industry, in development and improvement of new territories, etc. In the case of emergency from the effects of natural and anthropogenic factors, it is necessary to take timely compensatory measures to ensure slope stability. It is necessary to conduct quality and timely engineering surveys. Safe functioning of industries in difficult conditions of slopes should be accompanied by a comprehensive analysis of engineering survey results and a qualified design, construction and operation construction and existing buildings.

**The main aim** of the research is the comprehensive analysis of results of engineering survey of the territory with mountainous terrain to assess the activity of slope processes in the study area, the safe design, construction and operation of buildings.

**Object** of the researches is the area with complex terrain with signs of slope processes.

**Method** of the research is based on multivariate analysis, the results of engineering studies by identifying the main signs of the development of slope processes in the study area. According to the results of analysis the authors have performed zoning of the territory with indication of presence or absence of slope processes.

**Research results:** zoning of the site by the indices of slope processes by the results of various types of engineering surveys: geodetic, geological, hydrometeorological, environmental and geotechnical.

### Key words:

Engineering surveying, slope processes, landfalls, avalanches, landslides, erosion, natural and anthropogenic impacts, geotechnical monitoring.

### REFERENCES

- Fan Lei, Zhang Guangheng, Li Bo, Tang Huiming. Deformation and failure of the Xiaochatou Landslide under rapid drawdown of the reservoir water level based on centrifuge tests. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Official Journal of the International Association for Engineering Geology and the Environment*, 2017, no. 3, pp. 891–900.
- Kaya Ayberk. Geotechnical assessment of a slope stability problem in the Citlakkale residential area (Giresun, NE Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Official Journal of the International Association for Engineering Geology and the Environment*, 2017, no. 3, pp. 875–889.
- Tang Huiming, Yong Rui, Ez Eldin M.A.M. Stability analysis of stratified rock slopes with spatially variable strength parameters: the case of Qianjiangping landslide. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Official Journal of the International Association for Engineering Geology and the Environment*, 2017, no. 3, pp. 839–853.
- Stroková L.A. Numerical model of surface subsidence during subway tunneling. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2009, vol. 46 (3), pp. 117–119.
- Purgina D.V., Stroková L.A., Kuzevanov K.I. Modeling hydrogeological conditions for antilandslide measures justification on the plot of the Kama river embankment in Perm. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 1, pp. 116–127. In Rus.
- Ma Fengshan, Li Zhanlu, Wang Jie, Ding Kuo. Monitoring and engineering geology analysis of the Zhangmu landslide in Tibet, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Official Journal of the International Association for Engineering Geology and the Environment*, 2017, no. 3, pp. 855–873.
- Stroková L.A., Dutova E.M., Ermolaeva A.V., Alimova I.N., Strelnikova A.B. Karst hazard assessment in the design of the main gas pipeline (South Yakutia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27, article no. 012032.
- Fan Y.B., Yang S.W., Xu L.K., Feng C., Liang B.F. Real time monitoring instrument designed for the deformation and sliding period of colluvial landslides. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Official Journal of the International Association for Engineering Geology and the Environment*, 2017, no. 3, pp. 829–838.
- Bezuglova E.V., Matsiy S.I., Podtelkov V.V. *Opolznevy risk transportnykh prirodno-tekhnicheskikh sistem* [Landslide risk of transport natural-technical systems]. Krasnodar, Kuban state agricultural University Press, 2015. 238 p.
- Song Kun, Lu Gongda, Zhang Guodong, Liu Yiliang. Influence of uncertainty in the initial groundwater table on long-term stability of reservoir landslides. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Official Journal of the International Association for Engineering Geology and the Environment*, 2017, no. 3, pp. 901–908.
- Konyushkov V.V. Engineering protection of lands from erosion processes, taking into account natural conditions and anthropo-

- genic influences. *Bulletin of civil engineers*, 2017, no. 2 (61), pp. 137–142. In Rus.
12. Dobrov E.M. *Mekhanika gruntov* [Soil Mechanics]. Moscow, Akademiya Publ. center, 2013. 266 p.
  13. Slyshkina E.S., Bershov A.V., Baranov A.A., Sas I.E., Gavrilov A.V. Contemporary activity of landslides on the southern slopes of Psekhako ridge in the basin of Mzymta river. *Engineering surveying*, 2016, no. 13, pp. 68–78. In Rus.
  14. Olkhovenko V.E. *Osnovy inzhenernoy geologii i mekhaniki gruntov* [Fundamentals of engineering Geology and soil mechanics]. Tomsk, TGASU Publ., 2008. 311 p.
  15. Simonyan V.V. *Izucheniye opolznevykh protsessov geodezicheskimi metodami* [Study of landslide processes by geophysical methods]. Moscow, MGSU Publ., 2015. 171 p.
  16. Pendine V.V., Fomenko I.K. *Metodologiya otsenki i prognoza opolznevoy opasnosti* [Methodology for assessment and prediction of landslide hazard]. Moscow, Lenand Publ., 2014. 310 p.
  17. Konyushkov V.V., Veselov A.A., Bely A.A. Engineering development and landscaping on the ash soils for the expansion of the container terminal of sea port of St. Petersburg. *Bulletin of civil engineers*, 2017, no. 3 (62), pp. 70–83. In Rus.
  18. Derevenets F.N., Matsiy S.I. Estimation of the ultimate resistance of piles in interaction with landslide ground. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2016, no. 4, pp. 14–18. In Rus.
  19. Mangushev R.A., Konyushkov, V.V., D'yakonov I.P. Analysis of Practical Application of Screw-in Cast Piles. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2014, vol. 51, no. 5, pp. 11–16.
  20. Ilichev V.A. Mangushev R.A., Karaulov A.M., Bogomolov A.N., Korolev K.V., Matsiy S.I. *Spravochnik geotekhnika. Glava 11. Raschet ustoychivosti otkosov i sklonov* [Handbook of geotechnical engineering. Chapter 11. Calculation of stability of slopes]. Moscow, ASV Publ., 2016. pp. 588–651.
  21. Mangushev R.A., Konyushkov V.V., Sapin D.A. Engineering and geotechnical investigations for construction and reconstruction in dense urban. *Industrial and civil construction*, 2016, no. 5, pp. 47–54. In Rus.

Received: 23 October 2017.

#### Information about the authors

**Vladimir V. Konyushkov**, Cand. Sc., associate professor, St.Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering.

**Anatoliy A. Veselov**, Dr. Sc., professor, St.Petersburg state University of Architecture and Civil Engineering.

**Lidiya N. Kondratyeva**, Dr. Sc., professor, St.Petersburg state University of Architecture and Civil Engineering.

УДК 62–831.1:621.313.333.2:621.333

## ОЦЕНОЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОНИЖЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ ПИТАНИЯ ДЛЯ РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

**Арсентьев Олег Васильевич<sup>1</sup>,**  
arsentyevov@mail.ru

**Баранов Павел Рудольфович<sup>2</sup>,**  
baranovp@tpu.ru

**Вильнин Александр Данилович<sup>2</sup>,**  
vilninad@tpu.ru

**Кладиев Сергей Николаевич<sup>2</sup>,**  
kladiev@tpu.ru

<sup>1</sup> Иркутский Национальный исследовательский технический университет,  
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность исследования** обусловлена необходимостью решения проблем обеспечения энергоэффективных режимов работы тяговых электроприводов подземного электровоза, используемого для транспортировки руды черных и цветных металлов в рудниках от места добычи к месту складирования для дальнейшей транспортировки на поверхность. Одной из главных задач подземного рельсового транспорта является достижение предельных тяговых характеристик частотно-регулируемых асинхронных двигателей в условиях ограничения величины питающего напряжения контактной сети постоянного тока подземного транспорта по соображениям электробезопасности.

**Цель работы:** исследование возможности использования асинхронных двигателей с пониженным напряжением питания для тягового электропривода подземного рудничного электровоза; определение условий соответствия механических характеристик тягового асинхронного двигателя с пониженным напряжением питания относительно характеристик при стандартном напряжении.

**Объект исследований:** тяговый асинхронный электродвигатель с пониженным напряжением питания, повышенными тяговыми усилиями и малой чувствительностью к вибрационным и ударным воздействиям.

**Методы исследования.** Исследования проводились путем анализа аналитических зависимостей характеристик асинхронного двигателя и результатов имитационного моделирования в программной среде Simulink MatLab. Сравнение проведено по статическим и динамическим характеристикам, энергетическим показателям и конструктивным особенностям рассматриваемых электродвигателей.

**Результаты.** В качестве прототипа тягового асинхронного двигателя выбран специальный крановый асинхронный двигатель производства ОАО «Сибэлектромотор», рассчитанный для частотного регулирования скоростью. Приведена методика расчета параметров схемы замещения тягового асинхронного двигателя по паспортным данным при пониженном напряжении питания статора и разработана его имитационная модель. Основные механические и электромеханические свойства и характеристики тягового асинхронного двигателя с переключением схемы соединения фазных обмоток статора со «звезды» на «треугольник», пересчитанные на пониженное напряжение питания, соответствуют характеристикам тягового асинхронного двигателя со стандартным напряжением питания. Для обеспечения вибро- и ударопрочности обосновано изменение конструкции тягового асинхронного двигателя с заменой литого чугуна корпуса на сварной из стали с дополнительными опорами для крепления к раме электровоза.

### **Ключевые слова:**

Тяговый асинхронный двигатель, рудничный электровоз, параметры схемы замещения, механические характеристики, пониженное напряжение питания.

### **Введение**

Подземный рельсовый транспорт широко используется при добыче полезных ископаемых в подземных выработках, прежде всего при добыче руды черных и цветных металлов. Его применение позволяет эффективно перевозить руду на значительные расстояния [1, 2]. В то же время развитие и совершенствование данного транспорта сдерживается в связи с применением в рудничных электровозах тяговых двигателей постоянного тока последовательного возбуждения с морально устаревшей реостатно-контактной системой управле-

ния. Недостатки такой системы электропривода общеизвестны [2]. Причем основные их них, такие как: низкая надежность, ограниченный срок службы, отсутствие защиты от буксования и юза при использовании устаревшей системы релейно-контактного управления, устранить проблематично.

Цель данной статьи научно обосновать и сформулировать основные современные требования к тяговым асинхронным двигателям (ТАД; ITM – induction traction motor) рудничных электровозов, провести выбор перспективных электродвигателей

переменного тока, предназначенных для работы с частотными преобразователями с современной микропроцессорной системой управления. Для этого необходимо: исследовать возможности использования асинхронных двигателей с пониженным напряжением питания для тягового электропривода подземного рудничного электровоза; определить условия соответствия механических характеристик ТАД с пониженным напряжением питания относительно характеристик такого двигателя на стандартное напряжение.

В общем случае ТАД предназначены для приведения в движение электрических транспортных средств. Основное отличие ТАД от общепромышленных асинхронных электродвигателей заключается в условиях их эксплуатации, монтажа, в жестких ограничениях массы и габаритов, в повышенных механических воздействиях на элементы конструкции [1]. Эксплуатация ТАД для рельсового транспорта происходит в тяжелых условиях. Корпуса таких машин постоянно подвержены воздействию вибрационных и ударных нагрузок; активные части машин, особенно обмотки статора и ротора, также находятся под действием тепловых электрических перегрузок. Поэтому при проектировании конструкции ТАД крайне важно обеспечить достаточно высокую прочность узлов и отдельных деталей, более высокий класс изоляции и влагостойкость токоведущих частей и обмоток, монолитность обмоток.

Рабочие режимы ТАД отличаются значительной разнообразностью. Основные режимы работы кроме длительных режимов с переменной нагрузкой, – это перемежающиеся, кратковременные, повторно кратковременные с частыми пусками. В процессе работы зачастую требуется изменять скорость движения в широких пределах. При трогании груженого состава с места требуемый пусковой момент превышает номинальное значение в два и более раза. Из-за тяжелых условий работы и габаритных ограничений тяговые электродвигатели можно отнести к электрическим машинам предельной эксплуатации [1].

Развитие полупроводниковой техники и компьютерной технологии открывает новые возможности электрических машин: переход от двигателей с электромеханической коммутацией (двигатели постоянного тока) к двигателям переменного тока с коммутацией при помощи полупроводниковых преобразователей [3]. Наиболее перспективным типом двигателя переменного тока является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, который обладает важными преимуществами – простотой конструкции, надежностью, компактностью и относительно невысокой стоимостью [1].

#### Постановка задачи

При сохранении конструктивной схемы рудничного электровоза (рис. 1) необходимо разработать двухдвигательный асинхронный электропривод на базе конструкции известных и серийно производимых электродвигателей. Такой подход позволит осуществить типизацию технологического процесса, значительно снизить затраты на опытно-конструкторские работы, на изготовление и испытание опытных образцов и капитальные затраты на оборудование (штампы, оснастка, материалы и т. п.) при освоении серийного производства ТАД. Необходимо также разработать и систему управления ТАД, позволяющую повысить уровень основных эксплуатационных характеристик рудничного электровоза, таких как безопасность, надежность, энергоэффективность и функциональность [2, 4–7].

В данной работе не учитывалось возможное падение напряжения постоянного тока в длинных троллейных линиях до 30 % от номинала.

Для выбора базовой серии асинхронных двигателей разработаны критерии оценки, которые также учитывают требования ГОСТ [8, 9]:

- унификация конструкции рудничного электровоза;
- стойкость к внешним механическим воздействиям: вибрации, одиночным ударам;
- жесткость механической характеристики электродвигателя;

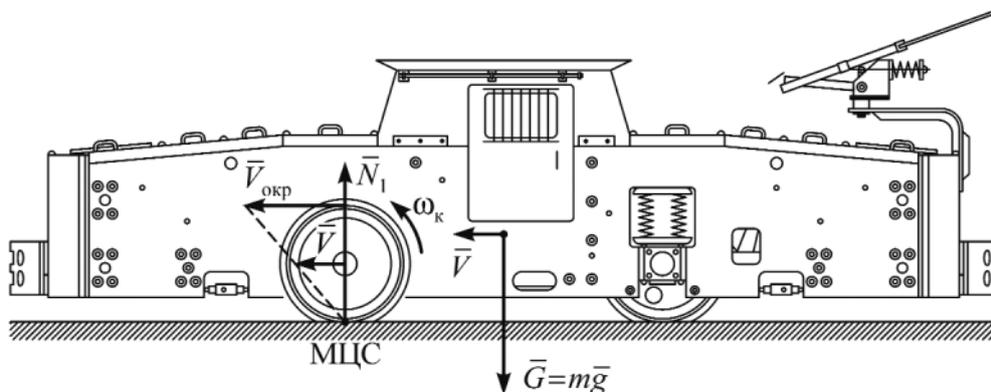


Рис. 1. Рудничный электровоз К14

Fig. 1. Mine electric locomotive K14

- высокая перегрузочная способность;
- высокая кратность пускового момента по отношению к номинальному моменту;
- высокая теплостойкость к длительным перегрузкам;
- компактность и относительно невысокая масса;
- минимальная стоимость в процессе разработки и серийном производстве.

#### Анализ свойств электродвигателей для подземной тяги

При выборе перспективной конструкции проведен анализ технических, массогабаритных и эксплуатационных показателей тягового двигателя прототипа. В качестве такого прототипа выбран тяговый двигатель постоянного тока (ДПТ) ДК-812 с последовательным возбуждением, который устанавливается на 14-тонные рудничные контактные электровазны типа К14, К14М, 14КР [10, 11].

Двигатель ДК-812 имеет два номинальных режима работы: S2 (часовой) и S1 (продолжительный). Основные номинальные показатели представлены в табл. 1 [12].

Эксплуатационные характеристики тягового ДПТ ДК-812 представлены ниже:

- двигатель выдерживает пуски током 270 А при номинальном напряжении и перегрузку двойным часовым током в течение 1 мин;
- класс вибрации – 4,5 по ГОСТ 16921–83;
- степень защиты – IP54 по ГОСТ 14254–80 с учетом встраивания в электроваз;
- способ охлаждения – 1С01 (самовентиляция) по ГОСТ 20459–87, при этом исключается прямое попадание воды в двигатель вместе с вентилируемым воздухом.
- гарантийный срок эксплуатации – 2 года со дня ввода;
- способ монтажа – М9403 по ГОСТ 2479–87;
- группа условий эксплуатации М27 по ГОСТ 17516.1–90.

Стальной корпус и монтаж с опорно-осевой подвеской, возможность крепления фланцем к корпусу редуктора обеспечивают жесткость конструкции тягового двигателя постоянного тока в составе электровазона и, несомненно, удовлетворяют требованиям экстремально высоких внешних механических воздействий. На этом фоне коллекторно-щеточный узел двигателя является наиболее уязвимой частью конструкции. При высоком уровне вибрации и одиночных ударов его работа будет характеризоваться повышенным износом щеток, высоким уровнем искрения, частыми профилактическими работами при обслуживании коллектора. Поэтому в настоящее время данный тип тяговых двигателей не является конкурентоспособным по надежности, по уровню безаварийности, по затратам при эксплуатации. Не отвечает современным требованиям и контактно-реостатная система управления.

При выборе перспективных двигателей отметим, что асинхронные двигатели общепромышлен-

ной серии в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам относятся к группе условий эксплуатации М1 ГОСТ 17516.1–90 и не выдержат величину однократных ударов и периодических механических воздействий при движении по рельсам, как регламентирует стандарт для группы эксплуатации М27 [13, 14].

Таблица 1. Характеристики ДПТ ДК-812

Table 1. Characteristics of DC motor DK-812

Режим работы Operational mode	S2 (часовой/hour)	S1 (длительный/long)
Напряжение, В Voltage, V	=250	
Мощность, кВт Power, kW	45	35
Частота вращения номинальная в режиме, (мин <sup>-1</sup> ): Rotation per minute in nominal mode, (rpm):	1300	1480
Максимальная Maximum	4000	
Момент вращения, Н·м Torque, N·m	333	225
Ток якоря, А Armature current, A	=210	=162
КПД, % Efficiency, %	86	87,5
Тип возбуждения Excitation type	Последовательное Serial	
Масса, кг Weight, kg	460	

Наиболее близкими по условиям эксплуатации к тяговым двигателям являются серийные крановые асинхронные двигатели [15–17]. Они также предназначены для движения по рельсам, имеют стойкость к однократным ударам и более прочный корпус по сравнению с общепромышленными двигателями. Следует отметить, что в зависимости от фирмы производителя конструкции двигателей существенно разнятся.

Крановые электродвигатели [17] отличаются от других серийных аналогов наличием коробки выводов, которая прикреплена винтами к станине по аналогии с общепромышленными двигателями. Такая конструкция явно не выдержит механических воздействий при относительно высокой скорости движения электровазона по рельсам. Класс изоляции обмотки статора – F (155 °С).

Двигатели производителей [15, 16] обладают более предпочтительной конструкцией: корпус коробки выводов отлит заодно с прочной чугунной станиной, изоляция обмотки статора обладает классом нагревостойкости H (180 °С). Обращают на себя внимание двигатели производителя [16]. Во-первых, в каталоге фирмы имеются двигатели близкой мощности с прототипом (ДК-812), мощностью 55 кВт, шести полюсные; во-вторых, на данном предприятии производят серию специальных крановых двигателей, которые предназначены для

работы только в составе частотно-регулируемого электропривода. Эта модификация в своем обозначении имеет шифр «2П». Обозначение двигателя – 4МТКМ2П225L6У1. Данный двигатель может выпускаться с самовентиляцией – IC411 по ГОСТ Р МЭК60034–6-2012; с независимой вентиляцией (с центробежным или осевым электровентилятором); со встроенными датчиками температурной защиты (терморезисторами или термоограничителями); с пристроенным датчиком скорости. Тип охлаждения и датчика скорости указывается при заказе [16]. Степень защиты двигателя от внешнего воздействия – IP54, кожуха вентилятора – IP20, двигателя независимой вентиляции – не ниже IP44 по ГОСТ ИЕС 60034–5-2011.

У всех двигателей подшипник со стороны, противоположной приводу, зафиксирован от осевых смещений: по наружному кольцу – с помощью крышек подшипниковых и подшипникового щита; по внутреннему кольцу – с помощью пружинного упорного кольца на валу.

Основные номинальные показатели кранового двигателя 4МТКМ2П225L6 представлены в табл. 2 [16]. Масса двигателя приведена для монтажного исполнения IM2003: фланцевый крепеж с наличием лап и коническим рабочим концом вала. Обращает на себя внимание высокая величина крутящего момента кранового двигателя, его величина превосходит прототип более чем в 1,6 раза. Поэтому при векторном регулировании частоты вращения вверх от номинальной частоты величина крутящего момента при 1500 об/мин будет выше, чем у прототипа. Высокая и перегрузочная способность электрической машины, то есть по пусковым свойствам (скорости и времени разгона) крановый двигатель будет превосходить двигатель постоянного тока ДК-812.

Недостатком выбранного кранового двигателя является монтажное исполнение IM2003, которое не позволит обеспечить надежную эксплуатацию в части стойкости к механическим внешним воздействиям факторам для группы эксплуатации M27 по ГОСТ 17516.1–90.

Для решения данной проблемы можно воспользоваться опытом специалистов фирмы «СЭТК» [18]. Эта фирма выпускает крановые двигатели повышенной надежности при вибрационных нагрузках и ударах для вибростендов монтажного исполнения IM2003. Станина и подшипниковые щиты, и лапы в этих двигателях выполнены сварными из стальных листов. Цилиндрическая форма станины выполняется с помощью валков либо изготавливается из толстостенных труб определенного диаметра. Высокая надежность двигателей исполнения «ПНД» подтверждена многолетней эксплуатацией.

Для тягового двигателя электровозов на базе крановой серии целесообразно также изготавливать стальную станину. Способ монтажа на электровоз также необходимо унифицировать с прототипом. Кроме того, с опорно-осевой подвеской IM9403 без лап двигатель будет легче, а конструк-

ция – более жесткая. Технологически это не вызовет больших трудностей.

**Таблица 2.** Характеристики кранового асинхронного двигателя 4МТКМ2П225L6

**Table 2.** Characteristics of the crane induction motor MTKM2P225L6

Режим работы Operational mode	S2 (часовой/hour)	S1 (длительный/long)
Напряжение, В Voltage, V	~380	
Мощность, кВт Operational mode	55	33
Частота вращения номинальная в режиме, (мин <sup>-1</sup> ): Rotation per minute in nominal mode, (rpm):	985	990
Максимальная Maximum	3800	
Момент вращения, Н·м Torque, N·m	533	318
Ток фазы статора, А Stator phase current, A	~114	~83,4
КПД, % Efficiency, %	90	88,5
cosφ	0,81	0,67
Перегрузочная способность M <sub>max</sub> /M <sub>n</sub> Overload capacity T <sub>max</sub> /T <sub>nom</sub>	3,4	
Масса, кг Weight, kg	464*	

\*Указана масса при наличии лап (IM2003).

\*Specified mass in the presence of paws (IM2003).

### Теоретическое обоснование обеспечения предельно достижимого момента ТАД

Рассмотрим выражения для определения момента ТАД с питанием обмотки статора на пониженное напряжение. Для определения момента двигателя можно использовать выражение (1), известное из [19]:

$$M = 3 \frac{p U_n^2}{\omega_{0 \text{ эл.н}}} \times \frac{\bar{\omega}_p x_m^2 R_2}{(R_1 R_2 - \sigma \bar{\omega}_0 \bar{\omega}_p x_1 x_2)^2 + (R_2 \bar{\omega}_0 x_1 + R_1 \bar{\omega}_p x_2)^2}, \quad (1)$$

где  $R_1, R_2, x_m, x_1, x_2$  – параметры схемы замещения асинхронного двигателя;  $U_n$  – номинальное фазное напряжение;  $\bar{\omega}_0, \bar{\omega}_p$  – относительное значение номинальной частоты переменного тока на обмотке статора и текущее значение частоты ЭДС ротора.

При переходе на другое, то есть пониженное, напряжение питания статорной обмотки двигателя необходимо пересчитать параметры его схемы замещения, умножив их на коэффициент пересчета  $k = U^2 / U_n^2$ .

Покажем, что количественное значение момента при переходе на другое напряжение не изменит-

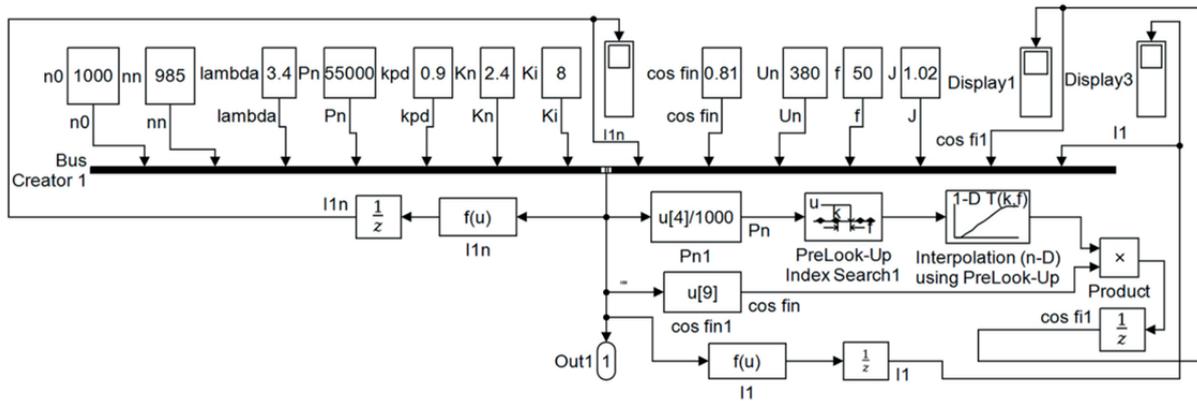


Рис. 2. Имитационная модель расчёта параметров схемы замещения асинхронного двигателя (блок ввода параметров двигателя)

Fig. 2. Simulation model for calculating the parameters of the induction motor equivalent circuit (motor parameters' input block)

ся. Для этого в выражение (1) введём пересчитанный коэффициент  $k$ :

$$M = 3 \frac{pkU_{\text{н}}^2}{\omega_{0\text{эл.н}}} \times \frac{\bar{\omega}_p k^2 x_m^2 k R_2}{(kR_1 R_2 - \sigma \bar{\omega}_0 \bar{\omega}_p k x_1 k x_2)^2 + (kR_2 \bar{\omega}_0 k x_1 + kR_1 \bar{\omega}_p k x_2)^2}.$$

Выносим  $k$  в числителе и знаменателе за скобки:

$$M = 3 \frac{pU_{\text{н}}^2}{\omega_{0\text{эл.н}}} \times \frac{k^4 (\bar{\omega}_p x_m^2 R_2)}{k^4 [(R_1 R_2 - \sigma \bar{\omega}_0 \bar{\omega}_p x_1 x_2)^2 + (R_2 \bar{\omega}_0 x_1 + R_1 \bar{\omega}_p x_2)^2]}.$$
 (2)

Полученное выражение (2) характеризует количественную неизменность механической характеристики асинхронного двигателя при работе на другом напряжении обмотки статора.

Подходы к определению параметров схемы замещения асинхронного двигателя указаны в работах [20, 21].

Таблица 3. Параметры схемы замещения двигателя 4МТКМ1Ф2П225Л6 55 кВт

Table 3. Equivalent circuit parameters of the motor МТКМ2Р225Л6 55 kW

Наименование параметра Parameter name	Значение Value
Сопротивление обмотки статора $R_s$ , Ом Resistance of stator winding $R_s$ , Ohm	0,05759
Сопротивление обмотки ротора $R_r$ , Ом Resistance of rotor winding $R_r$ , Ohm	0,03559
Индуктивность рассеяния статора $L_s$ , Гн Stator leakage inductance $L_s$ , H	0,0004188
Индуктивность рассеяния ротора $L_r$ , Гн Rotor leakage inductance $L_r$ , H	0,0005719
Индуктивность контура намагничивания $L_m$ , Гн Inductance of magnetization loop $L_m$ , H	0,01045

Для определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя в *Simulink MatLab 2017a*

разработана имитационная модель по методике, опубликованной в [22].

На рис. 2 представлена схема ввода паспортных параметров асинхронного двигателя.

Результаты расчёта параметров схемы замещения сведены в табл. 3.

#### Разработка имитационной модели ТАД

Существуют различные подходы к построению имитационных моделей рельсовых транспортных средств [23, 24].

Для оценки статических и динамических свойств двигателя предлагается использовать имитационную модель, схема которой показана на рис. 3.

В последней версии *MatLab 2017a* модель асинхронного двигателя допускает включение обмотки статора, как в звезду, так и в треугольник. Этот фактор расширяет возможности исследований, что и использовано в настоящей статье. Вид включения обмотки статора определяет переключатель Two-Way Switch. При подаче на его вход управления сигнала амплитудой 1В обеспечивается соединение звездой, при нулевом сигнале управления – треугольником. Источник питающего трёхфазного напряжения *Voltage Source* обеспечивает установку любого значения частоты и напряжения. Для измерения действующего значения линейного трёхфазного напряжения используется датчик *Line Voltage Sensor*. Последовательно включенные элементы формируют действующее значение установленного напряжения. Измерение фазного тока осуществляет датчик *Current Sensor* при единичном значении коэффициента усиления блока *Gain1*. Формирование действующего значения обеспечивается последовательным включением указанных в схеме элементов с выходом датчика. Измерение тока статорной обмотки, включенной в треугольник, производится при коэффициенте усиления блока *Gain1*, равном 1/1,73. Измерение частоты вращения и момента двигателя производится блоком *Encoder*. По линии *trqMotor* передается значение измеряемого момента, по линии

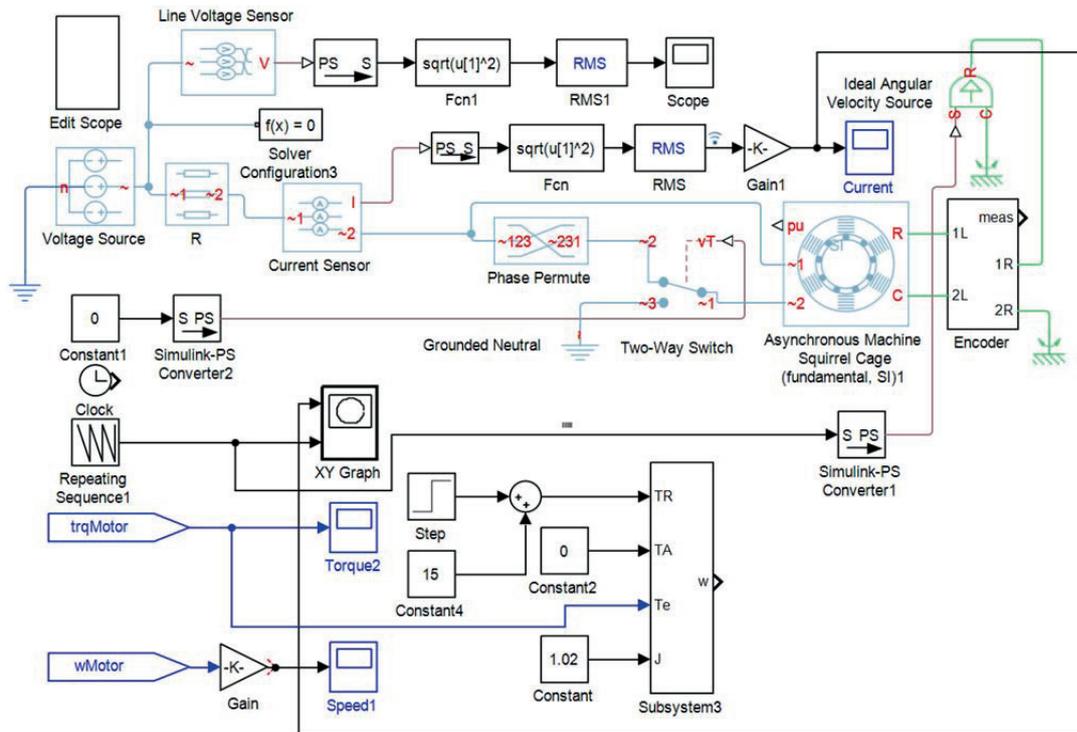


Рис. 3. Имитационная модель для анализа статических и динамических характеристик асинхронного двигателя

Fig. 3. Simulation model for analysis of static and dynamic characteristics of induction motor

$wMotor$  – частота вращения в угловых единицах. Пересчет частоты вращения в об/мин ведётся блоком  $Gain$ .

Формирование статических характеристик производит графопостроитель  $XY Graph$ . На источнике питания устанавливаются параметры частоты и напряжения, при которых рассчитываются характеристики. На входе  $Y$  графопостроителя блок  $Repeating Sequence1$  формирует линейно спадающий сигнал частоты вращения, который подается также на двигатель. Двигатель работает в режиме генератора, и его электромагнитная система обеспечивает формирование момента и тока, подключаемых к входу  $X$  графопостроителя.

Следует отметить, что моделирование статических механических характеристик ТАД идет не на основании теоретической зависимости (1), а на основании системы уравнений математического описания электромагнитных процессов асинхронного двигателя. Достоверность и точность полученных результатов зависит, прежде всего, от качества используемой модели ТАД в  $Simulink MatLab$ .

Интенсивность снижения угловой частоты вращения выбирается незначительной, чтобы исключить влияние динамических процессов. Выбирается максимальная частота вращения, с которой начинается построение статических характеристик, и время спада до нулевого значения. Например, частота вращения 120 % от частоты вращения идеального холостого хода и время 10 с, которые заносятся в блок  $Repeating Sequence1$ . Верхняя часть полученной статической характеристи-

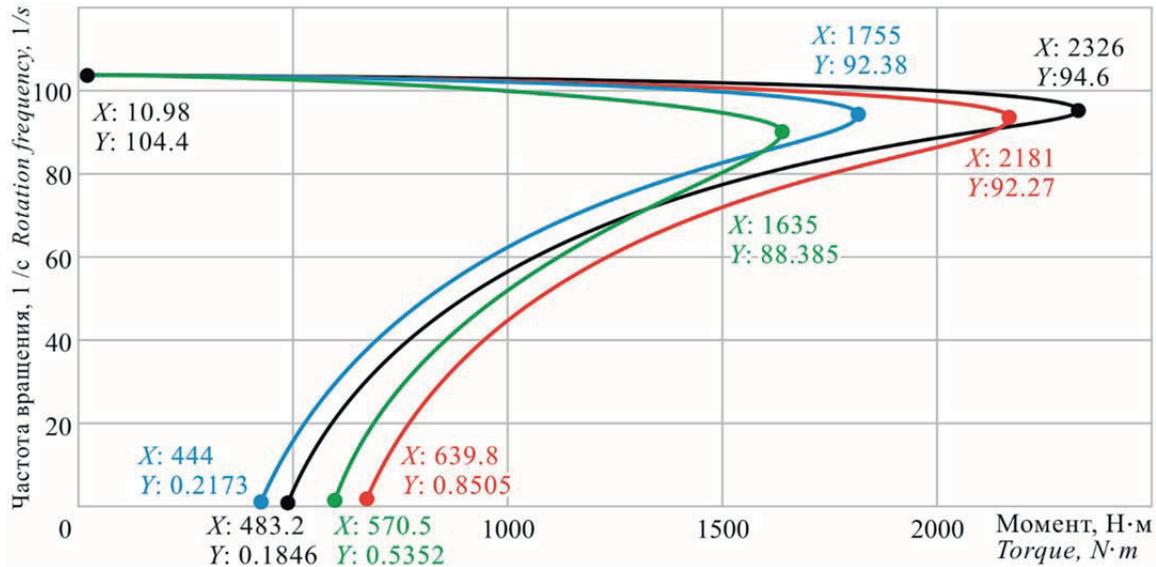
ки удаляется при редактировании, а в нижней части колебания момента или действующего тока отсутствуют.

#### Исследования свойств ТАД на имитационной модели

Исследованию свойств тягового электропривода и его систем управления посвящены работы [25–28].

Наше исследование ограничено анализом предельных статических и динамических свойств перспективного ТАД. На рис. 4 представлены результаты расчета механических характеристик черного и красного цвета по параметрам схемы замещения, полученным от завода изготовителя крановых частотно-регулируемых двигателей (ОАО Сибэлектромотор), и синего и зеленого цвета по параметрам схемы замещения, полученным в результате использования программы «Расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя по паспортным данным».

В свою очередь, механические характеристики ТАД 4МТКМ1Ф2П225L6 с часовой мощностью 55 кВт, показанные на рис. 4 в черном и синем цвете, рассчитаны для температуры обмоток статора и ротора 20 °С, что соответствует температуре окружающей среды. А механические характеристики ТАД в красном и зеленом цвете соответствуют нагретому состоянию двигателя при рабочей температуре обмоток 115 °С, что соответствует предельной температуре нагрева обмоток для данного класса изоляции. Расчет характеристик произведен при включении обмоток статора в треугольник на переменное линейное трехфазное напряжение 220 В.



**Рис. 4.** Механические характеристики ТАД 4МТКМ1Ф2П225Л6: схема обмотки статора – «Δ» на напряжение 220 В: – и – с параметрами схемы замещения по обмоточным данным; – и – с параметрами схемы замещения по расчетным данным; – и – для температуры обмоток 20 °С; – и – для температуры обмоток 115 °С

**Fig. 4.** Mechanical characteristics of ITM 4MTKM1F2P225L6: triangle-scheme at voltage 220 V: – and – with parameters of the equivalent circuit for winding data; – and – with parameters of the equivalent circuit based on calculated data; – and – for winding temperature 20 °С; – and – for winding temperature 115 °С

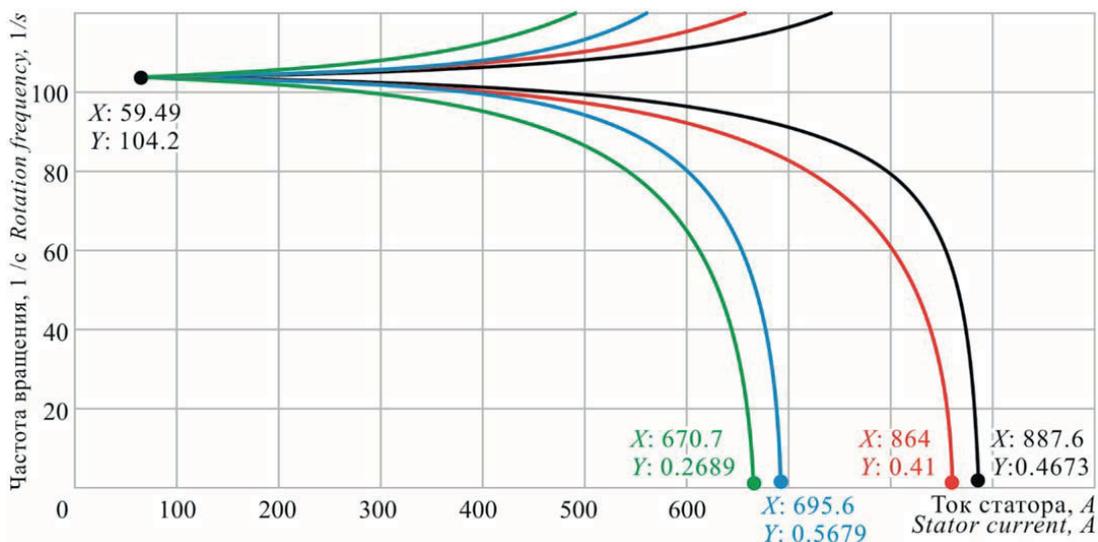
На рис. 5 представлены электромеханические характеристики этого ТАД. По цвету характеристики полностью соответствует условиям моделирования механических характеристик, приведенных на рис. 4.

На рис. 6, а, представлены пусковые статические механические характеристики ТАД модели 4МТКМ1Ф2П225Л6 на 220 В и схемой обмоток статора «Δ» с учетом насыщения магнитной цепи машины и вытеснения тока в обмотке ротора. Характеристика синего цвета приведена для температуры обмоток 20 °С, а зеленого цвета – для нагретого двигателя 115 °С.

На рис. 6, б, представлены пусковые статические электромеханические характеристики этого же двигателя с учетом насыщения магнитной цепи машины и вытеснения тока в обмотке ротора. Характеристика черного цвета представлена для температуры обмоток 20 °С, а красного цвета – 115 °С.

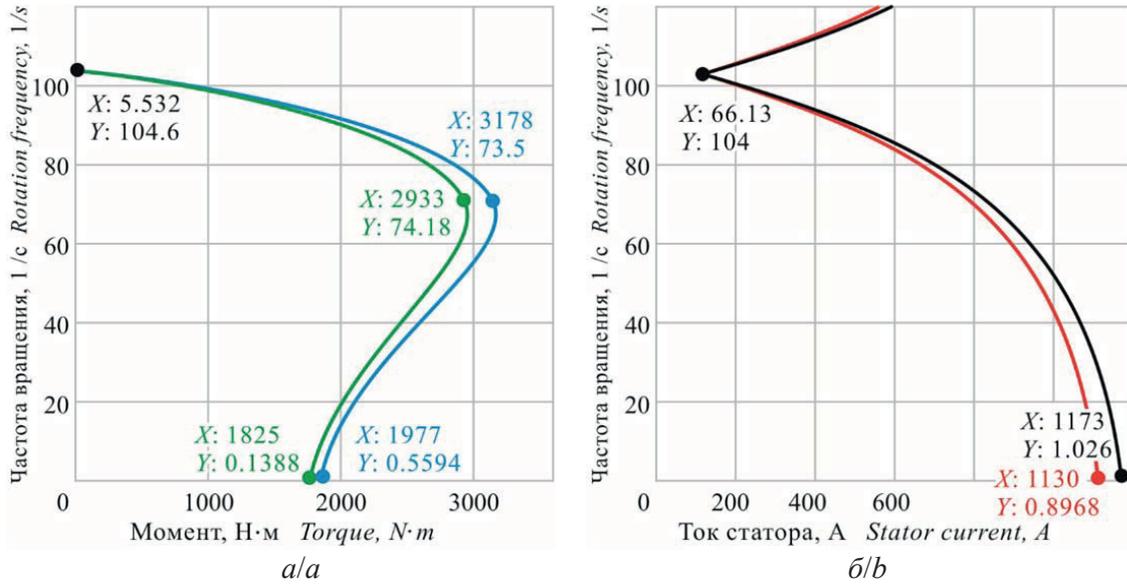
На рис. 7, а, б, изображены статические механические и электромеханические характеристики ТАД 4МТКМ1Ф2П225Л6 с часовой мощностью 55 кВт на пониженное напряжение питания 178 В.

Динамические характеристики асинхронного двигателя снимаются при прямом включении на



**Рис. 5.** Электромеханические характеристики ТАД 4МТКМ1Ф2П225Л6: схема обмотки статора – «Δ» на напряжение 220В

**Fig. 5.** Electromechanical characteristics of the ITM 4MTKM1F2P225L6: triangle-scheme at voltage 220 V

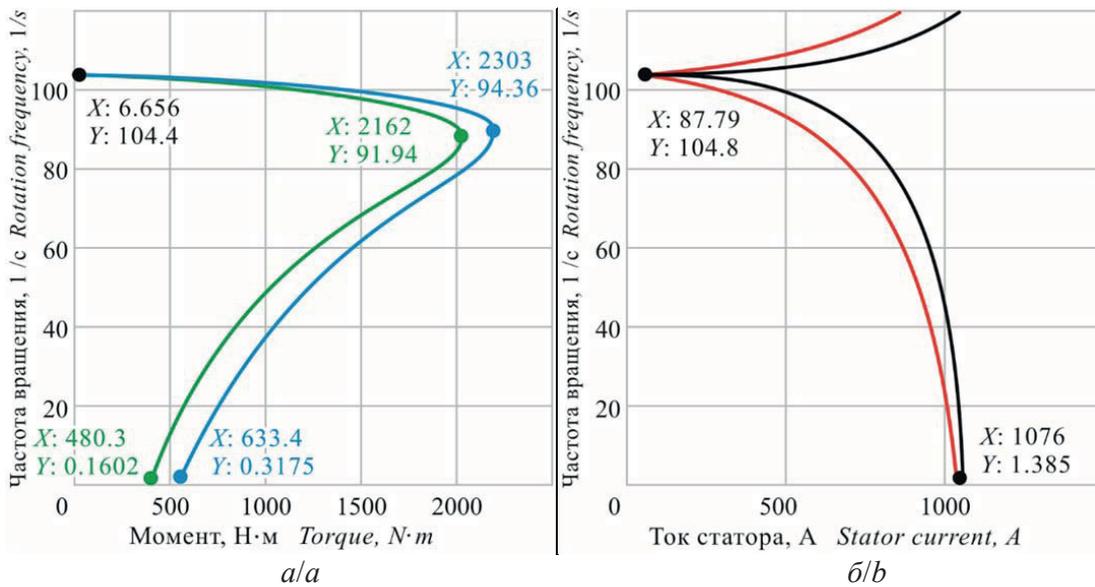


**Рис. 6.** Статические пусковые характеристики ТАД 4МТКМ1Ф2П225Л6 на 220 В с учетом насыщения магнитной цепи машины и вытеснения тока в обмотке ротора: а) механические; б) электромеханические

**Fig. 6.** Static inrush characteristics of the ITM 4MTKM1F2P225L6 at 220 V taking into account the magnetic circuit saturation in the machine and current displacement in the rotor winding: а) mechanical; б) electromechanical

номинальное напряжение. Для этого выполняется следующее изменение схемы модели (рис. 2): выход блока *Subsystem3 W* соединяется с входом блока *Simulink-PS Converter1*; выход блока *Clock* подключается к входу X графопостроителя *XY Graph*; на вход Y графопостроителя подаются исследуемые сигналы (частота вращения, момент или ток двигателя). Графопостроитель работает в режиме осциллографа.

На рис. 8, 9 представлены результаты имитационного моделирования прямого пуска двигателя с заводскими параметрами схемы замещения, схемой обмотки статора «Δ» на стандартное напряжение статора 220 В и пониженное напряжение 178 В. Черным цветом выделена зависимость от времени угловой скорости вала двигателя ( $n$ , об/мин); зеленым цветом – вращающего момента на валу ( $M$ , Н·м); и красным цветом – модуля результирующего вектора тока статора.



**Рис. 7.** Статические характеристики ТАД 4МТКМ1Ф2П225Л6 с часовой мощностью 55 кВт на пониженное напряжение питания 178 В при температуре обмотки 115 °С: а) механические; б) электромеханические

**Fig. 7.** Static characteristics of the ITM 4MTKM1F2P225L6 with 55 kW hourly power at low supply voltage 178 V: а) mechanical; б) electromechanical

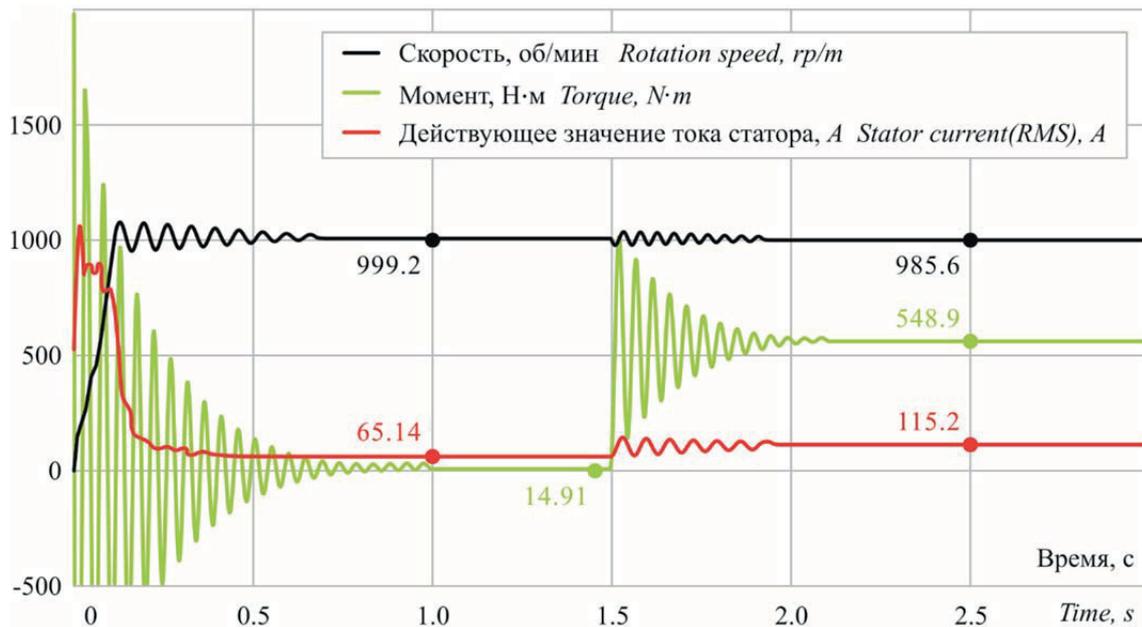


Рис. 8. Динамические характеристики прямого пуска ТАД с заводскими параметрами на стандартное напряжение 220 В и схемой соединения обмоток статора «Δ»

Fig. 8. Dynamic characteristics of direct ITM starting with the factory settings at standard voltage of 220 V and the triangle connection scheme of the stator windings' terminals

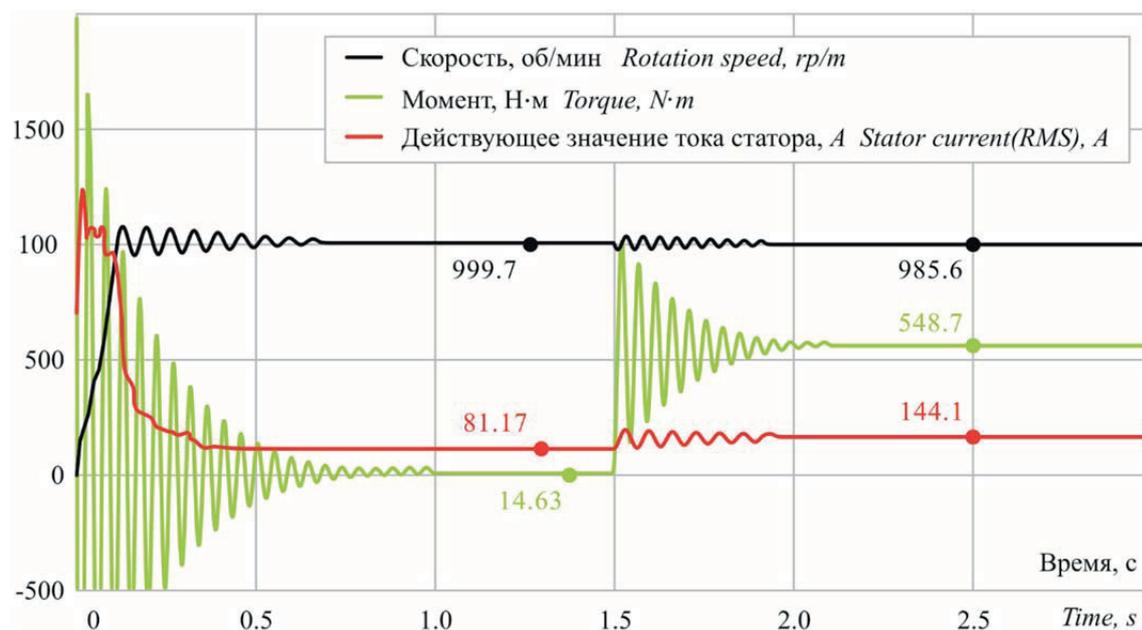


Рис. 9. Динамические характеристики прямого пуска ТАД с заводскими параметрами на пониженное напряжение 178 В и схемой соединения обмоток статора «Δ»

Fig. 9. Dynamic characteristics of direct ITM starting with the factory settings at low voltage of 178 V and the triangle connection scheme of the stator windings' terminals

#### Результаты исследований

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 4, 5, показывает, что максимальный статический момент ТАД напряжением 220 В с параметрами схемы замещения, полученными на основе обмоточных данных завода изготовителя кранового двигателя, примерно на 32...34 % больше момента двигателя с расчетными параметрами по паспортным

данным. Максимальный пусковой ток фазы статора также больше на 27,5...30 %, соответственно.

Максимальный момент ТАД при изменении температуры обмоток с 20 до 115 °С уменьшается незначительно, на 6,5...7,5 %.

Следовательно, предельные характеристики, полученные для двигателя с рассчитанными параметрами схемы замещения по паспортным дан-

ным, более характерны для общепромышленных асинхронных двигателей. Предельные характеристики ТАД на основе специального кранового двигателя с частотным управлением показывают, что обмотки этого двигателя спроектированы оптимальным образом не только для крановых механизмов, но и проявляют отличные тяговые свойства. Изменение тяговых свойств ТАД от температуры незначительно.

Ток холостого хода ТАД составляет 52 % от номинального тока. Это хорошо согласуется с режимами работы ТАД подземного электровоза. Грузовой состав дает нагрузку ТАД в пределах 100 %, а порожний состав грузит двигатели примерно наполовину.

Пусковые свойства ТАД представлены на рис. 6 с учетом насыщения магнитной цепи машины и вытеснения тока в обмотке ротора. Отношение пускового тока к номинальному току ТАД лежит в пределах 10:1. Отношение максимального момента к пусковому моменту ТАД составляет 1,6:1.

Статические характеристики ТАД 4МТКМ1Ф2П225L6 с часовой мощностью 55 кВт с обмоткой статора и ротора, пересчитанной на пониженное напряжение питания 178 В, представлены на рис. 7. Максимальный момент ТАД с пониженным напряжением обмотки статора 178 В не отличается от момента ТАД на стандартное напряжение 220 В. При этом ток фазы статора вырос на 24,5 %.

Динамические характеристики прямого пуска ТАД с последующим «набросом» нагрузки приведены на рис. 8, 9. Характер переходных процессов и установившихся значений моментов, токов и скорости находится в пределах выявленных зависимостей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов П.Р. и др. Исследование характеристик тяговых асинхронных двигателей для частотно-управляемого рудничного электровоза // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2014. – С. 212–216.
2. Studying Characteristics of Traction Induction Motors for Variable-Speed Mine Electric Locomotive / P.R. Baranov, S.N. Kladiyev, S.V. Borisov, A.A. Filipas // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – V. 770. – P. 378–383.
3. Вопросы линеаризации математической модели преобразователя напряжения, применяемого в системах электропитания, работающих на основе возобновляемых источников энергии / Р.К. Диксон, Г.Я. Михальченко, С.Г. Михальченко, В.А. Рускин, С.М. Семенов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – P. 89–99.
4. Самотканов А.В. Комплексная математическая модель вспомогательного электропривода тепловоза // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский госу-

#### Выводы

Анализ полученных данных позволяет утверждать, что для обеспечения необходимых тяговых свойств частотно-регулируемого асинхронного двигателя необходимо решить комплекс задач в условиях ограничения величины напряжения в питающей троллейной линии:

1. В качестве прототипа тягового асинхронного двигателя для подземных электровозов необходимо использовать специальный крановый частотно-регулируемый двигатель производства ОАО «Сибэлектромотор».
2. Необходимо применять устройства компенсации падения напряжения на 30 % в длинной линии путем использования последовательной вольтодобавки постоянного тока для двухдвигательного частотно-регулируемого тягового электропривода. В этом случае для обеспечения требуемой тяги нужно использовать специально спроектированный тяговый асинхронный двигатель с пониженным напряжением питания.
3. В случае использования последовательной вольтодобавки, компенсирующей не только падения напряжения, но и его увеличение на 70 %, возможно использовать тяговые асинхронные двигатели со стандартным напряжением статора.
4. С учетом жестких требований по вибростойкости и ударопрочности необходимо использовать стальной сварной корпус двигателя с дополнительными опорами.
5. В случае использования в качестве источника питания аккумуляторных батарей, при использовании герметичных вводов, можно получить взрывозащищенное исполнение данного электрооборудования.

- дарственный университет им. Н.П. Огарёва, 2014. – С. 216–220.
5. Самотканов А.В., Воробьев В.И., Пугачев А.А. Передаточная функция вспомогательного электропривода тепловоза // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2014. – С. 220–223.
6. Федяева Г.А., Тарасов А.Н. Система управления асинхронным тяговым электроприводом гибридного маневрового тепловоза // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2014. – С. 223–226.
7. Development of a system to control the motion of electric transport under conditions of iron-ore mines / O. Sinchuk, I. Kozakevich, V. Fedotov, A. Somochkyn, V. Serebrenikov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies – 2017. – V. 3. – Iss. 2. – P. 39–47.
8. ГОСТ 2582–2013 «Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия». – М.: Стандартинформ, 2014. – 56 с.

9. ГОСТ Р 52776–2007 (МЭК 60034–1–2004) «Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики». – М.: Стандартинформ, 2008. – 74 с.
10. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга. – М.: Недра, 1981. – 389 с.
11. Development aspects of asynchronous electrotechnical complex for mine pin-storage-battery electric locomotives / O.N. Jurchenko, I.O. Sinchuk, Je.S. Guzov, D.A. Shokarev, E.I. Skapa // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies – 2015. – V. 1. – Iss. 8. – P. 21–26.
12. Сайт предприятия «Горная компания». Технические характеристики электродвигателя ДК-812. URL: <http://www.1gc.ru/oborudovanie-dlya-rudnichnyh-elektrovozov/elektrodvigatel-dk-812> (дата обращения: 01.09.2017).
13. ГОСТ 17516.1–90 «Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействиям». – М.: Стандартинформ, 2007. – 53 с.
14. Wang Y., Liu J.-X. Vibration properties of locomotive traction gear excited by load fluctuation // Journal of Traffic and Transportation Engineering – 2015. – V. 15. – P. 45–50.
15. Сайт предприятия «Бавленский электромеханический завод». Каталог крановых двигателей на лапах с одним концом вала (IM 1001). URL: <http://www.bavemz.ru/products/5/> (дата обращения: 01.09.2017).
16. Сайт предприятия «Сибэлектромотор». URL: <http://www.sib-elektromotor.ru> (дата обращения: 01.09.2017).
17. Сайт предприятия «Русэлпром». Технический каталог крановых двигателей. URL: <http://www.ruselprom.ru> (дата обращения: 01.09.2017).
18. Сайт предприятия «Сибирская электротехническая компания». URL: <http://setc.ru> (дата обращения: 01.09.2017).
19. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: ИП «Академия», 2006. – 272 с.
20. Bolovin E.V., Glazyrin A.S., Brendakov V.N. The influence of the design method for induction motor with stationary rotor on identification of its parameters // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): Proceedings. – Omsk, 2015. – P. 1–7.
21. Tkachuk R. Yu., Glazyrin A.S., Polichshuk V.I. Document Induction motor drive's parameters identification using genetic algorithms // 7<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012. – Tomsk, 2012. – V. 2. – P. 586–589.
22. Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (MatLab 7.0.1). – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 292 с.
23. Fleischer M., Kondo K. Reduced Model Identification and Parameter Estimation for Traction Drive-Trains // IEEJ Journal of Industry Applications – 2015. – V. 4 – Iss. 4. – P. 486–495.
24. Kladiev S., Pyakillya B., Vilnin A. Mathematical model of traction electric drive for mine electric train // Smart Grids: the 2<sup>nd</sup> International Youth Forum. – 2014. – V. 19. DOI: 10.1051/mateconf/20141901040
25. Locomotive wheel slip detection based on multi-rate state identification of motor load torque / S. Wang, J. Xiao, J. Huang, H. Sheng // Journal of the Franklin Institute – 2016. – V. 353. – Iss. 2. – P. 521–540.
26. Sliding mode control of longitudinal motions for underground mining electric vehicles with parametric uncertainties / W. Ye, W. Shen, J. Zheng, D. Honnery, D. Dayawansa // International Journal of Modelling, Identification and Control. – 2016. – V. 26. – Iss. 1. – P. 68–78.
27. Fuzzy parameter tuning sliding mode control for longitudinal motion of underground mining electric vehicles based on a single wheel model / W. Ye, W. Shen, J. Zheng, D. Honnery, D. Dayawansa // International Conference on Advanced Mechatronic Systems. – Melbourne, Australia, 2016. – P. 283–288.
28. Analysis of variants of differential torque control applied to induction motor with short-circuited rotor / A.E. Evstratov, V.M. Zavyalov, A.V. Grigoryev, I.Y. Semykina // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – V. 11 (7). – P. 4391–4398.

Поступила 19.09.2017 г.

#### Информация об авторах

**Арсентьев О.В.**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электропривода и электрического транспорта Института энергетики Иркутского Национального исследовательского технического университета.

**Баранов П.Р.**, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнических комплексов и материалов Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Вильнин А.Д.**, заведующий научно-учебной лабораторией геоинформационных технологий Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Кладиев С.Н.**, кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 62–831.1:621.313.333.2:621.333

## EVALUATIVE RESEARCH OF INDUCTION TRACTION ELECTRIC MOTOR WITH LOW-LEVEL POWER SUPPLY FOR MINE LOCOMOTIVE

Oleg V. Arsentiev<sup>1</sup>,  
arsentyevov@mail.ru

Pavel R. Baranov<sup>2</sup>,  
baranovp@tpu.ru

Alexander D. Vilnin<sup>2</sup>,  
vilninad@tpu.ru

Sergey N. Kladiev<sup>2</sup>,  
kladiev@tpu.ru

<sup>1</sup> Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to solve the problem of ensuring energy-efficient operation modes of traction electric drives of underground locomotive used to transport metal ore in ferrous and nonferrous mines from the place of mining to place of storage for further transportation to the surface. One of the main tasks of underground rail transport is to reach marginal traction characteristics of variable-frequency induction motors in conditions of limited magnitude of supply voltage of the contact network DC of underground transport for electrical safety reasons.

**The aim** of the work is to study the possibility of using induction motors with reduced voltage power supply for traction electric underground mining locomotives; to determine the conditions of conformity of mechanical characteristics of induction traction motor with reduced voltage regarding the characteristics of a standard voltage.

**Object of research:** traction induction motor with reduced supply voltage, increased tractive effort and low sensitivity to vibration and shocks.

**Research methods.** The research was performed by analyzing the analytical dependences of induction motor characteristics and simulation results in the Simulink/MatLab. The comparison was carried out at static and dynamic characteristics, energy performance and structural features of the considered motors.

**Results.** A special crane induction motor, produced by «Sibelektromotor», designed for frequency regulation of speed, was selected as a prototype of induction traction motor. The paper introduces the method for calculating the equivalent circuit parameters of induction traction motor by passport data at reduced voltage to the stator; its simulation model was designed. The principal mechanical and electromechanical properties and characteristics of traction induction motor with the switching scheme of connection of phase windings of the stator from the «star» to «triangle», recalculated to a low voltage, correspond to characteristics of induction traction motor with standard voltage. To ensure vibration and shock resistance the authors justified a change in the design of induction traction motor with replacement of cast iron housing on the welded steel housing with additional supports for fixing to the frame of the locomotive.

### Key words:

Induction traction motor, mine locomotive, equivalent circuit parameters, mechanical characteristics, lower supply voltage.

### REFERENCES

1. Baranov P.R. Issledovanie kharakteristik tyagovykh asinkhronnykh dvigateley dlya chastotno-upravlyаемого rudnichnogo elektrovoza [Study of characteristics of induction traction motors for frequency-controlled mine locomotive]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014* [Proc. of VIII International (XIX all-Russian) scientific-technical conference on automated electric drive of AEP-2014]. Saransk, N.P. Ogarev National Research Mordovia State University, 2014. pp. 212–216.
2. Baranov P.R., Kladiev S.N., Borisov S. V, Filipas A.A. Studying Characteristics of Traction Induction Motors for Variable-Speed Mine Electric Locomotive. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 770, pp. 378–383.
3. Dixon R.C., Mikhilchenko G.Ya., Mikhilchenko S.G., Ruskin V.A., Semenov S.M. Issues of linearization of a two-phase boost DC-DC converter applied in the power supply systems operating on renewable energy sources. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 89–99.
4. Samotkanov A.V. Kompleksnaya matematicheskaya model vspomogatel'nogo elektroprivoda teplovoza [A comprehensive mathematical model of the auxiliary electric drive of diesel locomotive]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014* [Proc. of VIII International (XIX all-Russian) scientific-technical conference on automated electric drive of AEP-2014]. Saransk, N.P. Ogarev National Research Mordovia State University, 2014. pp. 216–220.
5. Samotkanov A.V., Vorobev V.I., Pugachev A.A. Peredatochnaya funktsiya vspomogatel'nogo elektroprivoda teplovoza [The transfer function of the auxiliary electric drive of diesel locomotive]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014* [Proc. of VIII International (XIX all-Russian) scientific-technical conference on automated electric drive of AEP-2014]. Saransk, N.P. Ogarev National Research Mordovia State University, 2014. pp. 216–220.

- tific-technical conference on automated electric drive of AEP-2014]. Saransk, N.P. Ogarev National Research Mordovia State University, 2014. pp. 220–223.
6. Fedyaeva G.A., Tarasov A.N. Sistema upravleniya asinkhronnym tyagovym elektropriivodom gibridnogo manevrovogo teplovoza [The control system of the induction traction electric drive hybrid shunting locomotives]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) nauchno-tehnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektropriivodu AEP-2014* [Proc. of VIII International (XIX all-Russian) scientific-technical conference on automated electric drive of AEP-2014]. Saransk, N.P. Ogarev National Research Mordovia State University, 2014. pp. 223–226.
  7. Sinchuk O., Kozakevich I., Fedotov V., Somochkyn A., Serebrenikov V. Development of a system to control the motion of electric transport under conditions of iron-ore mines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 3, Iss. 2, pp. 39–47.
  8. GOST 2582–2013 Mashiny elektricheskoye vrashchayushchiesya tyagovoye. Obshchie tekhnicheskoye usloviya [State Standard 2582–2013. Rotating electrical traction machines for rail and road vehicles. General technical specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 10 p.
  9. GOST R 52776–2007 (MEK 60034–1–2004) Mashiny elektricheskoye vrashchayushchiesya. Nominalnye dannye i kharakteristiki [State Standard R 52776–2007 (IEC 60034–1–2004). Rotating electrical machines. P. 1. Rating and performance]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 74 p.
  10. Volotkovskiy S.A. Rudnichnaya elektrovoznaya tyaga [Mine locomotive traction]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 389 p.
  11. Jurchenko O.N., Sinchuk I.O., Guzov Je.S., Shokarev D.A., Skapa E.I. Development aspects of asynchronous electrotechnical complex for mine pin-storage-battery electric locomotives. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, vol. 1, Iss. 8, pp. 21–26.
  12. Tekhnicheskoye kharakteristiki elektrodvigatelja DK-812 [Technical characteristics of electric motor DK-812]. *Gornaya kompaniya*. Available at: <http://www.lgc.ru/oborudovanie-dlya-rudnichnyh-elektrovozov/elektrodvigatel-dk-812> (accessed 01 September 2017).
  13. GOST 17516.1–90 Izdeliya elektrotekhnicheskoye. Obshchie trebovaniya v chasti stoykosti k mekhanicheskim vneshnim vozdeystviyam [State Standard 17516.1–90 Electrical articles. General requirement for environment mechanical stability]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 53 p.
  14. Wang Y., Liu J.-X. Vibration properties of locomotive traction gear excited by load fluctuation. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2015, vol. 15 (6), pp. 45–50.
  15. Katalog kranovykh dvigateley na lapakh s odnim kontsom vala (IM 1001) [Catalogue of crane motors with feet and one sided shaft (IM 1001)]. *Bavlenkiy elektromekhanicheskiy zavod*. Available at: <http://www.bavemz.ru/products/5/> (accessed 01 September 2017).
  16. *Sibeletromotor*. Available at: <http://www.sibeletromotor.ru> (accessed 01 September 2017).
  17. Tekhnicheskoye katalog kranovykh dvigateley [Crane motor technical catalogue]. *Ruselprom*. Available at: <http://www.ruselprom.ru> (accessed 01 September 2017).
  18. *Sibirskaya elektrotekhnicheskaya kompaniya*. Available at: <http://setc.ru> (accessed 01 September 2017).
  19. Sokolovskiy G.G. *Elektropriivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [AC-drives with frequency regulation]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 272 p.
  20. Bolovin E.V., Glazyrin A.S., Brendakov V.N. The influence of the design method for induction motor with stationary rotor on identification of its parameters. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*: proceedings. Omsk, 2015. pp. 1–7.
  21. Tkachuk R.Yu., Glazyrin A.S., Polichshuk V.I. Document Induction motor drive's parameters identification using genetic algorithms. *7<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012*. Tomsk, 2012. Vol. 2, pp. 586–589.
  22. Terekhin V.B. *Modelirovaniye sistem elektropriivoda v Simulink (MatLab 7.0.1)* [Simulation of electric drive systems in Simulink (MatLab 7.0.1)]. Tomsk, TPU Publ. house, 2010. 292 p.
  23. Fleischer M., Kondo K. Reduced Model Identification and Parameter Estimation for Traction Drive-Trains. *IEEE Journal of Industry Applications*, 2015, vol. 4, Iss. 4, pp. 486–495.
  24. Kladiev S., Pyakillya B., Vilnin A. Mathematical model of traction electric drive for mine electric train. *The 2<sup>nd</sup> International Youth Forum. Smart Grids*, 2014. Vol. 19. DOI: 10.1051/mateconf/20141901040
  25. Wang S., Xiao J., Huang J., Sheng H. Locomotive wheel slip detection based on multi-rate state identification of motor load torque. *Journal of the Franklin Institute*, 2016, vol. 353, Iss. 2, pp. 521–540.
  26. Ye W., Shen W., Zheng J., Honnery D., Dayawansa D. Sliding mode control of longitudinal motions for underground mining electric vehicles with parametric uncertainties. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 2016, vol. 26, Iss. 1, pp. 68–78.
  27. Ye W., Shen W., Zheng J., Honnery D., Dayawansa D. Fuzzy parameter tuning sliding mode control for longitudinal motion of underground mining electric vehicles based on a single wheel model. *International Conference on Advanced Mechatronic Systems*. Melbourne, Australia, 2016. pp. 283–288.
  28. Evstratov A.E., Zavyalov V.M., Grigoryev A.V., Semykina I.Y. Analysis of variants of differential torque control applied to induction motor with short-circuited rotor. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, vol. 11 (7), pp. 4391–4398.

Received: 19 September 2017.

#### Information about the authors

**Oleg V. Arsentiev**, Cand. Sc., associate professor, head of department, Irkutsk National Research Technical University.

**Pavel R. Baranov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Alexander D. Vilnin**, head of laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Sergey N. Kladiev**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Корректурa и перевод на английский язык** *С.В. Жаркова*  
**Дизайн обложки** *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

Подписано к печати 28.11.2017. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 16,17. Уч.-изд. л. 14,62.  
Заказ 302-17. Тираж 500 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ