

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 331, № 2, 2020

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)
Белозеров В.Б., 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)
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)
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)
Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия)
Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия)
Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия)
Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия)
Антипенко В.Р., д-р хим. наук (Россия)
Голик В.И., д-р техн. наук (Россия)
Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия)
Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)
Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)
Зюев А.М., д-р техн. наук (Россия)
Кириянова 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, 2020

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 геологических объектов.

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, scholar.google.com

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

Volume 331, № 2, 2020

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)
Belozerv V.B., 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)
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)
Poilov V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Lotov V.A., Dr. Sc. (Russia)
Sofronov V.L., Dr. Sc. (Russia)
Bouznik V.M., Dr. Sc. (Russia)
Zakharov Yu.A., Dr. Sc. (Russia)
Antipenko V.R., Dr. Sc. (Russia)
Golik V.I., Dr. Sc. (Russia)
Abutalipova E.M., Dr. Sc. (Russia)
Polishchuk V.I., Dr. Sc. (Russia)
Khamitov R.N., Dr. Sc. (Russia)
Zyuzev A.M., Dr. Sc. (Russia)
Kiryanova L.G., managing editor, Cand. Sc. (Russia)
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)

AIMS AND SCOPE

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 and transportation;
- Geo Assets deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets and Geoecology issues;
- Geo-engineering of Eurasia and marginal sea;
- Economic and social aspects of using Geo Assets.

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 two 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, scholar.google.com.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Метеорологические условия формирования поверхностного стока наносов в период весеннего снеготаяния в городской среде
 Селезнев А.А., Тетерин А.Ф., Ярмошенко И.В.</p> <p>Редкоземельные и радиоактивные (Th, U) элементы в компонентах природной среды на территории Томской области
 Барановская Н.В., Агеева Е.В., Соктоев Б.Р., Наркович Д.В., Денисова О.А., Матковская Т.В.</p> <p>Определение оптимальной структуры ветросолнечных электростанций в монгольской части пустыни Гоби
 Марченко О.В., Соломин С.В.</p> <p>Акцессорные ниобий-танталовые минералы Алейского гранитного массива (СЗ Рудного Алтая)
 Новоселов К.Л.</p> <p>Оценка вариантов отработки прибортовых и подкарьерных запасов рудника «Олений ручей»
 Немова Н.А., Бельш Т.А.</p> <p>Анализ эффективности промежуточного перегрева пара в котле-утилизаторе ГТ-надстройки теплофикационного энергоблока
 Минор А.А., Ромашова О.Ю.</p> <p>Типизация инженерно-геологических условий территории трассы проектируемой железной дороги Элегест–Кызыл–Курагино
 Строкова Л.А., Надеждина Ю.Ю.</p> <p>Гидрохимический состав и редкоземельные элементы в полигонально-жильных льдах ключевых районов криолитозоны Карского региона
 Бутаков В.И., Слагода Е.А., Тихонравова Я.В., Опокина О.Л., Томберг И.В., Жученко Н.А.</p> <p>Совершенствование технологии очистки забоя воздухом для снижения аварийности при бурении скважин на Куюмбинском нефтяном месторождении
 Бузанов К.В., Борисов К.И.</p> <p>Минералого-геохимическая специфика буровых шламов нефтяных месторождений на примере объектов Томской области
 Климова А.А., Язиков Е.Г., Шайхиев И.Р.</p> <p>Разработка методики определения места однофазного замыкания на землю воздушной линии электропередачи напряжением 6(10) кВ с учетом климатических факторов
 Сидоров С.В., Сушков В.В., Сухачев И.С.</p> <p>Влияние фильтрационно-емкостных свойств призабойной зоны пласта на эффективность кислотной обработки
 Дорфман М.Б., Сентемов А.А.</p> <p>Разработка породоразрушающего инструмента с резами PDC
 Нескоромных В.В., Попова М.С., Парахонько Е.В.</p> <p>Установление технологических зависимостей работы концентратора KC-CVD6 с помощью метода группового учета аргументов
 Пелих В.В., Салов В.М., Бурдонов А.Е., Лукьянов Н.Д.</p> <p>Исследование углеразведочных скважин методом импульсного нейтрон-нейтронного каротажа
 Фоменко Н.Е., Попов В.В., Коваленко А.С.</p> <p>Исследование влияния анизотропии проницаемости на разработку модельного блока терригенного нефтенасыщенного коллектора в ходе гидродинамических расчётов
 Ермеков Р.И., Коровин М.О., Меркулов В.П., Чернова О.С.</p> | <p>7</p> <p>17</p> <p>29</p> <p>38</p> <p>45</p> <p>54</p> <p>64</p> <p>78</p> <p>92</p> <p>102</p> <p>115</p> <p>124</p> <p>131</p> <p>139</p> <p>151</p> <p>162</p> | <p>Meteorological conditions of surface sediment runoff formation during spring snowmelt in urban environment
 Seleznev A.A., Teterin A.F., Yarmoshenko I.V.</p> <p>Rare earth and radioactive (Th, U) elements in the components of the environment on the territory of Tomsk region
 Baranovskaya N.V., Ageeva E.V., Soktoev B.R., Narkovich D.V., Denisova O.A., Matkovskaya T.V.</p> <p>Determination of the optimal structure of wind-solar power plants in the mongolian part of the Gobi desert
 Marchenko O.V., Solomin S.V.</p> <p>Accessory niobium-tantalum minerals of the Aleisk granite massif (N-W Rudny Altay Area)
 Novoselov K.L.</p> <p>Assessment of pit wall and pit bottom reserves working options in the mine «Oleniy ruchey»
 Nemova N.A., Belsh T.A.</p> <p>Efficiency analysis of steam reheating in heat recovery steam generator of heat-extraction energy unit GT-topping
 Minor A.A., Romashova O.Yu.</p> <p>Typification of engineering and geological conditions of the territory of the route of the projected railway Elegest–Kyzyl–Kuragino
 Strokova L.A., Nadezhkina Yu.Yu.</p> <p>Hydrochemical composition and rare-earth elements in ice wedge of the Kara region cryolitozone key areas
 Butakov V.I., Slagoda E.A., Tikhonravova Ya.V., Opokina O.L., Tomberg I.V., Zhuchenko N.A.</p> <p>Improvement of bottom hole air cleaning to reduce accident rate of well drilling at Kuyumbinskoe oilfield
 Buzanov K.V., Borisov K.I.</p> <p>Mineralogical and geochemical particularity of drill cuttings from oil fields on the example of objects of the Tomsk region
 Klimova A.A., Yazikov E.G., Shaikhiev I.R.</p> <p>Development of a method for determining the location of a single-phase ground fault of an overhead power line 6(10) kV voltage considering climatic factors
 Sidorov S.V., Sushkov V.V., Sukhachev I.S.</p> <p>Influence of reservoir properties of the bottomhole zone on acidizing efficiency
 Dorfman M.B., Sentemov A.A.</p> <p>Development of rock cutting tool with PDC cutters
 Neskormnykh V.V., Popova M.S., Parakhonko E.V.</p> <p>Establishment of technological dependence of KC-CVD6 concentrator operation by means of the argument group accounting method
 Pelikh V.V., Salov V.M., Burdonov A.E., Lukyanov N.D.</p> <p>Study of coal exploration wells using the pulsed-neutron-neutron logging
 Fomenko N.E., Popov V.V., Kovalenko A.S.</p> <p>Investigation of permeability anisotropy impact on development of block oilfield of terreginous oil-saturated reservoir during simulation
 Ermekov R.I., Korovin M.O., Merkulov V.P., Chernova O.S.</p> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

- | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Анализ флуктуации фоновых содержаний химических элементов при литохимических поисках в условиях тропического выветривания. Южная Америка, Гайана
 Соболев И.С., Соболева Н.П.</p> <p>Диагностические критерии выделения фильтрационных потоков в процессе гидродинамических исследований горизонтальных скважин
 Сергеев В.Л., Донг Ван Хоанг, Хагай Д.Э., Игнатенко А.В.</p> <p>Двухуровневый метод диагностики технического состояния штанговых насосных установок
 Бахтизин Р.Н., Уразаков К.Р., Исмагилов С.Ф., Давлетшин Ф.Ф.</p> <p>Микроэлементный состав водных экстрактов некоторых образцов диатомитов и лидитов Карелии
 Феоктистов В.М., Медведев П.В.</p> | <p>170 Fluctuation analysis of chemical elements background values in lithochemical exploration under tropical weathering (South America, Guyana)
 Sobolev I.S., Soboleva N.P.</p> <p>181 Diagnostic criteria for identification of filtration flows during horizontal well tests
 Sergeev V.L., Dong Van Hoang, Khagay D.E., Ignatenko A.V.</p> <p>188 Two-level method for diagnosing technical condition of sucker-rod pumping units
 Bakhtizin R.N., Urazakov K.R., Ismagilov S.F., Davletshin F.F.</p> <p>199 Trace element composition of aqueous extracts of some diatomite and lydite samples from Karelia
 Feoktistov V.M., Medvedev P.V.</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

УДК 551.582:551.584:550.42:502.175

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА НАНОСОВ В ПЕРИОД ВЕСЕННЕГО СНЕГОТАЯНИЯ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

Селезнев Андриан Анатольевич^{1,2},
sandrian@rambler.ru

Тетерин Александр Федорович¹,
taf@ecko.uran.ru

Ярмошенко Илья Владимирович¹,
ivy@ecko.uran.ru

¹ Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН,
Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20.

² Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью изучения процессов осадкообразования на урбанизированной территории, которые снижают качество городской среды и оказывают негативное влияние на экологическую ситуацию.

Цель: проанализировать метеорологические условия формирования поверхностного стока наносов в крупном городе в период интенсивного весеннего снеготаяния.

Объект: урбанизированная территория города Екатеринбурга.

Методы: изучение метеорологических условий за холодные периоды 2015–2016 и 2016–2017 гг., а также в весенние сезоны 2016 и 2017 гг.; оценка особенностей и различий метеорологических параметров и процессов, оказавших основное влияние на сток наносов весной 2016 и 2017 гг.

Результаты. Ретроспективно восстановлены метеорологические условия холодных периодов 2015–2016 и 2016–2017 гг. и в весенние сезоны 2016 и 2017 гг. Были проанализированы метеорологические величины и процессы, оказавшие существенное влияние на поверхностный сток воды на урбанизированной территории: термический режим приземного воздуха, атмосферные осадки, снежный покров, снеготаяние, промерзание и оттаивание почвогрунтов. Установлено, что метеорологические условия весны 2016 и 2017 гг. существенно отличались друг от друга, что отразилось на формировании более интенсивного грязевого осадка в 2016 г. Весной в городской среде следующие погодные факторы являются определяющими при формировании поверхностного стока: запас воды, накопленный в снежном покрове за холодный период года; особенности термического режима в период снеготаяния (дружность весны, возвраты холодов); атмосферные осадки и интенсивность оттаивания грунта в период снеготаяния. Полученные результаты могут быть использованы при планировании мероприятий для улучшения экологической ситуации на урбанизированной территории.

Ключевые слова:

Урбанизированная среда, седиментогенез, метеорологические условия, снеготаяние, поверхностный сток, наносы, грязевой осадок, Екатеринбург.

Введение

Одним из процессов, определяющих геохимическую трансформацию верхней части геологического разреза городских территорий, является образование рыхлого осадочного материала в результате действия естественных и антропогенных факторов [1, 2]. К природным факторам седиментогенеза в городской среде относятся: выветривание и эрозия грунтов, дорожных покрытий и строительных конструкций. Антропогенные процессы включают разрушение покрытий автотранспортом, производство работ, связанных с нарушением целостности покрытий, разработкой грунта и др. За счет антропогенных факторов интенсивность современного осадкообразования в урбанизированной среде на порядки выше, чем в природных ландшафтах, и может достигать нескольких сотен тонн на квадратный километр в год [3, 4].

Перемещение наносов в ходе поверхностного стока и аккумуляция осадочного материала на пониженных участках микрорельефа городского ландшафта

представляют собой как экологическую [1, 5, 6], так и коммунальную проблему [7, 8]. В урбанизированной среде поверхностные наносы образуют грязевой осадок – твердые частицы минерального и антропогенного происхождения, отложенные в локальных понижениях дорог, проездов, тротуаров, газонов и других участков. Накопление этого компонента на улицах и во дворах существенно снижает качество и ухудшает восприятие городской среды. Грязевые отложения являются неточечным источником загрязнения атмосферы твердыми взвешенными частицами и поллютантами [2]. Твердые частицы заиливают ливневую канализацию, способствуют уплотнению городских почв и как результат увеличивают поверхностный сток [7]. Негативный эффект значительно возрастает при нарушении технологий благоустройства территорий города и недостаточной уборке [8]. Поступление наносов с урбанизированных территорий в речные системы делает города источником загрязнения вод в глобальном масштабе, а также изменяет морфологию русел [9, 10].

При планировании устойчивого, экологически безопасного развития городов в условиях возрастающей антропогенной, в частности автотранспортной, нагрузки необходимо учитывать происходящие на урбанизированной территории процессы осадкообразования. Актуальность изучения наносов также связана с тем, что поверхностные грязевые отложения могут использоваться в качестве геоиндикаторного объекта, позволяющего контролировать эколого-геохимические процессы в городской среде [6, 11].

Помимо природных факторов и антропогенного воздействия на отложение наносов оказывают влияние метеорологические условия [12]. Наиболее выражено влияние метеоусловий в зимний и весенний сезоны. В контексте городского седиментогенеза образование снежного покрова может рассматриваться как затяжной процесс поверхностного стока атмосферных осадков, консервирующего поверхностный осадок на продолжительное время. Как показало исследование источников и причин загрязнения территории города, проведенное в Екатеринбурге в 2017 г., содержание твердого осадка в пробах снегогрязевой пульпы, которая образуется в результате перемешивания поверхностного осадка снега колесами автомобилей на дорогах и в проездах, а также в кучах снега, складированных вдоль дорог, в феврале 2016 г. составляло в среднем 25 г/л, что соответствует площадному накоплению $1,2 \text{ кг/м}^2$ [13]. Интенсивное весеннее снеготаяние за короткий период времени высвобождает накопленный осадочный материал и способствует образованию грязевого осадка. В городах, расположенных в климатической зоне с продолжительной снежной зимой, значительное количество грязевого осадка в период снеготаяния является актуальной, общественно значимой проблемой.

Качественные экспертные оценки стока наносов с талыми водами, проведенные в Екатеринбурге весной 2016 и 2017 гг., показали, что в период интенсивного снеготаяния 2016 г. образовалось заметно большее количество грязевого осадка, чем в 2017 г. Можно предполагать, что сравнение условий формирования поверхностного стока наносов за эти два периода позволит определить основные метеорологические факторы, оказывающие влияние на этот процесс в урбанизированной среде. Целью настоящего исследования является анализ метеорологических условий формирования поверхностного стока наносов на территории города в период снеготаяния. Исследование проведено на примере Екатеринбурга.

Материалы и методы

Екатеринбург – административный центр Уральского федерального округа и Свердловской области, крупнейший на Урале промышленный, культурный и научно-образовательный центр. Площадь городской территории составляет 468 км^2 . Это четвертый по численности населения город в России, по состоянию на 1 января 2018 г. в городе проживало примерно 1,5 млн человек. Город Екатеринбург расположен в глубине Евразийского материка, на стыке восточных предгорий Среднего Урала и Зауральской складчатой

возвышенности, в таежной зоне, подзоне южной тайги. Характер рельефа крупнохолмистый [14, 15].

По генетической классификации климатов Б.П. Алисова, Екатеринбург находится в умеренном климатическом поясе континентальной лесной Западно-Сибирской области [16]. По классификации климатов А.А. Григорьева и М.И. Будыко, Екатеринбург расположен в зоне ПЗД влажного климата с умеренно теплым летом, умеренно суровой и снежной зимой [17, 18].

В районе Екатеринбурга преобладает западный перенос воздушных масс. Средний Урал является преградой на пути воздуха, поступающего с акватории Северной Атлантики. Поэтому на западных предгорьях Среднего Урала выпадет больше атмосферных осадков, чем на восточных. Следствием этого в холодный период года является формирование менее мощного снежного покрова на восточных предгорьях Среднего Урала по сравнению с западными предгорьями [19]. Многолетний средний индекс континентальности по С.П. Хромову [18, 20] для Екатеринбурга составляет 86,18 %, по Ценкеру – 52 % [14].

Многолетний средний индекс континентальности по атмосферным осадкам, предложенный в 1976 г. Ц.А. Швер [21], для Екатеринбурга равен 1,84, что соответствует континентальному типу климата. Эта величина, как и индекс континентальности по Хромову, не является постоянной.

Холодный период, когда средняя месячная температура воздуха ниже 0°C , в Екатеринбурге в среднем продолжается с ноября по март (151 день), средняя температура воздуха за данный период составляет $-11,2^\circ\text{C}$. При отрицательных температурах происходит накопление атмосферных осадков в виде снежного покрова. Многолетняя средняя температура января равна $-15,3^\circ\text{C}$, а июля $+17,4^\circ\text{C}$ [14]. В силу изменений климата многолетняя средняя температура января повысилась до $-14,7^\circ\text{C}$, а июля $+17,8^\circ\text{C}$ [30]. В силу географического положения и континентальности климата средняя температура зимой в Екатеринбурге значительно ниже, чем в крупных городах Европы и в большинстве крупных городов России. В то же время средняя июльская температура не ниже, чем в североευропейских городах.

Городские ландшафты испытывают высокую антропогенную нагрузку, обусловленную большим числом автомобилей. Екатеринбург – четвертый город России по числу легковых автомобилей (437,3 тыс. штук [22]).

В работе проанализированы следующие метеорологические характеристики за холодные периоды 2015–2016 и 2016–2017 гг., а также в весенние сезоны 2016 и 2017 гг.: термический и влажностный режимы; атмосферные осадки; запас воды, накопленный в снежном покрове за холодный период; высота, даты появления и схода снежного покрова; промерзание и оттаивание грунтов, процесс снеготаяния. Конкретные значения метеорологических величин по метеостанции Екатеринбург (WMO_ID=28440) за исследуемый период были получены с сайта «Расписание Погоды» [23]. В качестве норм были использованы

многолетние средние значения основных метеорологических величин из последнего официального издания по климату Уральского региона, научно-прикладного справочника по климату СССР [24].

Расчет промерзания грунтов проводился согласно «СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*». Глубину сезонного промерзания грунта для районов, с глубиной промерзания до 2,5 м, определяют по формуле:

$$d=d_0(M_t)^{0,5}, \quad (1)$$

где M_t – безразмерный коэффициент, численно равный сумме абсолютных значений среднемесячных отрицательных температур за зиму в данном районе; d_0 – величина, принимаемая равной 0,23 м для суглинков и глин; супесей, песков мелких и пылеватых – 0,28 м; песков гравелистых, крупных и средней крупности – 0,30 м; крупнообломочных грунтов – 0,34 м. Так как в районе Екатеринбурга преобладают суглинки, d_0 приняли равным 0,23. Среднюю глубину промерзания грунта при наличии снежного покрова определяли в зависимости от морозопродолжительности (произведение средней температуры воздуха на продолжительность морозного периода) и толщины снежного покрова по многолетним средним данным [24], а глубину промерзания грунта за конкретный месяц и год – по фактическим данным для метеостанции Екатеринбург [23].

Средняя скорость оттаивания суглинков в Свердловской области и в Екатеринбурге по [25] составляет 4 см/сутки. Весной оттаивание грунта начинается после схода снежного покрова.

Для городской среды, исходя из уравнения водного баланса и не учитывая поверхностный и подземный приток воды извне, конденсацию водяного пара и изменение количества воды в пределах территории города [26], весной при снеготаянии суточный поверхностный сток воды (SR , мм/сутки) рассчитывали по формуле:

$$SR=SM+Pr-E-I, \quad (2)$$

где SM – снеготаяние; Pr – атмосферные осадки за период снеготаяния; E – испарение; I – инфильтрация воды в грунт; все компоненты поверхностного стока имеют размерность мм/сутки. Затем определялся суммарный (накопленный) поверхностный сток воды как сумма суточных поверхностных стоков.

Расчет суточного снеготаяния (SM , мм/сутки) проводили согласно [27] по формуле:

$$SM=a \cdot t_a, \quad (3)$$

где a – коэффициент стаивания, мм/(°C·сутки); t_a – средняя суточная температура воздуха (°C). Оценку снеготаяния проводили для двух участков на урбанизированной территории: для открытых газонов и площадок [максимальное снеготаяние, коэффициент стаивания 5 мм/(°C·сутки)], для лесопарков, затененных газонов и площадок [минимальное снеготаяние, коэффициент стаивания 1,4 мм/(°C·сутки)].

Суточные суммы атмосферных осадков (Pr) выбирались по метеостанции Екатеринбург [23].

При температуре воздуха выше 0 °C суточное испарение с водной поверхности (E , мм/сутки), согласно [28], рассчитывали по формуле:

$$E=0,82d^{0,8}, \quad (4)$$

где d – средний суточный дефицит влажности воздуха, мм рт. ст.

Средние суточные относительные влажности воздуха выбирались по метеостанции Екатеринбург [23]. Равновесное давление насыщенных водяных паров определялось по психрометрическим таблицам при положительной температуре воздуха над водой, при отрицательной температуре воздуха надо льдом. Средний суточный дефицит влажности воздуха рассчитывали как разность давления насыщенного и парциального давления водяного пара.

Суточную инфильтрацию (I , мм/сутки) в расчетах принимали по [29] с учетом того, что, минимальное значение коэффициента фильтрации для суглинков составляло 5 мм/сутки. Так как степень покрытия снежным покровом территории весной изменялась от 100 через 50 до 0 % [23], то в расчетах коэффициент фильтрации принимали равным 5; 2,5 и 0 мм/сутки соответственно.

Расчет испарившейся за холодный период воды (E , мм/месяц) проводился за каждый месяц по формуле [30]:

$$E=0,37nd, \quad (5)$$

где n – число суток в месяце; d – средний месячный дефицит влажности воздуха, мм рт. ст.

Результаты

Среднемесячные значения основных метеорологических характеристик по метеостанции Екатеринбург за период с 2015 по 2017 гг. представлены в табл. 1. Средняя годовая температура воздуха в Екатеринбурге в 2015, 2016 и 2017 гг. соответственно была 3,6; 3,7 и 3,5 °C, что на 2,4; 2,5 и 2,3 °C выше нормы (средних многолетних значений). Средняя температура воздуха в холодный период 2015–2016 гг. составила –7,6 °C, в холодный период 2016–2017 гг. – –10,3 °C, что соответственно на 3,6 и 0,9 °C выше нормы (табл. 1).

По результатам анализа термического режима приземной атмосферы за холодные периоды 2015–2016 и 2016–2017 гг. положительные аномалии (разница фактического по [23] и среднемноголетнего значения по [24]) средних месячных температур воздуха преобладали над отрицательными, кроме того, положительные аномалии были более значительными.

Осенью 2015 г. первый переход средней суточной температуры воздуха через 0 °C произошел 9 октября, устойчивый переход состоялся 6 ноября, что на 17 дней позже средней многолетней даты. В 2016 г. средняя суточная температура воздуха через 0 °C первый раз перешла 24 февраля. Весной 2016 г. устойчивый переход через 0 °C произошел 25 марта, на 12 дней раньше средней даты [14]. Осенью 2016 г. переход средней суточной температуры воздуха через 0 °C впервые наблюдался 15 октября, а устойчивый переход – 26 октября, что на 6 дней позже средней

даты. В 2017 г. средняя суточная температура воздуха первый раз перешла через 0 °С 21 февраля при трехдневной оттепели. Весной 2017 г. устойчивый переход средней суточной температуры воздуха через 0 °С произошел 6 апреля, что соответствует многолетним наблюдениям [14]. Таким образом, в рассматриваемые холодные периоды наблюдалось позднее установление отрицательных температур осенью и раннее положи-

тельных температур весной по сравнению с многолетними нормами, что косвенно указывает на потепление. Следует отметить, что ранее для Екатеринбурга были выявлены положительные линейные тренды в многолетнем ходе температуры воздуха с максимумом в марте [30]. Преобладание положительных аномалий температуры воздуха в холодный период года свидетельствует о потеплении климата в городе.

Таблица 1. Метеорологические условия в Екатеринбурге в 2015–2017 гг.

Table 1. Meteorological conditions in Yekaterinburg in 2015–2017

Годы Years	Параметр Parameter	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год Year
	Норма t_a Norm t_a , °C	–15,5	–13,6	–6,9	2,7	10,0	15,1	17,2	14,9	9,2	1,2	–6,8	–13,1	1,2
2015	t_a , °C	–11,7	–6,0	–1,9	4,9	13,3	19,5	15,4	13,2	11,4	0,0	–7,4	–7,4	3,6
2016		–15,8	–4,1	–3,5	7,5	13,4	17,6	20,1	23,0	11,1	0,7	–10,5	–15,3	3,7
2017		–13,2	–11,1	–1,6	5,0	10,3	15,5	18,0	17,6	9,5	2,1	–2,5	–7,8	3,5
	Норма V , м/с Norm V , m/s	3,5	3,6	3,8	3,7	3,7	3,4	3,0	2,9	3,4	4,0	4,1	3,6	3,6
2015	V , м/с (m/s)	3,1	3,3	3,2	3,1	1,9	2,4	2,9	2,7	2,2	3,0	2,8	2,7	2,8
2016		2,6	2,7	2,5	2,4	2,3	2,4	2,2	2,0	2,3	2,0	2,6	2,8	2,4
2017		2,6	2,8	3,1	3,8	3,0	2,7	2,0	2,1	2,1	2,4	2,7	2,2	2,6
	Норма $Max V$, м/с Norm $Max V$, m/s	23	25	24	24	22	30	24	30	20	29	22	23	30
2015	$Max V$, м/с (m/s)	18	17	16	18	15	18	20	15	17	19	15	15	20
2016		16	16	22	18	21	18	15	17	19	13	16	15	22
2017		15	17	15	19	21	20	16	12	17	17	14	13	21
	Норма Pr , мм Norm Pr , mm	20	17	20	26	49	69	84	74	45	36	30	27	497
2015	Pr , мм (mm)	19,0	5,1	6,8	40,0	91,0	61,0	120,0	117,0	29,0	72,0	30,0	40,0	630,9
2016		35,0	6,2	21,0	61,0	6,6	45,0	31,0	24,0	57,0	35,0	55,0	26,0	402,8
2017		30,0	14,0	13,0	26,0	36,0	106	107	47	33	32	19	23	486,0
	Норма H сн.п., см Norm H s.c., cm	29,3	36,3	33,3	7	–	–	–	–	–	3	9,7	21	19,9
2015	H сн.п., см/ H s.c., cm	30,4	29,7	16,3	0,4	–	–	–	–	–	1,9	8,8	19,6	15,3
2016		40,7	52,3	45,5	10,8	–	–	–	–	–	2,5	19,4	35,2	29,5
2017		46,4	47,9	35,1	12,3	–	–	–	–	–	2,1	3,2	12,9	22,8
	Норма $Max H$ сн.п., см Norm $Max H$ s.c., cm	72	77	77	65	–	–	–	–	–	32	38	77	77
2015	$Max H$ сн.п., см $Max H$ s.c., cm	37	34	26	1	–	–	–	–	–	7	12	33	37
2016		58	58	51	26	–	–	–	–	–	6	30	39	58
2017		53	49	49	22	–	–	–	–	–	6	10	19	53
	Норма D промерз. гр., м Norm D s.f., m	1,37	1,61	1,72	–	–	–	–	–	–	–	0,60	1,03	1,72
2015	D промерз. гр., м D s.f., m	1,20	1,33	1,37	–	–	–	–	–	–	–	0,63	0,88	1,37
2016		1,27	1,35	1,42	–	–	–	–	–	–	–	0,75	1,17	1,42
2017		1,44	1,63	1,65	–	–	–	–	–	–	–	0,36	0,74	1,65

Примечание: t_a – средняя месячная или годовая температура воздуха, V – средняя месячная или годовая скорость ветра, $Max V$ – максимальный порыв ветра, Нормы метеовеличин – многолетние средние значения по [24] или по [14], Pr – месячные или годовые суммы осадков по осадкомеру с поправками на смачивание, H сн.п. – средняя высота снежного покрова, $Max H$ сн.п. – максимальная высота снежного покрова, D промерз. гр. – глубина промерзания грунта на конец месяца без снежного покрова.

Note: t_a – the average monthly or annual air temperature, V – the average monthly or annual wind velocity, $Max V$ – the maximum gust of wind, the Norms of meteorological elements – long-term average values from [24] or [14], Pr – the monthly or annual amount of precipitation in the precipitation gauge with corrections for wetting, H s.c. – the average depth of snow cover, $Max H$ s.c. – the maximum depth of the snow cover, D s.f. – depth of soil freezing at the end of the month without snow cover.

Годовые суммы осадков в Екатеринбурге в 2016 и 2017 гг. составили соответственно 402,8 и 486 мм [23], что на 94,2 и 11 мм ниже нормы [24]. За период 2015–2017 гг. аномалии месячных сумм осадков были заключены в диапазоне от +43 мм в августе 2015 г. до –53 мм в июле 2016 г. (табл. 1). Ранее в публикации [31] уже был сделан вывод, что незначительные величины линейных трендов, их разнонаправленность и малые

значения коэффициентов детерминации в многолетнем ходе месячных сумм атмосферных осадков на метеостанции Екатеринбург свидетельствуют, скорее всего, о наличии сложных колебаний в многолетнем ходе, чем об однонаправленных изменениях в их режиме.

Осенью 2015 г. первый снежный покров появился 8 октября (на 5 дней раньше средней даты). Временный снежный покров устанавливался 12–15 и 20–27 октября.

Устойчивый снежный покров образовался 30 октября (на 7 дней раньше средней даты). Зимой 2015–2016 гг. наибольшая высота снежного покрова зафиксирована в феврале 2016 г. и составляла 52,3 см, что на 16 см больше нормы. Наибольшие из максимальных высот снежного покрова 58 см были отмечены в конце января – начале февраля 2016 г. В марте 2016 г., к окончанию зимы, средняя высота снежного покрова составляла 45,5 см, что на 12,2 см выше нормы (табл. 1, рисунок). С 7 по 10 марта 2016 г. была отмечена максимальная мартовская высота снежного покрова, которая равнялась 51 см. К 31 марта 2016 г. высота снежного покрова уменьшилась до 33 см, к 1 апреля она ещё уменьшилась до 26 см.

Осенью 2016 г. первый снежный покров был зафиксирован 13 октября (на 5 дней позже, чем осенью

2015 г.). Временный снежный покров устанавливался 14, 16, 18–29 октября (степень покрытия достигала 50 % территории города). Устойчивый снежный покров образовался 30 октября (на 7 дней раньше средней даты и в тот же день, что и осенью 2015 г.). Зимой 2016–2017 гг. наибольшая средняя высота снежного покрова была отмечена в феврале 2017 г. и равнялась 47,9 см, что на 11,6 см выше нормы. А наибольшая из максимальных высот снежного покрова наблюдалась 9 января 2017 г. и составила 53 см. В марте 2017 г., к окончанию зимы 2016–2017 гг., средняя высота снежного покрова составляла 35,1 см, что на 1,8 см выше нормы и на 10,4 см меньше, чем в конце зимы 2015–2016 гг. (табл. 1, рисунок). 31 марта 2017 г. высота снежного покрова была 22 см.

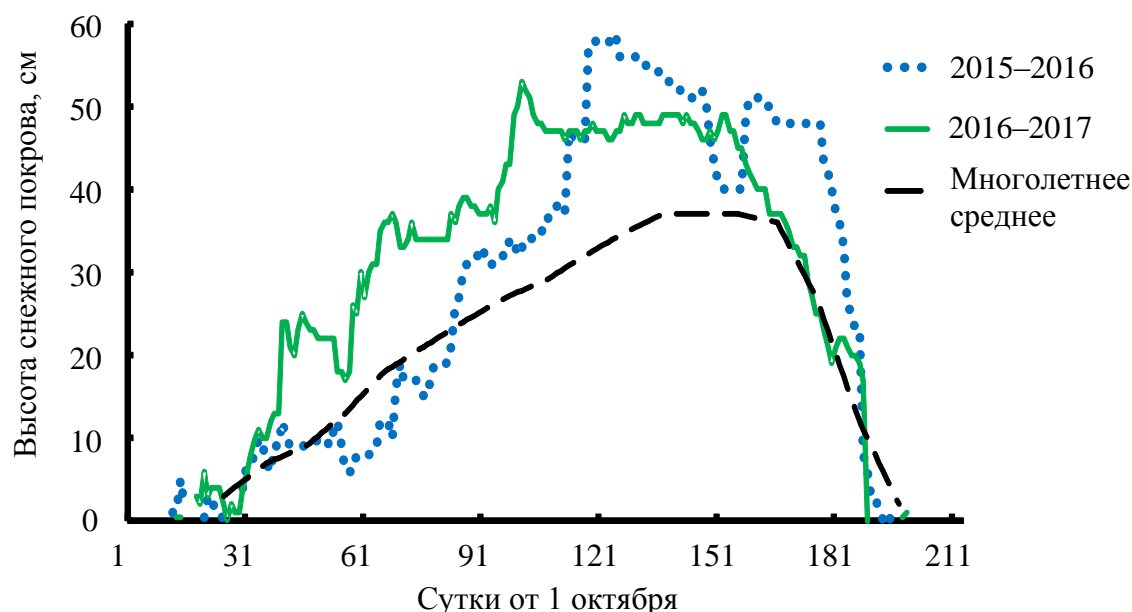


Рисунок. Динамика высоты снежного покрова в холодный период 2015–2016 гг., 2016–2017 гг. и многолетних средних высот снежного покрова за холодный период [24]

Figure. Dynamics of snow depth in cold period of 2015–2016, in cold period of 2016–2017 and perennial average snow depth for cold period [24]

За холодный период 2015–2016 гг. накоплено 132,2 мм осадков, а за холодный период 2016–2017 годов – 138 мм, что соответственно на 18,2 и 24 мм выше нормы. В холодный период 2015–2016 гг. с поверхности снега испарилось 31 мм выпавших осадков, а за холодный период 2016–2017 гг. – 34,2 мм. Таким образом, за холодный период 2015–2016 гг. в снежном покрове накоплен запас воды 101,2 мм, а за холодный период 2015–2016 гг. – на 2,6 мм больше, т. е. 103,8 мм.

Весной 2016 г. устойчивый снежный покров разрушился 5 апреля (на 3 дня раньше средней даты), а последний снежный покров был отмечен 11 апреля (на 15 дней раньше средней даты). За холодный период 2015–2016 гг. было отмечено 158 дней с устойчивым снежным покровом, что на 5 дней больше климатической нормы. Весной 2016 г. интенсивное кругло-суточное снеготаяние при средних суточных температурах воздуха выше 0 °С продолжалось 18 суток – с 25 марта по 11 апреля. Сумма средних суточных тем-

ператур воздуха за период интенсивного снеготаяния составила +55,9 °С. Днем снеготаяние было менее интенсивным, оно наблюдалось при максимальных температурах воздуха выше 0 °С и продолжалось 6 дней: с 9 по 12 марта, 19 марта и 24 марта. Сумма максимальных температур воздуха за период дневного снеготаяния была равна +23,0 °С. Весной 2016 г. в период активного снеготаяния с 1 по 11 апреля за 5 дней в виде мокрого снега, дождя и ливневого дождя выпало 25 мм осадков.

Весной 2017 г. устойчивый снежный покров разрушился 7 апреля (на 1 день раньше средней даты и на 2 дня позже весны 2016 г.). За холодный период 2016–2017 гг. было 163 дня с устойчивым снежным покровом, что на 10 дней больше многолетнего среднего значения. Временный снежный покров наблюдался 9, 11, 16–17 апреля. Последний снежный покров был отмечен 17 апреля (на 9 дней раньше средней даты и на 6 дней позже весны 2016 г.). Весной 2017 г. интен-

сивное круглосуточное снеготаяние продолжалось 9 суток: с 4 по 7, с 25 по 27 и 29 марта, 6 апреля. Сумма средних суточных температур воздуха за период интенсивного снеготаяния была +9,5 °С, что на 46,4 °С меньше, чем весной 2016 г. Дневное снеготаяние продолжалось 32 дня: с 2 по 30 марта, с 3 по 5 апреля. Сумма максимальных температур воздуха за период дневного снеготаяния составила +104,0 °С, что на 81 °С больше, чем весной 2016 г. В период с 1 по 11 апреля был отмечен 1 день с незначительным количеством осадков – 1,2 мм в виде снега, что гораздо меньше (на 23,8 мм), чем в 2016 г.

Весна 2016 г. была дружной, (стремительной, бурной), интенсивное круглосуточное снеготаяние продолжалось 18 суток – с 25 марта по 11 апреля. Средние суточные температуры воздуха поднимались до +1,1 +7,5 °С, снег таял круглосуточно с интенсивностью от 1,5 до 61,5 мм/сутки. Дневное снеготаяние отмечалось 6 дней: с 9 по 12 марта, 19 и 24 марта, когда максимальная температура воздуха поднималась до +1,7 +7,2, +3,4 и +5,2 °С соответственно. Процесс снеготаяния был достаточно интенсивным. Расчеты суточных величин снеготаяния и поверхностного стока показали, что снежный покров, эквивалентный накопленному за холодный период 2015–2016 гг. запасу воды 101,2 мм, на открытых площадках и газонах растаял полностью 3–4 апреля, а в лесопарках, на затененных площадках и газонах – 13–14 апреля 2016 г. Весной 2016 г. суточные значения поверхностного стока варьировались в диапазоне 0,4–21,3 мм. На открытых площадках и газонах к 3–4 апреля суммарный поверхностный сток за счет

атмосферных осадков увеличился до 102,3–123,7 мм. В лесопарках, на затененных площадках и газонах к 13–14 апреля вследствие влияния атмосферных осадков, испарения и фильтрации суммарный поверхностный сток находился в диапазоне 79,6–91,8 мм (табл. 2).

Весна 2017 г. не была такой дружной, и снеготаяние происходило иначе, чем весной 2016 г. В периоды потеплений при вторжениях теплых воздушных масс средние суточные температуры воздуха поднимались до +0,3–+2,7 °С. Вследствие чего в течение 9 суток с 4 по 7 марта, с 25 по 27 марта, 29 марта и 6 апреля 2017 г. снег таял круглосуточно с интенсивностью от 0,4 до 43,5 мм/сутки. Круглосуточное снеготаяние весной 2017 г. сменялось периодами похолодания (1–3, 8–24, 28 марта, с 30 марта по 5 апреля). Основной объем снега растаял днем. Дневное снеготаяние продолжалось 32 дня и происходило в два этапа – с 2 по 30 марта и с 3 по 5 апреля, когда максимальная температура воздуха поднималась до +1,7 +7,2, +3,4 и +5,2 °С соответственно. По проведенным расчетам снежный покров, эквивалентный накопленному за холодный период 2016–2017 гг. запасу воды 103,8 мм, полностью растаял на открытых газонах и площадках 7–8 апреля, в лесопарках и на затененных газонах и площадках – 14–15 апреля. В весенний сезон 2017 г. суточные значения поверхностного стока варьировались в диапазоне от –0,9 (снеготаяние меньше испарения) до 35,2 мм. На открытых площадках и газонах к 7–8 апреля суммарный поверхностный сток был равен 30,6–38,6 мм. В лесопарках, на затененных площадках и газонах к 14–15 апреля суммарный поверхностный сток варьировался от 63,7 до 98,9 мм (табл. 3).

Таблица 2. Снеготаяние, осадки, испарение, фильтрация и поверхностный сток (SM, Pr, E, I и SR, мм/сутки), суммарное снеготаяние и суммарный поверхностный сток (ΣSM и ΣSR, мм) в марте–апреле 2016 г.

Table 2. Snowmelt, precipitation, evaporation, infiltration and surface runoff (SM, Pr, E, I and SR, mm / day), total snowmelt and total surface runoff (ΣSM and ΣSR, mm) in March–April 2016

Месяц/Month	Март/March							Апрель/April													
Даты/Dates	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SM (лесопарк, затененные газоны и площадки, a=1,4) (forest park, shaded lawns and sites, a=1,4)	1,5	2,4	2,4	2,7	2,7	3,4	3,2	1,7	2,5	5,3	6,3	5,9	2,4	4,5	6,0	7,6	10,5	7,4	6,0	8,5	17,2
ΣSM	1,5	3,9	6,3	9,0	11,6	15,0	18,2	19,9	22,4	27,7	34,0	39,9	42,3	46,8	52,8	60,3	70,8	78,3	84,3	92,8	110,0
SM (открытые газоны и площадки, a=5) (open lawns and sites, a=5)	5,5	8,5	8,5	9,5	9,5	12,0	11,5	6,0	9,0	19,0	22,5	21,0	8,5	16,0	21,5	27,0	37,5	26,5	21,5	30,5	61,5
ΣSM	5,5	14,0	22,5	32,0	41,5	53,5	65,0	71,0	80,0	99,0	121,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Pr	–	2,0	4,0	0,1	0,0	–	–	0,0	5,0	0,0	–	7,0	5,9	0,0	–	–	1,1	6,0	0,5	–	–
E	1,1	0,4	0,4	0,4	0,9	1,2	1,2	0,9	0,5	0,9	1,2	0,4	0,4	1,4	1,5	1,6	1,1	0,7	1,3	–	–
I	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	5	5	5
SR (лесопарк, затененные газоны и площадки, a=1,4) (forest park, shaded lawns and sites, a=1,4)	0,4	3,9	6,0	2,4	1,8	2,2	2,0	0,8	7,0	4,4	5,1	10,0	5,3	0,6	2,0	3,5	8,0	10,2	0,2	3,5	12,2
ΣSR	0,4	4,3	10,4	12,8	14,6	16,7	18,8	19,6	26,6	31,1	36,2	46,2	51,5	52,1	54,1	57,6	65,6	75,8	76,0	79,6	91,8
SR (открытые газоны и площадки, a=5) (open lawns and sites, a=5)	4,4	10,1	12,1	9,2	8,6	10,8	10,3	5,1	13,5	18,1	21,3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
ΣSR	4,4	14,4	26,6	35,8	44,4	55,3	65,6	70,7	84,2	102,3	123,7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблица 3. Снеготаяние, осадки, испарение, фильтрация и поверхностный сток (SM , Pr , E , I и SR , мм/сутки), суммарное снеготаяние и суммарный поверхностный сток (ΣSM и ΣSR , мм) в марте–апреле 2017 г.

Table 3. Snowmelt, precipitation, evaporation, infiltration and surface runoff (SM , Pr , E , I and SR , mm / day), total snowmelt and total surface runoff (ΣSM and ΣSR , mm) in March–April 2017

Месяц/Month	Март/March								Апрель/April									
Даты/Dates	4	5	6	7	25	26	27	29	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SM (лесопарк, затененные газоны и площадки, a=1,4) (forest park, shaded lawns and sites, a=1,4)	3,4	0,6	1,5	0,7	1,3	0,7	0,4	1,0	3,8	9,2	12,2	11,8	9,1	8,7	13,0	9,4	9,5	8,8
Σ SM	3,4	4,0	5,5	6,2	7,5	8,2	8,6	9,6	13,4	22,6	34,8	46,6	55,7	64,4	77,4	86,8	96,3	105,1
SM (открытые газоны и площадки, a=5) (open lawns and sites, a= 5)	12,0	2,0	5,5	2,5	4,5	2,5	1,5	3,5	13,5	33,0	43,5	–	–	–	–	–	–	–
Σ SM	12,0	14,0	19,5	22,0	26,5	29,0	30,5	34,0	47,5	80,5	124,0	–	–	–	–	–	–	–
Pr	–	0,0	–	0,0	0,0	1,0	0,0	0,3	0,0	0,0	–	–	0,0	–	–	0,0	–	5,1
E	1,4	1,5	1,2	0,8	1,2	1,0	1,4	1,1	1,3	2,3	3,3	3,0	2,5	2,5	2,9	2,1	2,4	1,0
I	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2,5	–	2,5	–	–	2,5	2,5
SR (лесопарк, затененные газоны и площадки, a=1,4) (forest park, shaded lawns and sites, a=1,4)	2,0	–0,9	0,3	–0,1	0,1	0,7	–0,9	0,2	2,5	2,0	3,9	6,3	1,6	3,7	5,1	2,3	2,1	7,9
Σ SR	2,0	1,1	1,4	1,3	1,4	2,1	1,2	1,4	3,8	5,7	9,6	15,9	17,5	21,2	26,2	28,5	30,6	38,6
SR (открытые газоны и площадки, a=5) (open lawns and sites, a=5)	10,6	0,5	4,3	1,7	3,3	2,5	0,1	2,7	12,2	25,7	35,2	–	–	–	–	–	–	–
Σ SR	10,6	11,1	15,4	17,1	20,4	22,9	23,0	25,7	38,0	63,7	98,9	–	–	–	–	–	–	–

Весной 2016 г. в лесопарках, на затененных газонах и площадках суммарный поверхностный сток за весь период снеготаяния составил 79,6–91,8 мм, на открытых газонах и площадках – 102,3–123,7 мм. В весенний сезон 2017 г. этот показатель был равен 30,6–38,6 и 63,7–98,9 мм, что соответственно на 49–53,2 и 24,8–38,6 мм меньше, чем весной 2016 г. К тому же поэтапно-прерывистый характер снеготаяния весной 2017 г. не способствовал формированию значительных суточных и суммарных объемов поверхностного стока и стока наносов.

В Екатеринбурге к концу зимы 2015–2016 гг. грунт без снежного покрова промерз на глубину 1,42 м (на 30 см меньше нормы, рассчитанной по [24]), а к концу более суровой зимы 2016–2017 годов – на глубину 1,65 м (на 7 см меньше нормы), что на 17 см больше, чем в 2016 г. С учетом фактической высоты снежного покрова к концу зимы 2015–2016 гг. глубина промерзания составила 30 см, а концу зимы 2016–2017 гг. – 60 см, т. е. на 30 см больше, чем в марте 2016 г. (табл. 1).

Весной 2016 г. оттаивание грунта началось после схода снежного покрова, т. е. с 12 апреля. На 12 см грунт оттаял 15 апреля, а полностью – 17 мая. Весной 2017 г. оттаивание грунта началось раньше на 5 дней – с 7 апреля. Вследствие похолодания и установления временного снежного покрова 9, 11, 16 и 17 апреля 2017 г. оттаивание грунта прекращалось. На 12 см грунт оттаял 12 апреля, на 28 см – 15 апреля, а полностью – 21 мая. С 18 мая, когда в обе весны временный снежный покров больше не устанавливался, разница оттаявшего грунта в 2017 и 2016 гг. составила 4 см. Всё это способствовало более интенсивной фильтрации талых вод в грунты в период после активного снеготаяния и вело к образованию меньшего количества грязевого осадка в апреле 2017 г., чем в апреле 2016 г.

Заключение

Проанализировано влияние метеорологических условий холодных периодов 2015–2016 и 2016–2017 гг. и весенних сезонов 2016 и 2017 гг. на формирование поверхностного стока в период весеннего снеготаяния в городе Екатеринбурге. При анализе учитывались термический режим приземной атмосферы, атмосферные осадки, характеристики снежного покрова, снеготаяния, промерзания и оттаивания грунтов. Показано, что следующие метеорологические параметры являлись определяющими при формировании поверхностного стока наносов и накопления грязевого осадка в период таяния снега:

- запас воды в снежном покрове к началу снеготаяния;
- количество дней дневного снеготаяния;
- количество суток круглосуточного снеготаяния;
- сумма положительных температур за период снеготаяния;
- непрерывность или эпизодичность снеготаяния;
- возвраты холодов;
- атмосферные осадки в период снеготаяния.

Проведенный анализ показал, что сложившиеся метеорологические условия снеготаяния в рассматриваемые периоды могли привести к формированию различных суточных и суммарных объемов поверхностного стока талых вод и стока наносов. Несмотря на накопление примерно одинакового количества атмосферных осадков в снежном покрове за каждый из холодных периодов, специфика погодных условий весной 2016 г. была более благоприятной для формирования интенсивного поверхностного стока наносов, что соответствует качественным результатам наблюдения накопления грязевого осадка. Факторами, определившими образование больших суточных объемов поверхностного стока в весенний сезон 2016 г., явились: значительный запас воды, накопленный в снежном покрове за холодный период, дружная весна и интенсивное снеготаяние, не прерываемое похоло-

даниями, дополнительные атмосферные осадки в период снеготаяния и медленное оттаивание грунта.

Таким образом, сравнение характеристик весеннего снеготаяния и наблюдение образования грязевого осадка в различные периоды показало, что наряду с накоплением твердого осадка существенную роль в

формировании поверхностного стока наносов в современной урбанизированной среде играют метеорологические условия.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-77-10024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Taylor K. Urban environments. *Environmental Sedimentology* / Eds. Perry C., K. Taylor. – New Jersey: Wiley-Blackwell, 2007. – P. 190–222.
2. Taylor K.G., Owens P.N. Sediments in urban river basins: a review of sediment-contaminant dynamics in an environmental system conditioned by human activities // *Journal of Soils and Sediments*. – 2009. – V. 9 (4). – P. 281–303.
3. Challenges of the «Anthropocene» / A. Chin, T. Beach, S. Luzzadder-Beach, W.D. Solecki // *Anthropocene*. – 2017. – V. 20. – P. 1–3.
4. Russell K.L., Vietz G.J., Fletcher T.D. Global sediment yields from urban and urbanizing watersheds // *Earth-Science Reviews*. – 2017. – V. 168. – P. 73–80.
5. Селезнев А.А. Тяжелые металлы в поверхностном грязевом осадке города Екатеринбурга // *Известия Уральского государственного горного университета*. – 2018. – № 1 (49). – С. 46–54.
6. Seleznev A.A., Yarmoshenko I.V., Sergeev A.P. Method for reconstructing the initial baseline relationship between potentially harmful element and conservative element concentrations in urban puddle sediment // *Geoderma*. – 2018. – V. 326. – P. 1–7.
7. US EPA 833-B-09-002. Developing your stormwater pollution prevention plan: a guide for industrial operators. – Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2009. – 42 p.
8. An index to quantify street cleanliness: the case of Granada (Spain) / A. Sevilla, M.L. Rodríguez, A. García-Maraver, M. Zamorano // *Waste Management*. – 2013. – V. 33 (5). – P. 1037–1046.
9. Continental-scale pollution of estuaries with antibiotic resistance genes / Y.G. Zhu, Y. Zhao, B. Li, C.L. Huang, S.Y. Zhang, S. Yu, Y.S. Chen, T. Zhang, M.R. Gillings, J.Q. Su // *Nat Microbiol*. – 2017. – V. 2:16270. – P. 1–7.
10. Tracing the sources of suspended sediment and particle-bound trace metal elements in an urban catchment coupling elemental and isotopic geochemistry, and fallout radionuclides / C. Froger, S. Ayrault, O. Evrard, G. Monvoisin, L. Bordier, I. Lefèvre, C. Quantin // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2018. – V. 25 (28). – P. 28667–28681.
11. Seleznev A., Rudakov M. Some geochemical characteristics of puddle sediments from cities located in various geological, geographic, climatic and industrial zones // *Carpathian J of Earth and Env Sci*. – 2019. – V. 14 (1). – P. 95–106.
12. Сагт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
13. Оценка запасов современных пылегрязевых отложений на урбанизированной территории (на примере г. Екатеринбурга) / А.А. Селезнев, И.В. Ярмошенко, Г.П. Малиновский, Е.М. Баглаева // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. – 2018. – № 3 (23). – С. 74–85.
14. Климат Свердловска / под ред. В.В. Морокова, Ц.А. Швер. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 190 с.
15. Капустин В.Г., Корнев И.Н. География Свердловской области. – Екатеринбург: Изд-во «Сократ», 2006. – 400 с.
16. Алисов Б.П. Климат СССР. – М.: Изд-во МГУ, 1956. – 127 с.
17. Григорьев А.А., Будыко М.И. Классификация климатов СССР // *Известия АН СССР. Сер. геогр.* – 1959. – № 3. – С. 3–19.
18. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 568 с.
19. Справочник по климату СССР. Вып. 9. История и физико-географическое описание метеорологических станций и постов. – Свердловск: Фотоофсетная лаборатория Уральского УГМС, 1966. – 392 с.
20. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь / под ред. А.И. Бедрицкого. Т. 1. – СПб.: Лет. сад, 2008. – 332 с.
21. Швер Ц.А. Осадки на территории СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 302 с.
22. Топ-50 городов по объему парка легковых автомобилей. URL: <http://avtosreda.ru/news-common/Bolee55avtoparkaRossiiniomarki/> (дата обращения: 22.02.2019).
23. Архив погоды в Екатеринбурге. URL: http://rp5.ru/archive.php?wmo_id=28440 (даты обращения: 22.02.2019).
24. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Ч. 1–6. Вып. 9. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 557 с.
25. Жустарёва Е.В., Фотиади А.А., Бочкарев В.И. Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Технологические процессы в строительстве». – М.: МАДИ, 2015. – 48 с.
26. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д. Общая гидрология. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 368 с.
27. Жидиков А.П., Нечаева Н.С. Методические указания по разработке схем краткосрочных прогнозов расхода воды рек и протока воды в водохранилища в период половодья на основе моделей талого стока (на примере бассейна р. Волги) / под ред. к.т.н. В.А. Бельчикова. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 72 с.
28. Чеботарев А.И. Гидрологический словарь. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 308 с.
29. Грунтоведение / под ред. В.Т.Трофимова. 6-е изд. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 1024 с.
30. Общая гидрология (гидрология суши) / Б.Б. Богословский, А.А. Самохин, К.Е. Иванов, Д.П. Соколов. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 423 с.
31. Тетерин А.Ф. Изменения основных характеристик климата на Урале за период инструментальных наблюдений // *Вестник Уральского отделения РАН*. – 2013. – № 3 (45). – С. 44–55.

Поступила 19.11.2019 г.

Информация об авторах

Селезнев А.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории урбанизированной среды Института промышленной экологии Уральского отделения РАН; доцент кафедры безопасности жизнедеятельности ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Тетерин А.Ф., кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории урбанизированной среды Института промышленной экологии Уральского отделения РАН.

Ярмошенко И.В., кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией урбанизированной среды Института промышленной экологии Уральского отделения РАН.

UDK 551.582:551.584:550.42:502.175

METEOROLOGICAL CONDITIONS OF SURFACE SEDIMENT RUNOFF FORMATION DURING SPRING SNOWMELT IN URBAN ENVIRONMENT

Andrian A. Seleznev^{1,2},
sandrian@rambler.ru

Alexander F. Teterin¹,
taf@ecko.uran.ru

Iliia V. Yarmoshenko¹,
ivy@ecko.uran.ru

¹ Institute of Industrial Ecology of Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
20, S. Kovalevskaya street, Yekaterinburg, 620219, Russia.

² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira street, Yekaterinburg, 620002, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to study sedimentation in urbanized area, which reduces the quality of urban environment and has negative effect on ecological situation.

The main aim of the research is to analyze the meteorological conditions of surface sediment runoff formation in a large city during the intense spring snowmelt.

Objects of the research is the urbanized area of the city of Yekaterinburg.

Methods: study of meteorological conditions for the cold periods of 2015–2016 and 2016–2017, as well as in the spring seasons of 2016 and 2017; assess the features and differences of meteorological parameters and processes that had a major impact on the sediment runoff in the spring of 2016 and 2017.

Results. The meteorological conditions of the cold periods 2015–2016 and 2016–2017 and the spring seasons 2016 and 2017 were reconstructed. Meteorological parameters and processes that had a significant impact on the sediment runoff in the urban area such as thermal regime of ground air, precipitation, snow cover, snowmelt, and freezing and thawing of soils were studied. The significant difference between meteorological conditions of the spring of 2016 and 2017 was found, that reflected in sedimentation and formation of more intense mud deposition in 2016. The following factors appear to be crucial for formation of surface sediment runoff in the urban environment in spring: water accumulated in the snow cover during the cold period of the year, characteristics of the thermal regime during snowmelt (duration, cold returns), precipitation and soil thawing intensity during the snowmelt. The results obtained can be used in planning the measures to improve the environmental situation in the urban areas.

Key words:

Urban environment, sedimentogenesis, meteorological conditions, snowmelt, surface runoff, mud sediment, Yekaterinburg.

The research was carried out on account of grant of Russian Scientific Foundation (project no. 18-77-10024).

REFERENCES

1. Taylor K. Urban environments. *Environmental Sedimentology*. Eds. C. Perry, K. Taylor. New Jersey, Wiley-Blackwell. 2007. pp. 190–222.
2. Taylor K.G., Owens P.N. Sediments in urban river basins: a review of sediment–contaminant dynamics in an environmental system conditioned by human activities. *Journal of Soils and Sediments*, 2009, vol. 9 (4), pp. 281–303.
3. Chin A. Urban transformation of river landscapes in a global context. *Geomorphology*, 2006, vol. 79 (3–4), pp. 460–487.
4. Russell K.L., Vietz G.J., Fletcher T.D. Global sediment yields from urban and urbanizing watersheds. *Earth-Science Reviews*, 2017, vol. 168, pp. 73–80.
5. Seleznev A.A. Heavy metals in surface mud sediment in Ekaterinburg (Russia). *News of the Ural State Mining University*, 2018, no. 1 (49), pp. 46–54. In Russ.
6. Seleznev A.A., Yarmoshenko I.V., Sergeev A.P. Method for reconstructing the initial baseline relationship between potentially harmful element and conservative element concentrations in urban puddle sediment. *Geoderma*, 2018, vol. 326, pp. 1–7.
7. US EPA 833-B-09-002. *Developing your stormwater pollution prevention plan: a guide for industrial operators*. Washington, DC, United States Environmental Protection Agency, 2009. 42 p.
8. Sevilla A., Rodríguez M.L., García-Maraver A., Zamorano M. An index to quantify street cleanliness: The case of Granada (Spain). *Waste Management*, 2013, vol. 33 (5), pp. 1037–1046.
9. Zhu Y.G., Zhao Y., Li B., Huang C.L., Zhang S.Y., Yu S., Chen Y.S., Zhang T., Gillings M.R., Su J.Q. Continental-scale pollution of estuaries with antibiotic resistance genes. *Nat Microbiol*, 2017, vol. 2:16270, pp. 1–7.
10. Froger C., Ayrault S., Evrard O., Monvoisin G., Bordier L., Lefèvre I., Quantin C. Tracing the sources of suspended sediment and particle-bound trace metal elements in an urban catchment coupling elemental and isotopic geochemistry, and fallout radionuclides. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, vol. 25 (28), pp. 28667–28681.
11. Seleznev A., Rudakov M. Some geochemical characteristics of puddle sediments from cities located in various geological, geographic, climatic and industrial zones. *Carpathian J of Earth and Env. Sci.*, 2019, vol. 14 (1), pp. 95–106.
12. Saet Yu.E. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Environmental geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.
13. Seleznev A.A., Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P., Baglaeva E.M. Total amount of contemporary dirt and dust sediments in an urban environment (on the example of Ekaterinburg, Russia). *Biosphere compatibility: human, region, technologies*, 2018, no. 3 (23), pp. 74–85.
14. *Klimat Sverdlovsk* [Climate of Sverdlovsk]. Eds. V.V. Morokov, C.A. Shver. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1981. 190 p.
15. Kapustin V.G., Kornev I.N. *Geografiya Sverdlovskoy oblasti* [Geography of Sverdlovsk oblast]. Ekaterinburg, Sokrat Publ., 2006. 400 p.

16. Alisov B.P. *Klimat SSSR* [Climate of the USSR]. Moscow, MGU Publ., 1956. 127 p.
17. Grigorev A.A., Budyko M.I. Klassifikatsiya klimatov SSSR [Classification of climates in the USSR]. *Izvestiya AN SSSR. Ser. geogr.*, 1959, no. 3, pp. 3–19.
18. Khromov S.P., Mamontova L.I. *Meteorologicheskii slovar* [Meteorological dictionary]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 568 p.
19. *Spravochnik po klimatu SSSR. Vypusk 9. Istoriya i fiziko-geograficheskoe opisanie meteorologicheskikh stantsiy i postov* [Guide to the climate of the USSR. Iss. 9. History and physiographic description of meteorological stations and posts]. Sverdlovsk, Fotoofsetnaya laboratoriya Uralskogo UGMS Publ., 1966. 392 p.
20. *Rossiyskiy gidrometeorologicheskii entsiklopedicheskii slovar* [Russian hydrometeorological encyclopedic dictionary]. Ed. by A.I. Bedritsky. St-Petersburg, Let. Sad Publ., 2008. Vol. 1, 332 p.
21. Shver C.A. *Osadki na territorii SSSR* [Precipitation in the USSR]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976. 302 p.
22. *Top-50 gorodov po obemu parka legkovykh avtomobiley* [Top 50 cities by car park]. Available at: <http://avtosreda.ru/news-common/Bolee55avtoparkaRossiiniinomarki/> (accessed 22 February 2019).
23. *Arkhiv pogody v Ekaterinburge* [Ekaterinburg weather archive]. Available at: http://rp5.ru/archive.php?wmo_id=28440 (accessed 22 February 2019).
24. *Nauchno-prikladnyy spravochnik po klimatu SSSR* [Applied handbook on the USSR climate]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990. Ser. 3, P. 1–6, Iss. 9, 557 p.
25. Zhustaryova E.V., Fotiadi A.A., Bochkarev V.I. *Metodicheskie ukazaniya k prakticheskim zanyatiyam po distsipline «Tekhnologicheskie protsessy v stroitelstve»* [Guidelines for practical classes on the discipline «Technological processes in construction»]. Moscow, MADI Publ., 2015. 48 p.
26. Mikhaylov V.N., Dobrovolskiy A.D. *Obshchaya gidrologiya* [General hydrology]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991. 368 p.
27. Zhidikov A.P., Nechaeva N.S. *Metodicheskie ukazaniya po razrabotke skhem kratkosrochnykh prognozov raskhoda vody rek i protoka vody v vodokhranilishcha v period polovodya na osnove modeley talogo stoka (na primere basseyna r. Volgi)* [Guidelines for development of schemes for short-term forecasts of river flow and water flow in reservoirs during the flood period based on models of thawed snow (using the Volga river basin as an example)]. Ed. by V.A. Belchikov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1982. 72 p.
28. Chebotarev A.I. *Gidrologicheskii slovar* [Hydrological dictionary]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1978. 308 p.
29. *Gruntovedenie* [Soil science]. Ed. by V.T. Trofimov. Moscow, MGU Publ., 2005. 1024 p.
30. Bogoslovskiy B.B., Samokhin A.A., Ivanov K.E., Sokolov D.P. *Obshchaya gidrologiya (gidrologiya sushii)* [General hydrology (land hydrology)]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1984. 423 p.
31. Teterin A.F. *Izmeneniya osnovnykh kharakteristik klimata na Urale za period instrumentalnykh nablyudeniy* [Changes in the main characteristics of the climate in the Urals over the period of instrumental observations]. *Vestnik Uralskogo otdeleniya RAN*, 2013, no. 3 (45), pp. 44–55.

Received: 19 November 2019.

Information about the authors

Andrian A. Seleznev, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Industrial Ecology of Ural Branch of Russian Academy of Sciences; associate professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Alexander F. Teterin, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Industrial Ecology of Ural Branch of Russian Academy of Sciences.

Ilia V. Yarmoshenko, Cand. Sc., head of laboratory, Institute of Industrial Ecology of Ural Branch of Russian Academy of Sciences.

УДК 550.422:546.7:504.064(571.16)

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ И РАДИОАКТИВНЫЕ (Th, U) ЭЛЕМЕНТЫ В КОМПОНЕНТАХ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ НА ТЕРРИТОРИИ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Барановская Наталья Владимировна¹,
nata@tpu.ru

Агеева Елена Владимировна¹,
ev_ageeva@mail.ru

Соктоев Булат Ринчинович¹,
bulatsoktoev@tpu.ru

Наркович Дина Владимировна¹,
shvezova_d@mail.ru

Денисова Ольга Александровна²,
oadeni@yandex.ru

Матковская Тамара Васильевна²,
matkovskay@inbox.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Сибирский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации,
Россия, 634050, г. Томск, Московский тракт 2.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью рассмотрения взаимосвязей радиоактивных и редкоземельных элементов с точки зрения их высокой индикаторной роли в комплексе компонентов природной среды на локальных территориях, характеризующихся различными природно-техногенными условиями и условиями районирования территории с учетом биогеохимических показателей.

Цель: рассмотрение взаимосвязей радиоактивных и редкоземельных элементов в комплексе компонентов природной среды на территории Томской области, характеризующейся различными природно-техногенными обстановками.

Методы: основной метод исследования – инструментальный нейтронно-активационный анализ, который осуществлялся на базе исследовательского ядерного реактора Национального исследовательского Томского политехнического университета. Определено содержание двух радиоактивных – тория и урана, а также семи редкоземельных (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) элементов.

Результаты. Оценено содержание редкоземельных и радиоактивных элементов в четырех параллельно отобранных и изученных компонентах природной среды на территории Томской области: почва, солевые отложения природных пресных вод (накись), волосы и кровь человека. Содержание изученных элементов максимально для почв и накали и значительно ниже в биосубстратах человека. Волосы и кровь человека как живые ткани характеризуются резким цериевым минимумом. В крови выявлен иттербиевый максимум, вероятно, связанный с нахождением этого элемента в виде металлоорганических комплексов. Исследованы соотношения химических элементов, которые можно использовать в качестве индикаторов природно-техногенных обстановок. Проведено районирование Томской области по междуречьям бассейна реки Обь по частоте встречаемости аномальных содержаний редкоземельных и радиоактивных элементов во всех изученных компонентах.

Ключевые слова:

Редкоземельные и радиоактивные элементы, компоненты природной среды, индикаторные показатели, соотношения элементов, Томская область, биогеохимическое районирование территории.

Введение

К редкоземельным элементам (РЗЭ, в англоязычной литературе REE), или лантаноидам, относятся 15 элементов периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева, которые по ряду свойств (строение атомов, физико-химические, геохимические и другие) делятся на три группы (легкие (light – LREE), средние (medium – MREE), тяжелые (heavy – HREE)) [1].

Несмотря на термин «редкоземельные», их среднее содержание в верхней части литосферы составляет 0,015 %. Например, Ce по распространенности превосходит Cu и Pb. Все остальные РЗЭ, кроме Pm,

более распространены, чем Ag или Hg [2], а самые редкие элементы из этой группы (Lu и Tm) – Cd и Se [3]. Наименее распространенным является Lu, содержание которого в земной коре составляет 0,5 г/т, что значительно выше содержания Au (0,0031 г/т) [4]. В целом распределение данной группы элементов в природе подчиняется правилу Оддо–Гаркинса [5, 6].

Повышенный интерес к изучению РЗЭ в окружающей среде связан с вступлением современного мира в «век нанотехнологии» [7], особенностью которого является широкое использование данной группы химических элементов в передовых промышленных областях (электроника, оптика, автомобилестроение и

другие), сельском хозяйстве (удобрения и пестициды) и медицине (магнитно-резонансная томография) [8, 9]. Производство РЗЭ увеличилось с 30 тысяч т (1980 г.) до 150 тысяч т (2010 г.) [9]. На сегодняшний день крупнейшим производителем и экспортером РЗЭ в мире является Китай, занимая практически 100 % рынка [10]. Крупнейшим по запасам и добыче в Китае является REE-Nb-Fe месторождение Баян Обо (автономный район Внутренней Монголии). Запасы РЗЭ в Китае составляют около 55 млн т против 110 млн т во всем остальном мире [11]. Вопросы содержания РЗЭ в окружающей среде рассматриваются учеными многих стран мира [3, 12–18]. Крупномасштабная эксплуатация и активное использование РЗЭ неизбежно приводят к увеличению их концентрации в окружающей среде и, как следствие, в живых организмах, в том числе в организме человека.

Первые сведения о содержании отдельных РЗЭ в живых организмах относятся к работам начала прошлого столетия. Исследования, касающиеся закономерностей поведения и оценки содержаний всей группы лантаноидов, не так многочисленны. Из работ российских ученых стоит отметить обзор медико-биологических свойств и распространенности РЗЭ в горных породах и водах минерализованных источников [19], а также научные исследования по изучению фосфатных и карбонатных биоминеральных образований [20]. Наиболее изучены закономерности поведения РЗЭ в геологических объектах [21–23].

РЗЭ имеет значительное сродство к естественным радиоактивным элементам: Th и U – наиболее распространенным членам семейства актиноидов. U встречается в двух степенях окисления: +4 и +6, в то время как Th – +4. При этом только U^{+4} и Th^{+4} наиболее близки по геохимическим свойствам к РЗЭ: размерам их ионных радиусов и кислотно-щелочным свойствам. За счет этого возможен изоморфизм данных элементов между собой: U^{4+} тяготеет к тяжелым РЗЭ, Th^{4+} – к легким РЗЭ [24–27].

По данным разных авторов кларк U в земной коре составляет $2,3\text{--}3\cdot 10^{-4}$ %, а Th – $1,3\cdot 10^{-3}\text{--}8,1\cdot 10^{-4}$ %. В почвах их содержания оцениваются в $5\cdot 10^{-4}$ % и $6\cdot 10^{-4}$ %, соответственно [28, 29].

Для живых организмов характерны очень низкие показатели накопления U и Th: их содержания не превышают 10^{-5} %. Первые количественные характеристики Th и U в живых организмах представлены в работах А.П. Виноградова [30], Дж. Хоффмана [31–33] и других. Содержание U в ежегодном приросте растительности по данным В.В. Добровольского [34] составляет $4\cdot 10^{-5}$ % золы, что существенно ниже его кларка в земной коре. Исследования последних лет показывают, что резко увеличивается его накопление в биологических объектах в зонах влияния техногенеза [35]. Данных по содержанию Th в объектах живой природы гораздо меньше, чем для U. Согласно данным отдельных авторов, среднее содержание Th в золе наземных растений $n\cdot 10^{-5}$ %, а наиболее высокое содержание составляет 0,1 % [36]. В целом можно отметить высокую вариативность содержания естественных

радиоактивных элементов в живом веществе при их определении на отдельных территориях [27, 37].

Таким образом, актуальность изучения РЗЭ и радиоактивных элементов на локальных территориях обусловлена как глобальными изменениями в их миграции, так и высокой индикаторной ролью их содержания и соотношения на участках с природными и техногенными геохимическими аномалиями [27, 37–40]. При этом следует учитывать возможность возникновения токсического эффекта от их воздействия на живые организмы [41–45].

Территория Томской области характеризуется наличием потенциальных источников поступления РЗЭ и радиоактивных элементов в компоненты природной среды. Таковыми являются угольные залежи Центральной Сибири, характеризующиеся повышенными содержаниями данных элементов относительно угольного кларка. Данные элементы могут поступать в окружающую среду при сжигании углей [46]. Дополнительным источником являются месторождения циркон-ильменитовых песков, широко распространенных на территории области [47]. При разработке этих месторождений РЗЭ и радиоактивные элементы могут быть вовлечены в трофические цепи. В Томском районе располагается Северный промышленный узел, где на ограниченной территории сконцентрировано значительное количество промышленных объектов. Наиболее крупные промышленные объекты ядерно-топливного цикла – Сибирский химический комбинат (СХК), нефтехимической отрасли – ООО «Томскнефтехим», агропромышленных комплексов – птицефабрика «Межениновская», свиноплекс «Томский» и другие.

Целью данной работы является рассмотрение взаимосвязей радиоактивных и РЗЭ в комплексе компонентов природной среды (почва, солевые отложения природной пресной воды) и организма человека (волосы и кровь) на территории Томской области, характеризующейся различными природно-техногенными условиями.

Объекты и методы исследований

Работа базируется на 1235 пробах компонентов природной среды, отобранных в период с 2000 по 2011 гг. на территории Томской области. Параллельно отобраны почвы частных приусадебных хозяйств (184 пробы), солевые отложения природных пресных вод (накись) (278 проб), волосы человека (562 пробы) и кровь человека (211 проб). При проведении исследования рассматривались населенные пункты Томской области, располагающиеся в рамках междуречий Оби и ее крупных притоков (рис. 1). Обь-Чулымское междуречье включает 170 населенных пунктов шести административных районов (Асиновский, Томский, Зырянский, Тегульдетский, Кривошеинский, Шегарский). Кеть-Чулымское междуречье охватывает 51 населенный пункт пяти административных районов (Верхнекетский, Колпашевский, Томский, Молчановский, Первомайский). Обь-Васюганское междуречье включает 134 населенных пункта девяти адми-

нистративных районов (Бакcharский, Каргасокский, Кожевниковский, Колпашевский, Кривошеинский, Молчановский, Парabelьский, Чаинский, Шегарский).

Отбор и подготовка проб проводились в соответствии с инструкциями и требованиями к геохимическим и геолого-экологическим исследованиям.

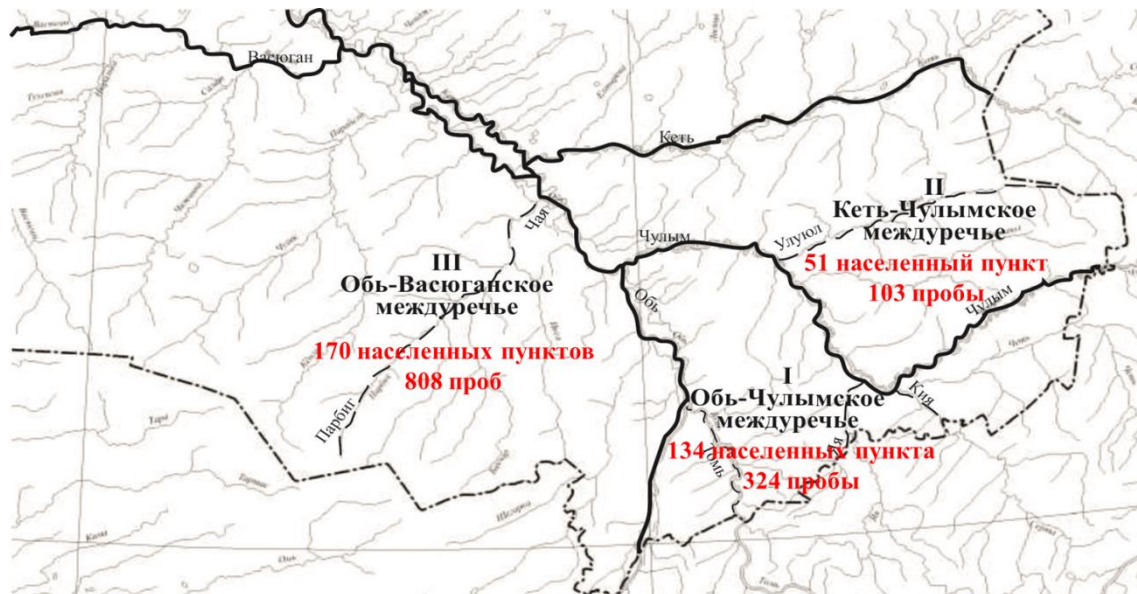


Рис. 1. Карта-схема отбора проб на территории междуречий Оби и ее крупных притоков

Fig. 1. Map of sampling on the territory of Ob interfluvial areas and its major tributaries

При отборе почв руководствовались ГОСТ 17.4.3.01-83, ГОСТ 17.4.4.02-84 и методическими наработками коллектива ИМГРЭ (1997) [48–50]. Почвы на приусадебных хозяйствах отбирались методом конверта со стороной 10*10 м, на глубине 15 см, масса пробы составляла 200–250 г. Проба высушивалась, просеивалась на сите диаметром отверстий в 2 мм, истиралась до состояния «пудры».

Для солевых отложений природных пресных вод (накипи) использовали патент «Способ определения участков загрязнения ураном окружающей среды» [51]. Накипь отбиралась из посуды, в которой кипятилась вода. При отборе фиксировали глубину залегания водоносного горизонта и тип посуды. Объем пробы составлял 20–50 г. Пробоподготовка включала высушивание образцов при комнатной температуре и истирание в агатовой ступке до состояния «пудры».

При отборе волос и крови человека действовали согласно рекомендациям МАГАТЭ (1980) [52]. При взятии проб волос фиксировали пол, полное имя, возраст, место рождения и адрес проживания, а также наличие патологий и хронических заболеваний. В выборку были включены дети в возрасте 2–16 лет, которые были рождены в данном населенном пункте и не имели изменений по медицинским показателям. Пробоподготовка заключалась в измельчении волос до сегментов длиной 0,5 см. Кровь для исследования предоставлена сотрудниками СибГМУ. Предоставленные образцы высушивались в муфельной печи при температуре 60 °С до твердого состояния.

Основной метод исследования – инструментальный нейтронно-активационный анализ, который осуществлялся на базе исследовательского ядерного реактора Национального исследовательского Томского

политехнического университета (аналитики А.Ф. Судыко, Л.В. Богутская). Было определено содержание двух радиоактивных элементов (Th, U) и семи РЗЭ (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu).

Для интерпретации и анализа данных проводился стандартный анализ среднестатистических параметров с использованием программ STATISTICA 8 и Excel. Для оценки различий средних значений использовался критерий Манна–Уитни ($p=0,05$). Для выявления статистически значимых аномалий редкоземельных и радиоактивных (Th, U) элементов в компонентах природной среды были выделены значения отличные от $\bar{x} \pm 3S$, где \bar{x} – среднее арифметическое содержание элемента; S – среднее квадратичное отклонение [53].

Для выявления индикаторных показателей использовались соотношения элементов: Th/U, La/Ce, La/Yb, La+Ce/Sm+Eu, La+Ce/Yb+Lu, а также сумма редкоземельных элементов: $\sum \text{РЗЭ} = \text{La} + \text{Ce} + \text{Sm} + \text{Eu} + \text{Tb} + \text{Yb} + \text{Lu}$.

Результаты и их обсуждение

Анализ средних содержаний изученных элементов (таблица) показывает, что концентрация РЗЭ и радиоактивных элементов существенно выше в компонентах природной среды (почва и накипь), и значительно ниже в организме человека (волосы и кровь). Распределение РЗЭ подчиняется правилу Оддо–Гаркинса. По мере снижения концентрации элементов изученные объекты можно выстроить в следующий ряд «почва–накипь–волосы–кровь» и только в случае с U данный ряд нарушается. Хорошо известно, что U в водных растворах мигрирует в валентности +6 в форме $(\text{UO}_2)^{2+}$ совместно с $(\text{CO}_3)^{2-}$ [24, 54]. Вероятно, этим обусловлено низкое (0,05) значение Th/U отно-

шения в накали. Эта особенность, характерная для почв и вод в целом, описана Л.П. Рихвановым [55].

Соотношения РЗЭ или их групп часто применяются для их дифференциации и выявления особенностей компонентов природной среды. Такие показатели также являются индикатором смены геохимических условий [21, 38]. Нами были использованы такие отношения, как La/Ce, La/Yb, La+Ce/Sm+Eu, La+Ce/Yb+Lu.

La/Ce отношение является наиболее индикаторным, так как его значения изменяются в узком диапазоне от 0,3 для накали до 0,8 для волос. Кровь человека характеризуется наименьшими значениями La/Yb и La+Ce/Yb+Lu отношений. А.В. Дубинин [38] связывает накопление тяжелых РЗЭ на взвешенном органическом веществе с устойчивостью поверхностных комплексных соединений. Вероятно, органическое вещество влияет на изменение концентрации Yb и Lu в крови человека.

В практике геохимических исследований широко распространено нормирование содержаний РЗЭ к их содержанию в эталонных образцах с целью определения процессов фракционирования элементов в различных физико-химических условиях [56]. Наиболее распространенными эталонными образцами, используемыми для нормирования, являются: хондриты (хондритовый метеорит C1), североамериканский сланец (NASC), пост-архейский австралийский сланец (PAAS) и другие. Нормирование на «сланцы»

обычно используется в исследованиях окружающей среды [12]. В нашем исследовании мы нормировали содержания изученных РЗЭ к североамериканскому сланцу (NASC).

В результате нормирования (рис. 2) каждый из изученных компонентов показал собственную специфику, что позволило наблюдать различия между компонентами. Для почв характерно относительно однородное накопление с очень слабыми отрицательными аномалиями Ce и Eu. В солевых отложениях природных пресных вод отмечаются положительные аномалии Sm и Tb и отрицательные аномалии Eu и Yb. В волосах наблюдаются резкие Ce и Yb минимумы. В крови при нормировании на NASC наблюдается резкий Ce минимум и Yb максимум и в целом увеличение тяжелых РЗЭ. Схожее поведение тяжелых РЗЭ отмечается для морской воды и некоторых геологических формаций с высоким содержанием органического вещества [38, 57], что объясняется изменением констант устойчивости комплексных соединений. Поскольку ряд авторов [58] отмечает схожесть крови человека с морской водой, мы считаем возможным, что данный Yb максимум объясняется нахождением Yb в виде металлоорганических комплексов. Устойчивость к комплексобразованию и количество органического вещества может обуславливать наличие отрицательной аномалии Ce в волосах и крови человека.

Таблица. Содержание РЗЭ и радиоактивных элементов в компонентах природной среды и биосубстратах человека, мг/кг

Table. Content of rare earth and radioactive elements in the components of the environment and human biosubstrates, mg/kg

Элемент Elements	Объект исследования/ Object of investigation			
	Почва Soil (184)	Солевые отложения природных пресных вод Salt sediment of water (278)	Волосы человека Human hair (562)	Кровь человека Human blood (211)
La	$23 \pm 0,5$ 7,7 – 43,4	$0,5 \pm 0,04$ 0,007 – 5,8	$0,3 \pm 0,01$ 0,0004 – 2,8	$0,1 \pm 0,01$ 0,003 – 2,4
Ce	45 ± 1 12,8 – 92,5	$2 \pm 0,2$ 0,04 – 22	$0,4 \pm 0,02$ 0,002 – 5,1	$0,2 \pm 0,01$ 0,003 – 1,2
Sm	$4,5 \pm 0,1$ 1,2 – 8,9	$0,2 \pm 0,04$ 0,005 – 8,7	$0,1 \pm 0,001$ 0,001 – 1,4	$0,03 \pm 0,003$ 0,001 – 0,5
Eu	$0,8 \pm 0,03$ 0,05 – 1,7	$0,06 \pm 0,01$ 0,005 – 0,9	$0,01 \pm 0,001$ 0,001 – 0,2	$0,01 \pm 0,0002$ 0,002 – 0,01
Tb	$0,7 \pm 0,02$ 0,2 – 2,4	$0,04 \pm 0,003$ 0,01 – 0,5	$0,01 \pm 0,0004$ 0,004 – 0,06	$0,01 \pm 0,0005$ 0,01 – 0,03
Yb	$2,4 \pm 0,07$ 0,6 – 5,6	$0,08 \pm 0,01$ 0,01 – 2,5	$0,03 \pm 0,002$ 0,008 – 0,9	$0,06 \pm 0,002$ 0,01 – 0,1
Lu	$0,4 \pm 0,02$ 0,1 – 1,5	$0,02 \pm 0,003$ 0,002 – 0,5	$0,01 \pm 0,002$ 0,0004 – 0,9	$0,005 \pm 0,0002$ 0,001 – 0,02
Th	$5,8 \pm 0,1$ 1,4 – 10,8	$0,2 \pm 0,02$ 0,003 – 2,6	$0,07 \pm 0,01$ 0,01 – 3,5	$0,01 \pm 0,001$ 0,002 – 0,1
U	$2,3 \pm 0,1$ 0,2 – 9,4	$3,3 \pm 0,5$ 0,02 – 66,4	$0,2 \pm 0,01$ 0,005 – 3	$0,1 \pm 0,01$ 0,001 – 2,5
Th/U	2,5	0,05	0,4	0,1
La/Ce	0,5	0,3	0,8	0,7
La/Yb	9,9	7,1	9,6	1,9
La+Ce/Sm+Eu	12	8,7	5,5	7,0
La+Ce/Yb+Lu	25	28	16	4,2

Примечание: в скобках – количество проб; числитель – среднее арифметическое \pm стандартная ошибка, знаменатель – минимальное и максимальное значение.

Note: amount of samples is given in brackets; the arithmetic average \pm standard error is given in the numerator, the min-max content is given in the denominator.

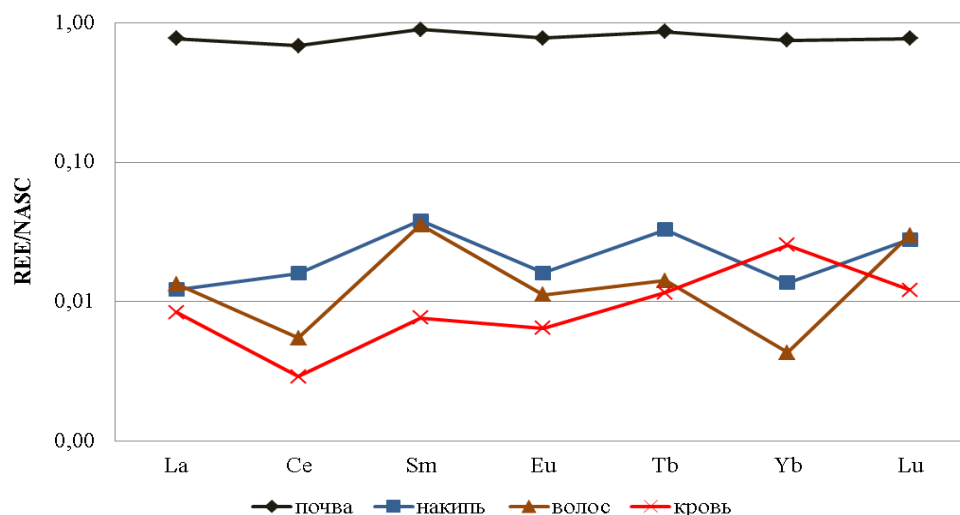


Рис. 2. Нормированное на NASC содержание РЗЭ в компонентах природной среды и биосубстратах человека территории Томской области

Fig. 2. NASC-normalized REE patterns of mean in components of the environment and human biosubstrates of Tomsk Region

Очевидно, что на формирование среднего элементного состава компонентов природной среды существенное влияние оказывают локальные геохимические факторы. При анализе компонентов природной среды на значительных расстояниях очевидным является факт их изменения в зависимости от смены геохимической обстановки. Для территории Томской области характерным является изменение климатических, ландшафтных и геохимических условий.

Информативным является изучение соотношений радиоактивных элементов и суммы РЗЭ. Нами была рассмотрена система «Th-U-ΣРЗЭ».

Почвы в рамках административных районов Томской области характеризуются однородным расположением в системе «Th-U- ΣРЗЭ» (рис. 3, а). Однако ряд населенных пунктов Асиновского и Тегульдского районов характеризуется повышенным содержанием U.

Для солевых отложений природных пресных вод (накипи) (рис. 3, б) для большей части населённых пунктов характерна РЗЭ специализация. Для некоторых населенных пунктов Зырянского, Тегульдского и Томского районов отмечается повышенное содержание U в накипи питьевых вод. Ранее было отмечено, что высокие значения обусловлены влиянием Яйского месторождения бурых углей, обогащенных РЗЭ и U [59].

В волосах жителей Томской области распределение крайне неоднородное, но для большинства административных районов характерна U-РЗЭ специализация (рис. 3, в). На этом фоне выделяются населенные пункты Томского района (Наумовка, Георгиевка, Козюлино, Самусь, Моряковский Затон, Орловка), где отмечается повышенное содержание Th. Следует

отметить промежуточное положение населенных пунктов Александровского и Каргасокского районов, основных нефтегазовых центров Томской области, в изученной системе.

Кровь жителей Томской области характеризуется U специализацией (рис. 3, д). Для отдельных населенных пунктов области отмечается повышенное содержание РЗЭ.

Для районирования территории по уровням содержания РЗЭ и радиоактивных элементов нами был применен подход, охватывающий большие по площади территории в рамках междуречий Оби и ее крупных притоков. Были выделены три территории: Обь-Васюганское, Обь-Чулымское и Кеть-Чулымское междуречья. Для данных территорий был применен анализ частоты встречаемости аномальных содержаний РЗЭ и радиоактивных элементов.

Анализ содержания Sm (рис. 4, а) в почвах и волосах показывает, что максимум приходится на Обь-Васюганское междуречье и уменьшается в Обь-Чулымском и Кеть-Чулымском междуречьях. Анализ концентраций U (рис. 4, б) в накипи и крови показал, что больше всего U приходится на Обь-Чулымское междуречье с уменьшением в Кеть-Чулымском и Обь-Васюганском.

В целом на основе данного подхода было проведено районирование территории Томской области с выявлением специфики, характерной для каждого из междуречий в комплексе изученных компонентов (рис. 5). Обь-Чулымское междуречье характеризуется MREE-HREE-Th-U специализацией. Для Кеть-Чулымского междуречья отмечается HREE-La-Eu специализация. Для Обь-Васюганского междуречья специализация представлена MREE-La.

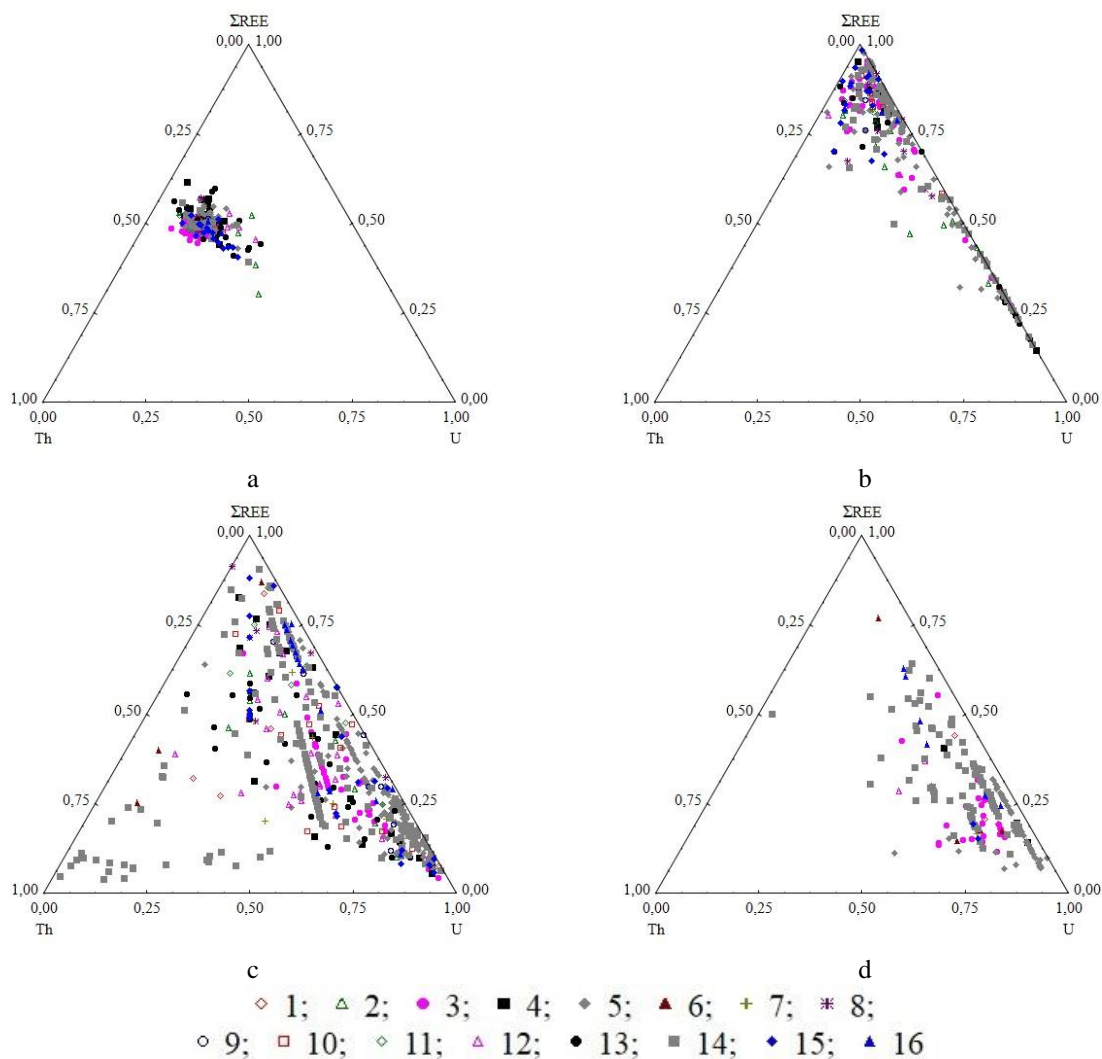


Рис. 3. Тройная диаграмма соотношения содержаний Th, U и суммы РЗЭ в почве (а), солевых отложениях природных пресных вод (накипи) (б), волосах жителей (с), крови жителей (д) населенных пунктов районов Томской области: 1 – Александровский; 2 – Асиновский; 3 – Бакcharский; 4 – Верхнекетский; 5 – Зырянский; 6 – Карасокский; 7 – Кожевниковский; 8 – Колпашевский; 9 – Кривошеинский; 10 – Молчановский; 11 – Парабельский; 12 – Первомайский; 13 – Тегульдский; 14 – Томский; 15 – Чаинский; 16 – Шегарский

Fig. 3. Ternary diagram of Th, U contents, sum of REE in the soil (a), salt sediment of water (b), hair of residents (c), blood of residents of Tomsk region: 1 – Aleksandrovsky; 2 – Asinovsky; 3 – Bakcharsky; 4 – Verkhneketsky; 5 – Zyryansky; 6 – Kargasovsky; 7 – Kozhevnikovsky; 8 – Kolpashevsky; 9 – Krivosheinsky; 10 – Molchanovsky; 11 – Parabelsky; 12 – Pervomaysky; 13 – Teguldetsky; 14 – Tomsky; 15 – Chainsky; 16 – Shegarsky

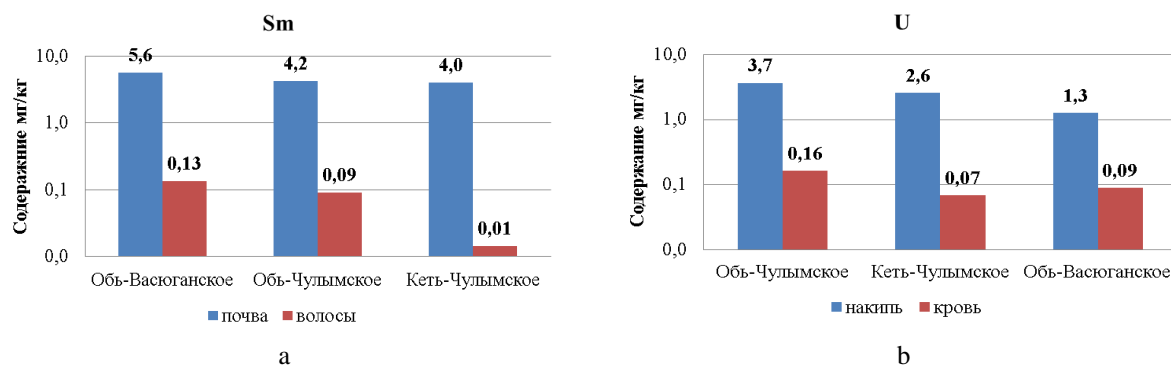


Рис. 4. а) содержание *Sm* в почве и волосах жителей; б) содержание *U* в солевых отложениях питьевых вод (накипи) и крови жителей Томской области

Fig. 4. a) Sm content in soil and hair of residents; b) U content in salt deposits of water and blood of residents of Tomsk region

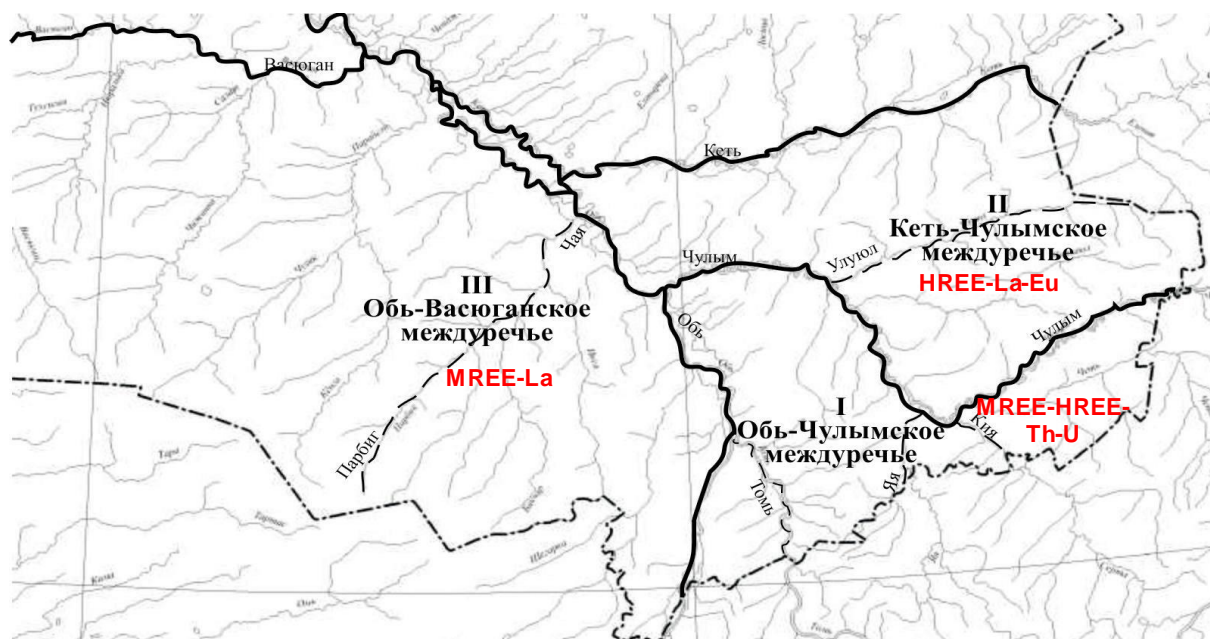


Рис. 5. Карта-схема геохимической специализации территорий юга и юго-востока Томской области. Примечание: карта-схема основа на частоте встречаемости аномальных содержаний ($x \geq +3S$) РЗЭ и радиоактивных элементов в компонентах природной среды; x – среднее арифметическое, S – среднее квадратичное отклонение

Fig. 5. Map of geochemical specialization of the territories of the south and southeast of the Tomsk region. Note: the map is based on the frequency of occurrence of anomalous contents ($x \geq +3S$) of REE and radioactive elements in the components of the natural environment; x is the arithmetic average, S is the standard deviation

Выводы

Установлены средние содержания радиоактивных (Th, U) и РЗЭ (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) в четырех компонентах природной среды (почва, солевые отложения природных пресных вод (накись), волосы и кровь человека) на территории Томской области.

Выявлено, что волосы и кровь характеризуются резким Се минимумом. В крови выявлен Yb максимум, что, возможно, связано с его нахождением в виде металлоорганических комплексов.

Анализ распределения изученных элементов в системе «Th-U-РЗЭ» позволил выявить территории, геохимически специализированные на изученные химические элементы.

Анализ частоты встречаемости аномальных содержаний РЗЭ и радиоактивных элементов в компонентах природной среды позволил дифференцировать территорию юга и юго-востока Томской области по крупным междуречьям Оби и ее притоков и выявить геохимическую специализацию выделенных районов.

Таким образом, содержание и соотношение изученных элементов являются информативными индикаторными показателями, однако следует учитывать специфику каждого изучаемого компонента природной среды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90061

Авторы благодарят к.г.-м.н. Т.А. Монголину за предоставление части проб накости для исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические рекомендации по прогнозированию, поискам и перспективной оценке экзогенных месторождений иттрия и иттриевых лантаноидов / Н.А. Солодов, Ю.А. Грязнова, Т.Ю. Усова, Т.К. Прокофьева. – М.: Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, 1991. – 89 с.
2. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. – USA: Blackwell Scientific Publication, 1985. – 312 p.
3. Tyler G. Rare earth elements in soil and plant systems – a review // Plant Soil. – 2004. – V. 267. – P. 191–206.
4. Haxel G.B. Ultrapotassic mafic dikes and rare earth element- and barium-rich carbonatite at Mountain Pass, Mojave Desert, southern California; summary and field trip localities. – Reston, Virginia, 2005. – 56 p.
5. Oddo G. Die Molekularstruktur der radioaktiven Atome // Zeitschrift für Anorganische Chemie. – 1914. – V. 87. – P. 253–268.
6. Harkins W.D. The evolution of the elements and the stability of complex atoms. I. A new periodic system which shows a relation between the abundance of the elements and the structure of the nuclei of atoms // Journal of the American Chemical Society. – 1917. – V. 39. – Iss. 5. – P. 856–879.
7. Барашков Г.К. Медицинская бионеорганика. Основы. Аналитика. Клиника. – М.: Бином, 2011. – 512 с.
8. Sources, behaviour, and environmental and human health risks of high-technology rare earth elements as emerging contaminants / W. Gwenzi, L. Mangori, C. Danha, N. Chaukura, N. Dunjana, E. Sanganyado // Science of the Total Environment. – 2018. – V. 636. – P. 299–313.
9. Brioschi L. Transfert des terres rares à l'interface géosphère biosphère Répartition, transfert sol-végétation, et effet sur la physiologie des plantes: Thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur Spécialité. – Besançon, 2012. – 195 p.
10. Evaluating rare earth element availability: a case with revolutionary demand from clean technologies. Environ / E. Alonso, A.M. Sherman, T.J. Wallington, M.P. Everson, F.R. Field, R. Roth, R.E. Kirchain // Sci. Technol. – 2012. – V. 46. – Iss. 6. – P. 3406–3414.
11. Rare earths statistics and information // United States Geological Survey. – 2012. URL: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths (дата обращения 20.12.2018).

12. Zdzisław M. Migaszewski, Gałuszka A. The characteristics, occurrence, and geochemical behavior of rare earth elements in the environment: a review // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. – 2015. – V. 45. – Iss. 5. – P. 429–471.
13. Distribution and fractionation of the rare earth elements in Brazilian soils / H. de Sá Paye, J.W.V. de Mello, G.R.L. de Magalhães Mascarenhas, M. Gasparon // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2016. – V. 161. – P. 27–41.
14. Inputs of rare earth elements in Brazilian agricultural soils via P-containing fertilizers and soil correctives / F.B.V. Silva, C.W.A. Nascimento, A.M. Alvarez, P.R.M. Araujo // *Journal of Environmental Management*. – 2019. – V. 232. – P. 90–96.
15. Determination of 16 heavy metal elements and 16 rare earth elements in Ya'an tibet tea by ICP-MS / P.W. Li, J.H. Li, S.X. Chen, X.L. Meng // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – V. 423. – P. 1–7.
16. Zaremotlagh S., Hezarkhani A. A geochemical modeling to predict the different concentrations of REE and their hidden patterns using several supervised learning methods: Choghart iron deposit, Bafq, Iran // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2016. – V. 165. – P. 35–48.
17. Decrée S., Pourret O., Baelle J.-M. Rare earth element fractionation in heterogenite (CoOOH): implication for cobalt oxidized ore in the Katanga Copperbelt (Democratic Republic of Congo) // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2015. – V. 159. – P. 290–301.
18. Rare earth elements in French stream waters – revisiting the geochemical continental cycle using FOREGS dataset / R. Armand, C. Cherubini, J. Tuduri, N. Pastore, O. Pourret // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2015. – V. 157. – P. 132–142.
19. Panichev A.M. Rare earth elements: review of medical and biological properties and their abundance in the rock materials and mineralized spring waters in the context of animal and human geophagia reasons evaluation // *Achievements in the Life Sciences*. – 2015. – V. 9. – P. 95–103.
20. Киселева Д.В. Особенности состава, структуры и свойств ряда фосфатных и карбонатных биоминеральных образований: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Екатеринбург, 2007. – 29 с.
21. Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. – М.: Наука, 1976. – 258 с.
22. Распределение редких земель в литосфере и космосе / Л.А. Хэскин, Ф.А. Фрей, Р.А. Шмитт, Р.Х. Смит. – М.: Мир, 1968. – 186 с.
23. Минеев Д.А. Лантаноиды в рудах редкоземельных и комплексных месторождений. – М.: Наука, 1974. – 240 с.
24. Арбузов С.И., Рихванов Л.П. Геохимия радиоактивных элементов. 3-е изд. испр. и доп. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 300 с.
25. The interaction of actinide and lanthanide ions with hemoglobin and its relevance to human and environmental toxicology / A. Kumar, M. Ali, S.N. Raghumani, P. Gaikwad, M. Kumar, B.N. Bimalendu, N.P. Badri // *Journal of Hazardous Materials*. – 2016. – V. 301. – P. 281–293.
26. Rare earth elements and select actinoids in the Canadian House Dust Study / P.E. Rasmussen, C. Levesque, M. Chenier, H.D. Gardner // *Indoor Air*. – 2017. – V. 27. – P. 965–976.
27. Очерки геохимии человека: монография / Н.В. Барановская, Л.П. Рихванов, Т.Н. Игнатова и др. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – 378 с.
28. Гринвуд Н., Эрншо А. Химия элементов: в 2 т. / пер. с англ. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2008. – Т. 2. – 670 с.
29. Алексеев В.А. Геоэкология: экологическая геохимия. изд. 2-е, перераб. – Ростов-на-Дону: Изд-во Феникс, 2017. – 685 с.
30. Виноградов А.П. Геохимия живого вещества. – Л.: АН СССР. – 1932. – 67 с.
31. Hoffman J. U in human thyroid gland and dog testicle and pancreas // *Naturwissenschaften*. – 1942. – № 30. – P. 279–280.
32. Hoffman J. Urankonzentration der in Beziehung stehenden Organe: Hirnanhang, Schilddrüse, Keimdrüsen, Nebenniere und Bauchspeicheldrüse // *Biochemische Zeitschrift*. – 1943. – V. 315. – № 1–2. – P. 26–30.
33. Hoffman J. Bioelement Uran im Pflanzen – und Tierreich sowie im menschlichen Organismus // *Biochemische Zeitschrift*. – 1943. – V. 313. – № 5–6. – P. 377–387.
34. Добровольский В.В. Геохимическое земледелие. – М.: Владос, 2008. – 207 с.
35. Uranium mining wastes: the use of the Fish Embryo acute Toxicity Test (FET) test to evaluate toxicity and risk of environmental discharge / J. Lourenço, S. Marques, F.P. Carvalho, J. Oliveira, M. Malta, M. Santos, F. Gonçalves, R. Pereira, S. Mendo // *Science of the Total Environment*. – 2017. – V. 605–606. – P. 391–404.
36. Ковалевский А.Л., Ковалевская О.М. Биогеохимия урановых месторождений и методические основы их поиска. – Новосибирск: Гео, 2010. – 362 с.
37. Влияние техногенеза на формирование элементного состава волос детского населения / Д.В. Наркович (Швецова), Н.В. Барановская, Е.В. Агеева (Коваль), Н.П. Корогод // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 8. – С. 116–128.
38. Дубинин А. В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. – М.: Наука, 2006. – 339 с.
39. Редкоземельные элементы (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) в углях Северной Азии (Сибирь, российский Дальний Восток, Северный Китай, Монголия, Казахстан) / С.И. Арбузов, И.Ю. Черыжов, С. Юйчжуан, Ж. Цунлян, В.С. Машенькин, С.С. Ильенок, В.В. Иванов, М.Г. Блохин, Н.В. Зарубина // *Геосферные исследования*. – 2017. – № 4. – С. 6–27.
40. Редкоземельные элементы в атмосферных осадках на территории г. Благовещенска / Радомская В.И., Юсупов Д.В., Павлова Л.М. // *Геохимия*. – 2018. – № 2. – С. 197–206.
41. Toxicity of cerium and thorium on *Daphnia magna* / Y. Ma, J. Wang, C. Peng, Y. Ding, X. He, P. Zhang, N. Li, T. Lan, D. Wang, Z. Zhang, F. Sun, H. Liao, Z. Zhang // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2016. – V. 134. – P. 226–232.
42. Rare-earth nanoparticle-induced cytotoxicity on spatial cognition memory of mouse brain / C.-H. Lin, G.-F. Liu, J. Chen, Y. Chen, R.-H. Lin, H.-X. He, J.-P. Chen // *Chinese Medical Journal*. – 2017. – V. 130. – Iss. 22. – P. 1591–1597.
43. Potential clinical risk of inflammation and toxicity from rare-earth nanoparticles in mice / J.-P. Chen, S.-S. Shi, G.-F. Liu, Y. Chen, S.-S. Zheng, X.-B. Wang, R.-H. Lin, H.-X. He, C.-H. Lin // *Chinese Medical Journal*. – 2018. – V. 131. – P. 1591–1597.
44. Soil pollution and toxicity in an area affected by emissions from a bauxite T processing plant and a power plant in Gardanne (southern France) / R. Oral, G. Pagano, A. Siciliano, M. Toscanesi, M. Gravina, A. di Nunzio, A. Palumbo, P.J. Thomas, F. Tommasi, P. Buric, D.M. Lyons, M. Guida, M. Trifuoggi // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2019. – V. 170. – P. 55–61.
45. Toxicity assay of lanthanum and cerium in solutions and soil / A. Kotelnikova, I. Fastovets, O. Rogova, D.S. Volkov, V. Stolbova // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2019. – V. 167. – P. 20–28.
46. Арбузов С.И. Геохимия редких элементов в углях Центральной Сибири: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2005. – 48 с.
47. Циркон-ильменитовые россыпные месторождения – как потенциальный источник развития Западно-Сибирского региона / Л.П. Рихванов, С.С. Кропанин, С.А. Бабенко, А.И. Соловьев, В.М. Советов, Т.Ю. Усова, М.А. Полякова. – Кемерово: Изд-во ООО «Сарс», 2001. – 214 с.
48. ГОСТ 17.4.3.01 – 83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к охране почв. – М.: Изд-во «Стандартинформ», 1984. – 4 с.
49. ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – М.: Изд-во «Стандартинформ», 1986. – 7 с.
50. Комплексная эколого-геохимическая оценка техногенного загрязнения окружающей природной среды / Э.К. Буренков, Л.Н. Гинзбург, Н.К. Грибанова и др. – М.: Изд-во «ПРИМА-ПРЕСС», 1997. – 72 с.
51. Способ определения участков загрязнения ураном окружающей среды: пат. 2298212 Рос. Федерация. № 2005120840; заявл. 04.07.05; опубл. 27.04.07. Бюл. № 12. – 6 с.
52. Element analysis of biological materials. Current problems and techniques with special reference to trace. Appendix II. Technical reports series. – Vienna: IAEA, 1980. – V. 197. – P. 351–367.
53. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. – М.: Астрель-2000, 1999. – 610 с.

54. Евсеева Л.С., Перельман А.И., Иванов К.Е. Геохимия урана в зоне гипергенеза. 2-е изд. – М.: Атомиздат, 1975. – 240 с.
55. Рихванов Л.П. Радиоактивность и радиоактивные элементы в гидросфере // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы V Международной конференции. – Томск, 13–16 сентября 2016. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – С. 549–557.
56. The European shale: an improved data set for normalisation of rare earth element and yttrium concentrations in environmental and biological samples from Europe / M. Bau, K. Schmidt, A. Pack, V. Bendel, D. Kraemer // Applied Geochemistry. – 2018. – V. 90. – P. 142–149.
57. Редкоземельные элементы в баженовской свите Западно-Сибирского осадочного бассейна / Ю.Н. Занин, А.Г. Замирайлова, В.Г. Эдер, В.О. Красавчиков // Литосфера. – 2011. – № 6. – С. 38–54.
58. Кист А.А. Феноменология биогеохимии бионеорганической химии. – Ташкент: ФАН7, 1987. – 236 с.
59. Рихванов Л.П. Общие и региональные проблемы радиозологии. – Томск: Изд-во ТПИ, 1997. – 384 с.

Поступила 12.09.2019 г.

Информация об авторах

Барановская Н.В., доктор биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Агеева Е.В., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Соктоев Б.Р., кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Наркович Д.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Денисова О.А., кандидат медицинских наук, ассистент кафедры госпитальной терапии с курсом физической реабилитации и спортивной медицины Сибирского государственного медицинского университета Министерства здравоохранения Российской Федерации.

Матковская Т.В., доктор медицинских наук, заслуженный врач РФ, профессор кафедры детских болезней Сибирского государственного медицинского университета Министерства здравоохранения Российской Федерации.

UDC 550.422:546.7:504.064(571.16)

RARE EARTH AND RADIOACTIVE (TH, U) ELEMENTS IN THE COMPONENTS OF THE ENVIRONMENT ON THE TERRITORY OF TOMSK REGION

Natalia V. Baranovskaya¹,
nata@tpu.ru

Elena V. Ageeva¹,
ev_ageeva@mail.ru

Bulat R. Soktoev¹,
bulatsoktoev@tpu.ru

Dina V. Narkovich¹,
shvezova_d@mail.ru

Olga A. Denisova²,
oadeni@yandex.ru

Tamara V. Matkovskaya²,
matkovskay@inbox.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Siberian State Medical University,
2, Moskovsky trakt, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to consider the correlations of radioactive and rare earth elements from the point of view of their high indicator role in the complex of components of the environment in local territories characterized by different natural and man-made conditions and zoning of the territory based on biogeochemical indicators.

The aim of the research is to consider the correlations of radioactive and rare earth elements in the complex of the components of the environment in the territory of the Tomsk region, characterized by various natural and man-made environments.

Methods. The main method of the research is instrumental neutron activation analysis, which was carried out on the basis of a research nuclear reactor of the National Research Tomsk Polytechnic University. The content of two radioactive – thorium and uranium, as well as seven rare earth (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) elements – was determined.

Results. The authors have studied the content of rare earth and radioactive elements in four simultaneously selected and studied components of the environment of Tomsk region: soil, salt sediment of water, human blood and hair. The content of the studied elements is maximal for soils and for salt sediment of water, and significantly lower in human biosubstrates. Human hair and blood as living tissues are characterized by a sharp cerium minimum. The ytterbium maximum was detected in the blood, which may be related to its presence in the form of organometallic complexes. According to the frequency of occurrence of the anomalous contents of rare earth and radioactive elements, zoning of Tomsk region was carried out for significant tributaries of the Ob river in all studied components.

Key words:

Rare earth and radioactive elements, components of the environment, indicator, ratio of the elements, Tomsk region, biogeochemical zoning of the territory.

The reported study was funded by RFBR, project number 19-35-90061.

The authors appreciate T.A. Mongolina, Cand. Sc., for a part of salt sediment of water samples for the research.

REFERENCES

1. Solodov N.A., Gryaznova Yu.A., Usova T.Yu., Prokofyeva T.K. *Metodicheskie rekomendatsii po prognozirovaniyu, poiskam i perspektivnoy otsenke ekzogennykh mestorozhdeniy itriya i itrievykh lantanoidov* [Methodical recommendations on forecasting, searching and prospective evaluation of exogenous yttrium and yttrium lanthanide deposits]. Moscow, Institute of mineralogy, geochemistry and crystal chemistry of rare elements Publ., 1991. 89 p.
2. Taylor S.R., McLennan S.M. *The continental crust: its composition and evolution*. USA, Blackwell Scientific Publication, 1985. 312 p.
3. Tyler G. Rare earth elements in soil and plant systems – a review. *Plant Soil*, 2004, vol. 267, pp. 191–206.
4. Haxel G.B. *Ultrapotassic mafic dikes and rare earth element- and barium-rich carbonatite at Mountain Pass, Mojave Desert, southern California; summary and field trip localities*. Reston, Virginia, 2005. pp. 56.
5. Oddo G. Die Molekularstruktur der radioaktiven Atome [The molecular structure of the radioactive atoms]. *Zeitschrift für Anorganische Chemie*, 1914, vol. 87, pp. 253–268.
6. Harkins W.D. The evolution of the elements and the stability of complex atoms. I. A new periodic system which shows a relation between the abundance of the elements and the structure of the nuclei of atoms. *Journal of the American Chemical Society*, 1917, vol. 39, Iss. 5, pp. 856–879.
7. Barashkov G.K. *Meditsinskaya bioneorganika. Osnovy, analitika, klinika* [Medical Bioinorganics. Fundamentals, analytics, clinic]. Moscow, Binom Publ., 2011. 512 p.

8. Gwenzi W., Mangori L., Danha C., Chaukura N., Dunjana N., Sanganyado E. Sources, behaviour, and environmental and human health risks of high-technology rare earth elements as emerging contaminants. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 636, pp. 299–313.
9. Brioschi L. *Transfert des terres rares à l'interface géosphère biosphère Répartition, transfert sol-végétation, et effet sur la physiologie des plantes: thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur Spécialité* [Transfer of rare earth elements on the border of the geosphere and biosphere Distribution, transfer in the soil-plant system and the effect on plant physiology. Dr. Sc. Diss.]. Besancon, 2012. 195 p.
10. Alonso E., Sherman A.M., Wallington T.J., Everson M.P., Field F.R., Roth R., Kirchain R.E. Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies. *Environ. Sci. Technol.*, 2012, vol. 46, Iss. 6, pp. 3406–3414.
11. *Rare earths statistics and information*. United States Geological Survey, 2012. Available at: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths (accessed 20 December 2018).
12. Zdzisław M., Migaszewska, Gałuszka A. The characteristics, occurrence, and geochemical behavior of rare earth elements in the environment: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2015, vol. 45, Iss. 5, pp. 429–471.
13. De Sá Paye H., De Mello J.W.V., De Magalhães Mascarenhas G.R.L., Gasparon M. Distribution and fractionation of the rare earth elements in Brazilian soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, vol. 161, pp. 27–41.
14. Silva F.B.V., Nascimento C.W.A., Alvarez A.M., Araujo P.R.M. Inputs of rare earth elements in Brazilian agricultural soils via P-containing fertilizers and soil correctives. *Journal of Environmental Management*, 2019, vol. 232, pp. 90–96.
15. Li P.W., Li J.H., Chen S.X., Meng X.L. Determination of 16 heavy metal elements and 16 rare earth elements in Ya'an Tibet tea by ICP-MS. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 423, pp. 1–7.
16. Zaremotlagh S., Hezarkhani A. A geochemical modeling to predict the different concentrations of REE and their hidden patterns using several supervised learning methods: Choghart iron deposit, Bafq, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, vol. 165, pp. 35–48.
17. Decrée S., Pourret O., Bael J.-M. Rare earth element fractionation in heterogenite (CoOOH): implication for cobalt oxidized ore in the Katanga Copperbelt (Democratic Republic of Congo). *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, vol. 159, pp. 290–301.
18. Armand R., Cherubini C., Tuduri J., Pastore N., Pourret O. Rare earth elements in French stream waters – Revisiting the geochemical continental cycle using FOREGS dataset. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, vol. 157, pp. 132–142.
19. Panichev A.M. Rare earth elements: review of medical and biological properties and their abundance in the rock materials and mineralized spring waters in the context of animal and human geophagia reasons evaluation. *Achievements in the Life Sciences*, 2015, vol. 9, pp. 95–103.
20. Kiseleva D.V. *Osobennosti sostava, struktury i svoystv ryada fosfatnykh i karbonatnykh biomineralnykh obrazovaniy*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Specific aspects of structure and features of number of phosphate and carbonate biomineral formations. Cand. Diss. Abstract]. Ekaterinburg, 2007. 29 p.
21. Balashov Yu.A. *Geokhimiya redkozemelnykh elementov* [Geochemistry of rare earth elements]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 258 p.
22. Kheskin L.A., Frey F.A., Shmitt R.A., Smit R.Kh. *Raspredelenie redkikh zemel v litosfere i kosmose* [Meteoritic, solar and terrestrial rare-earth distribution]. Moscow, Mir Publ., 1968. 186 p.
23. Mineev D.A. *Lantanoidy v rudakh redkozemelnykh i kompleksnykh mestorozhdeniy* [Lanthanides in ores of rare earth and complex deposits]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 240 p.
24. Arbuzov S.I., Rikhvanov L.P. *Geokhimiya radioaktivnykh elementov* [Geochemistry of radioactive elements]. Tomsk, TPU Publ. house, 2011. 300 p.
25. Kumar A., Ali M., Raghumani S., Ningthoujam, Gaikwad P., Kumar M., Bimalendu B. Nath, Badri N. Pandeya. The interaction of actinide and lanthanide ions with hemoglobin and its relevance to human and environmental toxicology. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, vol. 301, pp. 281–293.
26. Rasmussen P.E., Levesque C., Chenier M., Gardner H.D. Rare earth elements and select actinoids in the Canadian House Dust Study. *Indoor Air*, 2017, vol. 27, pp. 965–976.
27. Baranovskaya N.V., Rikhvanov L.P., Ignatova T.N. *Ocherki geokhimii cheloveka: monografiya* [The human geochemistry essays: monograph]. Tomsk, TPU Publ., 2015. 378 p.
28. Grinvud N., Ernsho A. *Khimiya elementov* [Chemistry of elements]. Translated from English. Moscow, Binom. Laboratoriya znaniy Publ., 2008. Vol. 2, 670 p.
29. Alekseenko V.A. *Geoekologiya: ekologicheskaya geokhimiya* [Geocology: ecological geochemistry]. Rostov-na-Donu, Feniks Publ., 2017. 685 p.
30. Vinogradov A.P. *Geokhimiya zhivogo veshchestva* [Geochemistry of living matter]. Leningrad, AN SSSR, 1932. 67 p.
31. Hoffman J. U in human thyroid gland and dog testicle and pancreas. *Naturwissenschaften*, 1942, no. 30, pp. 279–280.
32. Hoffman J. Urankonzentration der in Beziehung stehenden Organe: Hirnanhang, Schilddrüse, Keimdrüsen, Nebenniere und Bauchspeicheldrüse. *Biochemische Zeitschrift*, 1943, vol. 315, no. 1–2, pp. 26–30.
33. Hoffman J. Bioelement Uran im Pflanzen – und Tierreich sowie im menschlichen Organismus [Bioelement uranium in the plant and animal kingdom and in the human organism]. *Biochemische Zeitschrift*, 1943, vol. 313, no. 5–6, pp. 377–387.
34. Dobrovolskiy V.V. *Geokhimicheskoe zemlevedenie* [Geochemical geography]. Moscow, Vldos Publ., 2008. 207 p.
35. Lourenço J., Marques S., Carvalho F.P., Oliveira J., Malta M., Santos M., Gonçalves F., Pereira R., Mendo S. Uranium mining wastes: the use of the Fish Embryo acute Toxicity Test (FET) test to evaluate toxicity and risk of environmental discharge. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 605–606, pp. 391–404.
36. Kovalevskiy A.L., Kovalevskaya O.M. *Biogeokhimiya uranovykh mestorozhdeniy i metodicheskie osnovy ikh poiska* [Biogeochemistry of uranium deposits and methodological fundamentals of their prospecting]. Novosibirsk, Geo Publ., 2010. 362 p.
37. Narkovich (Shvetsova) D.V., Baranovskaya N.V., Ageyeva (Koval) E.V., Korogod N.P. Influence of technogenesis on forming element composition of children's hair. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 8, pp. 116–128. In Rus.
38. Dubinin A.V. *Geokhimiya redkozemelnykh elementov v okeane* [Rare earth geochemistry in the ocean]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 339 p.
39. Arbuzov S.I., Chekryzhov I.Yu., Yuchzhuan S., Tsunlyan Zh., Mashenkin V.S., Ilyenok S.S., Ivanov V.V., Blokhin M.G., Zarubina N.V. Rare-earth elements (La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu) in the coals of the North Asia (Siberia, Russian Far East, North China, Mongolia, Kazakhstan). *Geosphere Research*, 2017, no. 4, pp. 6–27. In Rus.
40. Radomska V.I., Yusupov D.V., Pavlova L.M. Rare-earth elements in the atmospheric precipitation of the city of Blagoveshchensk. *Geochemistry International*, 2018, no. 2, pp. 197–206. In Rus.
41. Ma Y., Wang J., Peng C., Ding Y., He X., Zhang P., Li N., Lan T., Wang D., Zhang Z., Sun F., Liao H., Zhang Z. Toxicity of cerium and thorium on *Daphnia magna*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, vol. 134, pp. 226–232.
42. Lin C.-H., Liu G.-F., Chen J., Chen Y., Lin R.-H., He H.-X., Chen J.-P. Rare-earth Nanoparticle-induced Cytotoxicity on Spatial Cognition Memory of Mouse Brain. *Chinese Medical Journal*, 2017, vol. 130, Iss. 22, pp. 1591–1597.
43. Chen J.-P., Shi S.-S., Liu G.-F., Chen Y., Zheng S.-S., Wang X.-B., Lin R.-H., He H.-X., Lin C.-H. Potential clinical risk of inflammation and toxicity from rare-earth nanoparticles in mice. *Chinese Medical Journal*, 2018, vol. 131, pp. 1591–1597.
44. Oral R., Pagano G., Siciliano A., Toscanesi M., Gravina M., A. Di Nunzio, Palumbo A., Thomas P.J., Tommasi F., Buric P., Lyons D.M., Guida M., Trifuoggi M. Soil pollution and toxicity in an area affected by emissions from a bauxite T processing plant and a power plant in Gardanne (southern France). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, vol. 170, pp. 55–61.
45. Kotelnikova A., Fastovets I., Rogova O., Volkov D.S., Stolbova V. Toxicity assay of lanthanum and cerium in solutions and soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, vol. 167, pp. 20–28.

46. Arbuzov S.I. *Geokhimiya redkikh elementov v uglyakh Tsentralnoy Sibiri*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Rare elements geochemistry of Central Siberia coals. Dr. Diss. Abstract]. Tomsk, 2005. 48 p.
47. Rikhvanov L.P., Kropanin S.S., Babenko S.A., Solovyev A.I., Sovetov V.M., Usova T.Yu., Polyakova M.A. *Tsirkon-ilmenitovye rossypnye mestorozhdeniya – kak potentsialny istochnik razvitiya Zapadno-Sibirskogo regiona* [Zircon-ilmenite placer deposits as a potential source for Western Siberian region development Editors]. Kemerovo, 2001. 214 p.
48. GOST 17.4.3.01-83. *Okhrana prirody. Pochvy. Obshchie trebovaniya k okhrane pochv* [Nature protection. Soils. General requirements for sampling]. Moscow, StandardInform Publ., 1984. 4 p.
49. GOST 17.4.4.02-83. *Okhrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo, gelmintologicheskogo analiza* [Nature protection. Soils. Methods for sampling and preparation of soil for chemical, bacteriological, helminthological analysis]. Moscow, StandardInform Publ., 1986. 7 p.
50. Burenkov E.K., Ginzburg L.N., Griбанова N.K. *Kompleksnaya ekologo-geokhimicheskaya otsenka tekhnogennogo zagryazneniya okruzhayushchey prirodnoy sredy* [Complex eco-geochemical evaluation of anthropogenic pollution of the environment]. Moscow, PRIMA-PRESS, 1997. 72 p.
51. Baranovskaya N.V., Rikhvanov L.P., Yazikov E.G., Yankovich E.P. *Sposob opredeleniya uchastkov zagryazneniya uranom okruzhayushchey sredy* [Method for determination of areas in the environment polluted with uranium]. Patent RF, no. 2005120840, 2007.
52. Element analysis of biological materials. *Current problems and techniques with special reference to trace elements*. Appendix II. Technical reports series. Vienna, IAEA, 1980. Vol. 197, pp. 351–367.
53. Perelman A.I., Kasimov N.S. *Geokhimiya landshafta* [Geochemistry of landscape]. Moscow, Astreya-2000 Publ., 1999. 610 p.
54. Evseeva L.S., Perelman A.I., Ivanov K.E. *Geokhimiya urana v zone gipergeneza* [Uranium geochemistry in the hypergenesis zone]. Moscow, Atomizdat Publ., 1975. 240 p.
55. Rikhvanov L.P. Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v gidrosfere [Radioactivity and radioactive elements in the hydrosphere]. *Radioaktivnost i radioaktivnye element v srede obitaniya cheloveka. Materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in environment. Proc. of V international conference]. Tomsk, 13–16 September, 2016. Tomsk, TPU Publ. house, 2016. pp. 549–557.
56. Bau M., Schmidt K., Pack A., Bendel V., Kraemer D. The European shale: an improved data set for normalisation of rare earth element and yttrium concentrations in environmental and biological samples from Europe. *Applied Geochemistry*, 2018, vol. 90, pp. 142–149.
57. Zanin Yu.N., Zamirailova A.G., Eder V.G., Krasavchikov V.O. Redkozemelnye elementy v bazhenovskoy svite Zapadno-Sibirskogo osadochnogo basseyna [Rare earth elements in the Bazhenov Formation of the West Siberian sedimentary basin]. *Lithosphere*, 2011, no. 6, pp. 38–54.
58. Kist A.A. *Fenomenologiya biogeokhimii i bioneorganicheskoy khimii* [Phenomenology of biogeochemistry and bio-nonorganic chemistry]. Tashkent, FAN7 Publ., 1987. 236 p.
59. Rikhvanov L.P. *Obshchie i regionalnye problemy radioekologii* [General and regional problems of radioecology]. Tomsk, TPI Publ., 1997. 384 p.

Received: 12 September 2019.

Information about the authors

Natalia V. Baranovskaya, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elena V. Ageeva, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Bulat R. Soktoev, Cand. Sc., assistant professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Dina V. Narkovich, Cand. Sc., assistant professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Olga A. Denisova, Cand. Sc., assistant, Siberian State Medical University.

Tamara V. Matkovskaya, Dr. Sc., professor, Siberian State Medical University.

УДК 620.9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ВЕТРОСОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В МОНГОЛЬСКОЙ ЧАСТИ ПУСТЫНИ ГОБИ

Марченко Олег Владимирович¹,
marchenko@isem.irk.ru

Соломин Сергей Владимирович¹,
solomin@isem.irk.ru

¹ Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Актуальность работы обусловлена интенсивным экономическим развитием стран Северо-Восточной Азии, увеличением их потребности в электроэнергии и целесообразностью повышения экономической и экологической эффективности электро-снабжения за счет реализации проектов электроэнергетической интеграции. При этом важную роль может играть широко-масштабное внедрение возобновляемых источников энергии.

Цель: определение оптимальной структуры ветросолнечных электростанций в монгольской части пустыни Гоби (соотно-шения мощностей электростанций разных типов и выработки ими электроэнергии) для разных сочетаний экономических и климатических условий.

Методы: систематизация климатической и метеорологической информации, предварительная оценка эффективности энергоисточников разных типов по критерию стоимости производимой электроэнергии, математическое моделирование структуры и режимов работы энергосистемы. Математическая модель учитывает случайный характер поступления сол-нечной и ветровой энергии.

Результаты. Показано, что произведенная фотоэлектрическими преобразователями и ветротурбинами электроэнергия с учетом стоимости ее транспорта по линиям электропередачи конкурентоспособна на электроэнергетических рынках Ки-тая и других стран Северо-Восточной Азии. Для различных значений прихода солнечной радиации и скорости ветра опреде-лены оптимальные соотношения между мощностями возобновляемых источников энергии, производством электроэнергии фотоэлектрическими преобразователями и ветротурбинами, а также поставками электроэнергии из энергосистемы Китая для компенсации неравномерности выработки возобновляемых источников энергии. Показана экономическая эффективность совместного использования солнечной и ветровой энергии в монгольской части пустыни Гоби за исключением некоторых районов с низкими скоростями ветра. Совместное использование солнечной и ветровой энергии позволяет снизить суммар-ные затраты на систему электроснабжения более чем на четверть по сравнению с вариантом использования только сол-нечной энергии.

Ключевые слова:

Пустыня Гоби, Монголия, энергосистема, возобновляемые источники энергии, эффективность, цена электроэнергии.

Введение

В настоящее время активно обсуждаются вопросы электроэнергетической интеграции производителей и потребителей электрической энергии в Северо-Восточной Азии [1–3], которая может обеспечить как экономический, так и экологический эффект. В рам-ках проектов интеграции предполагается использова-ние возобновляемых источников энергии (ВИЭ), что позволит значительно снизить выбросы в окружаю-щую среду вредных веществ, в том числе диоксида углерода, ответственного за изменение климата [3–6].

Один из таких проектов предполагает крупномас-штабное строительство солнечных и ветровых элек-тростанций (суммарной мощностью до 100 ГВт) в мон-гольской части пустыни Гоби и последующий экспорт электроэнергии в сопредельные страны [1, 5–7]. Ввод в эксплуатацию большого количества ВИЭ, в частности фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), может привести к локальным изменениям температурного режима [8] и дополнительно осложняется в условиях пустыни ускоренной эрозией почвы и пыльными бу-рями, существенно влияющими на производство и потребление энергии [9]. Климат пустыни Гоби рез-

ко- континентальный, с большим сезонным перепа-дом температур, что неблагоприятно для солнечных и ветровых электростанций. Однако эти технические трудности преодолимы [4], и наиболее серьезным вопросом остается экономическая эффективность и конкурентоспособность проекта. Ранее выполненные предварительные оценки [10] показали, что солнеч-ные электростанции пока еще уступают по экономич-ности электростанциям на органическом топливе. Однако за прошедшие годы успехи в развитии техно-логии производства солнечных элементов привели к существенному удешевлению ФЭП.

В связи с этим в настоящей работе на основе со-временных технико-экономических показателей энер-гоисточников проведены исследования структуры ветросолнечных электростанций для условий мон-гольской части пустыни Гоби и эффективности их применения в зависимости от внешних условий.

Пустыня Гоби расположена на расстоянии 400–430 км от столицы Монголии Улан-Батора и 650–750 км от столицы Китая Пекина (рис. 1). При полном использовании энергетического потенциала этого района мощность солнечных электростанций на

основе ФЭП может достигнуть 1500 ГВт, а ветро-энергетических установок (ВЭУ) – 1100 ГВт [6, 7]. Средняя плотность энергии при этом составит 66 МВт/км² для солнечной энергии и 7 МВт/км² для ветровой энергии [7]. В 2017–2018 гг. в пустыне Гоби введены в строй 2 ветропарка суммарной мощностью 105 МВт (Цэций и Сайншанд) и 4 солнечные электростанции мощностью 75 МВт.

Максимум электрической нагрузки в Монголии не превышает 1 ГВт, в соседних странах он существенно выше. Установленная мощность электростанций в 2016 г.: в Китае – 1146 ГВт, в Японии – 302 ГВт, в России – 232 ГВт, в Южной Корее – 94 ГВт, в Северной Корее – 9 ГВт [11].

Потребление электроэнергии в Монголии также существенно меньше, чем в других странах Северо-Восточной Азии. Электропотребление в Китае превышает уровень Монголии в 910 раз, в Японии оно выше в 166 раз, в Южной Корее – в 88 раз, в России – в 155 раз, в соседних российских регионах (Сибирь и

Дальний Восток) – в 43 раза [12]. В Монголии самый низкий среди стран Северо-Восточной Азии средний тариф на электроэнергию (около 5 цент/кВт·ч) по сравнению с 7,5 цент/кВт·ч в Китае, 8,5 цент/кВт·ч в Южной Корее и 16 цент/кВт·ч в Японии [11].

Общая мощность предложенных инвесторами проектов строительства ВЭУ и ФЭП в Монголии превышает 950 МВт и приближается к суммарной установленной мощности всех энергоисточников страны. В 2017 г. правительство Монголии объявило о введении льготного тарифа для стимулирования инвесторов ветровых и солнечных электростанций (8–9,5 и 15–18 цент/кВт·ч соответственно) с целью введения дополнительных мощностей ВЭУ (450 МВт) и ФЭП (200 МВт). Однако ряд экспертов выразили сомнения в способности потребителей оплачивать повышенные тарифы и возможности электроэнергетической системы Монголии поглотить такие значения переменной мощности возобновляемых источников энергии.

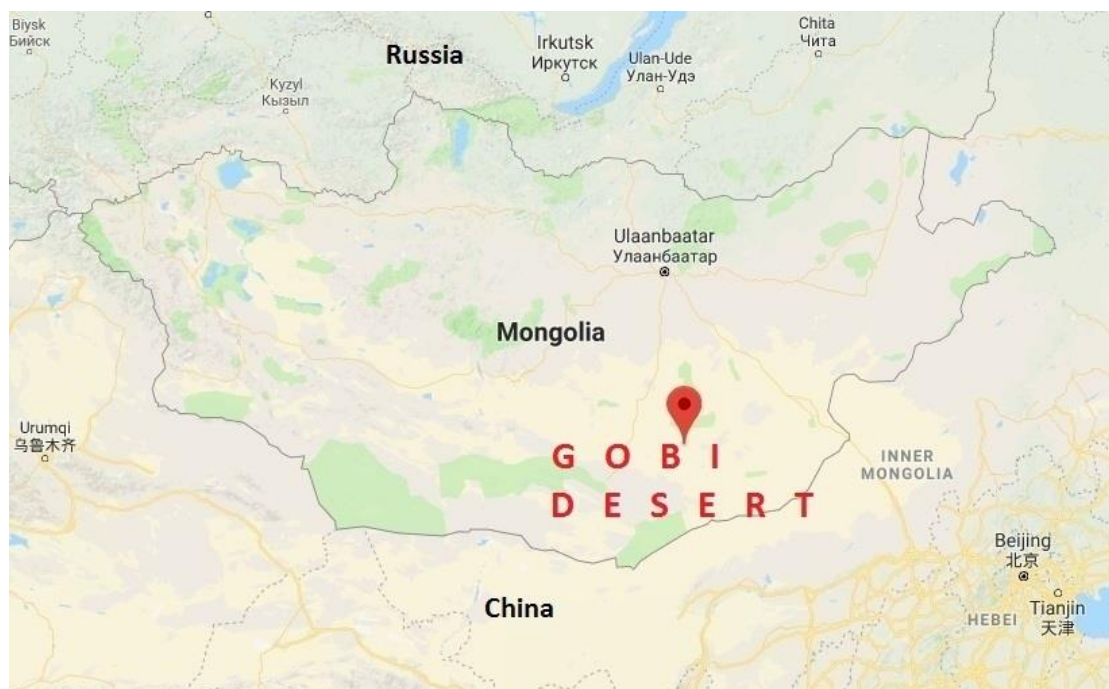


Рис. 1. Пустыня Гоби на карте Google Maps

Fig. 1. Gobi Desert on Google Maps

Постановка задачи

Цель работы – определение оптимальной структуры ветросолнечных электростанций (соотношения мощностей электростанций разных типов и выработки ими электроэнергии), расположенных в монгольской части пустыни Гоби и предназначенных для экспорта электроэнергии в сопредельные страны при разных сочетаниях экономических и климатических условий.

Решение задачи целесообразно разделить на два этапа. На первом этапе определялись удельные затраты на производство электроэнергии (стоимость электроэнергии) для энергоисточников разных типов. Это позволяет предварительно оценить и сравнить их

экономическую эффективность. Затраты на единицу произведенной электроэнергии учитывают инвестиции, эксплуатационные издержки и плату за выбросы диоксида углерода [13, 14].

На втором этапе посредством математического моделирования учитывались системные эффекты, обусловленные совместной работой возобновляемых источников энергии. Оптимальная структура системы электроснабжения выбиралась из решения задачи математического программирования: минимизация затрат с учетом балансов энергии и ряда дополнительных ограничений. Разработанная для этой цели математическая модель отличается от моделей HOMER [15, 16], TRNSYS [17], HOGA [18] и др. [19–23] тем,

что не требует предварительного задания стратегии выбора режимов работы отдельных элементов энергосистемы. Модель учитывает случайный характер поступления солнечной и ветровой энергии. Эти характеристики изменяются как по часам суток, так и по сезонам года. Непостоянство во времени выработки энергии ВИЭ делает целесообразным их совместное использование. Работа энергосистемы моделируется в динамике, с шагом по времени 1 час. Искомыми переменными являются установленные и текущие

(в данный момент времени) мощности энергоисточников. Подробно модель описана в работах [24, 25].

Система электроснабжения (рис. 2) состоит из ФЭП, ВЭУ, преобразователей напряжения и средств сопряжения с сетью. Поскольку ветросолнечные электростанции в пустыне Гоби расположены вдали от центров нагрузки, произведенная электроэнергия передается в направлении Китая, условно в район Пекина. Для передачи энергии на большие расстояния наиболее эффективны ЛЭП постоянного тока [5, 6].

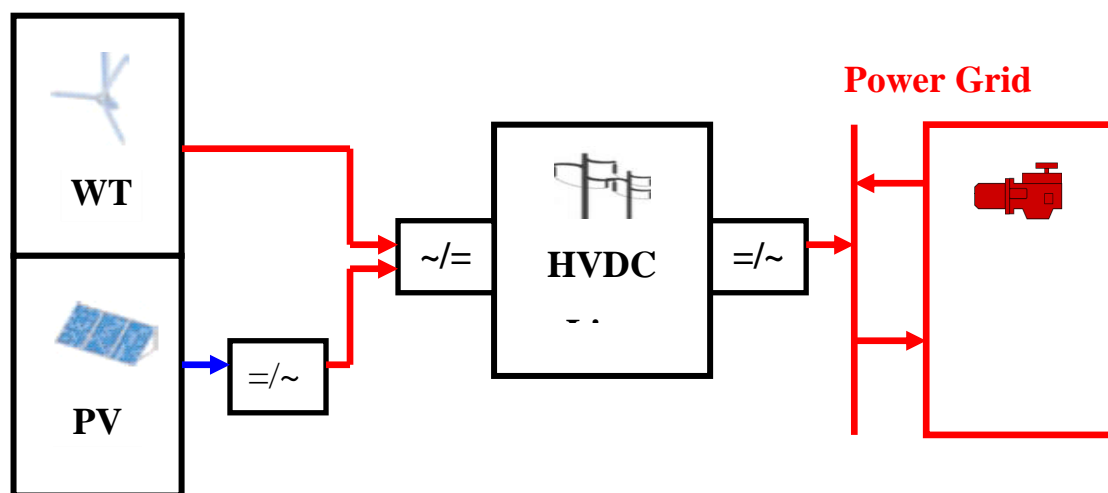


Рис. 2. Схема энергосистемы. WT – ВЭУ, PV – ФЭП, HVDC line – линия постоянного тока, Power Grid – электро-энергетическая система (сеть)

Fig. 2. Diagram of the power system. WT – wind turbines, PV – photovoltaic, HVDC – high-voltage direct current transmission line

Предполагается, что комплекс ветросолнечных электростанций будет представлять собой один из первых этапов электроэнергетической интеграции стран Северо-Восточной Азии. Он работает на потребителей, которые наряду с электроэнергией, производимой ВИЭ, потребляют также электроэнергию из систем Северного и Северо-Восточного Китая, которые компенсируют неравномерность выработки ВИЭ. Мощность этих электроэнергетических систем значительно больше мощности рассматриваемых ветро-солнечных электростанций.

Мощность ВЭУ изменяется в зависимости от скорости ветра в соответствии с рабочей характеристикой, мощность ФЭП прямо пропорциональна интенсивности солнечного излучения с поправкой на температуру панелей.

Исходные данные

Экономическая эффективность ФЭП и ВЭУ определяется в первую очередь интенсивностью солнечной радиации, скоростью ветра, технико-экономическими показателями энергоустановок, а также ценой электроэнергии в энергосистеме.

Мощности ФЭП и ВЭУ зависят от интенсивности солнечного излучения и скорости ветра, которые изменяются как по времени суток, так и по сезонам. Последнее особенно характерно для солнечного излучения [24–28].

Для общей характеристики ветрового и солнечного режимов в пустыне Гоби, а также в качестве ориентира для определения интервала варьирования входных параметров математической модели в табл. 1, 2 приведены данные, характеризующие приход солнечной радиации на горизонтальную и наклонную поверхность солнечных панелей [29] и скорость ветра [30] в некоторых пунктах пустыни Гоби по сезонам года. В расчетах использовались часовые данные [5, 30].

При оптимальном расположении (наклоне) солнечных модулей годовой приход солнечной радиации может достигать 1900–2200 кВт·ч/м² [29]. Средняя многолетняя скорость ветра в пустыне Гоби изменяется от 2,5 до 6 м/с на высоте 10 м от уровня земли. В 1998–2000 гг. на территории пустыни Гоби проводились измерения с помощью анемометров на высоте 20 м. В населенном пункте Манлай (провинция Умнеговь) измеренная средняя скорость ветра составила 6,6 м/с (6 м/с на высоте 10 м). В ряде других пунктов: в провинциях Умнеговь, Дундговь, Дорноговь средняя многолетняя скорость ветра превышает 5 м/с на высоте 10 м и 6 м/с на высоте 20 м [30].

Таким образом, величина прихода солнечной радиации изменяется в достаточно узком интервале и приемлема для развития солнечной энергетики [25]. Ветровые условия изменяются в широком диапазоне; в ряде пунктов ветровые условия хорошие, в других они явно плохие и заведомо не годятся для эффективного использования ветроустановок.

Таблица 1. Приход солнечной радиации на горизонтальную поверхность и солнечную панель при оптимальном угле наклона, кВт·ч/м²

Table 1. Solar radiation input on a horizontal surface and a solar panel at optimum inclination angle, kWh/m²

Пункт Point	Расположение Location	Декабрь–февраль December–February	Март–май March–May	Июнь–август June–August	Сентябрь–ноябрь September–November	Всего Total
Мандагговь Mandalgovi	Горизонт. Horizon.	203	518	558	309	1588
	Оптим. Opt.	358	573	563	427	1921
Сайншанд Sainshand	Горизонт. Horizon.	213	521	555	312	1601
	Оптим. Opt.	473	598	560	494	2125
Даланзадгад Dalanzadgad	Горизонт. Horizon.	232	529	552	334	1647
	Оптим. Opt.	509	601	556	523	2189

Примечание: Горизонт. – горизонтальная поверхность, Оптим. – оптимальный наклон панели в зависимости от сезона.

Note: Horizon. – horizontal surface, Opt. – optimal angle of the panel inclination depending on the season.

Таблица 2. Средние многолетние скорости ветра на стандартной высоте 10 м, м/с

Table 2. Average long-term wind speeds at a standard height of 10 m, m/s

Пункт/Point	Декабрь–февраль December–February	Март–май March–May	Июнь–август June–August	Сентябрь–ноябрь September–November	Всего Total
Мандагговь Mandalgovi	3,9	5,6	4,5	4,1	4,5
Сайншанд Sainshand	4,0	5,5	4,4	4,1	4,5
Даланзадгад Dalanzadgad	2,2	4,7	3,6	3,3	3,5
Манлай* Manlai*	6,7	7,2	5,5	6,6	6,6

Примечание: * – на высоте расположения анемометра 20 м.

Note: * – at the height of the anemometer 20 m.

В расчетах использовалась логарифмическая аппроксимация вертикального профиля скорости ветра для установок Goldwind с высотой башни 50 м и единичной номинальной мощностью 1,5 МВт [31]. Номинальная скорость ветра для этих установок – 12 м/с, при скорости ветра 25 м/с они прекращают работу во избежание поломки ветротурбины.

График нагрузки потребителей (мощностью 10 ГВт) аналогичен графику для энергосистемы Центра Китая [5]. Техничко-экономические показатели компонентов системы электроснабжения приняты по данным [5, 6, 14, 25, 32, 33]. Наиболее важные из них – удельные капиталовложения – составляют для ФЭП 1100 \$/кВт, для ВЭУ – 1300 \$/кВт, для высоковольт-

ной ЛЭП постоянного тока длиной 900 км с двумя преобразовательными подстанциями – 840 \$/кВт [5].

Результаты расчетов и их анализ

Расчеты показывают, что ФЭП в условиях пустыни Гоби могут вырабатывать электроэнергию стоимостью 4–6 цент/кВт·ч, а ВЭУ – 3–9 цент/кВт·ч. Стоимость транспорта электроэнергии составляет 2–3 цент/кВт·ч. В благоприятных для ВИЭ условиях они могут быть конкурентоспособны с угольными (4–7 цент/кВт·ч) и газовыми электростанциями (5–7 цент/кВт·ч), а также с электростанциями на жидком (дизельном) топливе (10–15 цент/кВт·ч) в Монголии и других странах Северо-Восточной Азии.

На рис. 3 сравнивается стоимость электроэнергии солнечных и ветровых электростанций Монголии (пустыня Гоби) и других стран Северо-Восточной Азии по данным [5, 6, 14, 32, 33].

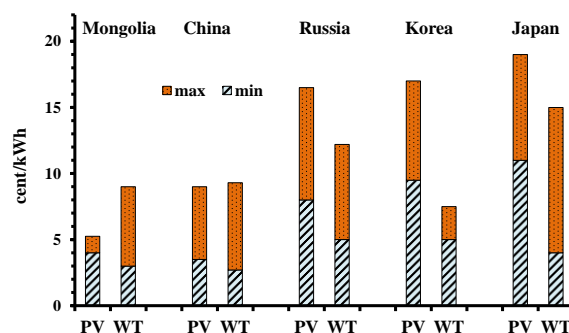


Рис. 3. Стоимость электроэнергии ФЭП и ВЭУ в странах Северо-Восточной Азии. Mongolia – монгольская часть пустыни Гоби, China – Китай, Russia – Россия, Korea – Республика Корея, Japan – Япония

Fig. 3. Electricity cost of PV and WT in the countries of Northeast Asia

Как видно из рис. 3, в пустыне Гоби ФЭП вырабатывают более дешевую электроэнергию, чем в других странах Северо-Восточной Азии за исключением южных районов Китая. В России стоимость солнечной электроэнергии выше в связи с недостаточным приходом солнечной радиации, а в Японии и Южной Корее – в связи с недостатком площадей и дороговизной сооружения ФЭП и ВЭУ. Стоимость электроэнергии ВЭУ в условиях Монголии несколько выше, чем для аналогичных установок в районах с наилучшими ветровыми условиями в Китае и России, но ниже, чем в Корее и Японии.

На рис. 4 приведены данные расчета оптимального соотношения выработки электроэнергии между ФЭП и ВЭУ при разных ценах электроэнергии в энергосистеме и при различающихся климатических условиях. Цена электроэнергии варьировалась в диапазоне 5–15 цент/кВт·ч для учета неопределенности будущих условий. В частности, цена электроэнергии может вырасти при введении экологического налога на выбросы диоксида углерода [5, 14].

При дешевой энергии из сети (менее 4 цент/кВт·ч) применение ФЭП и ВЭУ не требуется. В районах с

большим приходом солнечной радиации и плохими ветровыми условиями (рис. 4, а) при повышении цены электроэнергии становится экономически эффективным применение ФЭП. При цене выше 5 цент/кВт·ч эффективно совместное использование солнечной и ветровой энергии. С увеличением цены электроэнергии повышается доля ВЭУ в суммарной выработке, что обусловлено целесообразностью замещения дорогой энергии энергосистемы более дешевой энергией ветроустановок.

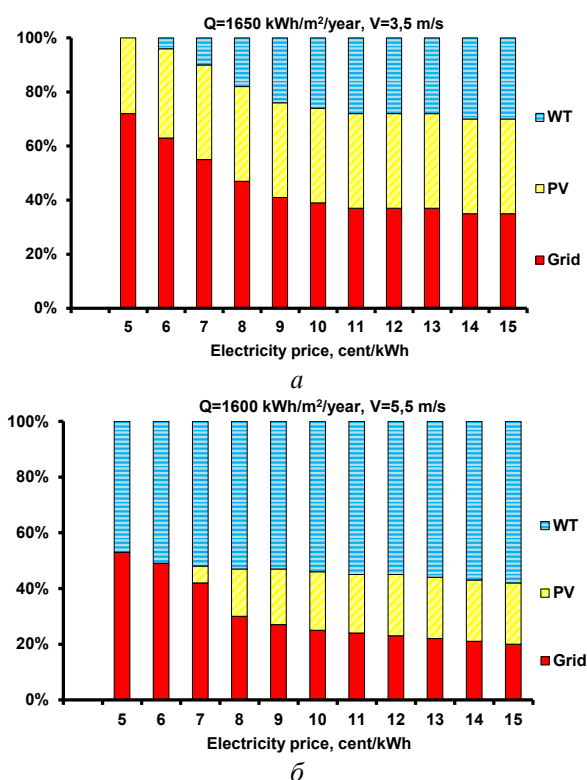


Рис. 4. Доля энергоисточников в суммарной выработке при разных ценах электроэнергии в энергосистеме и климатических условиях, % (Q – годовой приход солнечной радиации, V – средняя многолетняя скорость ветра, Grid – электроэнергия из сети, Electricity price – цена электроэнергии в энергосистеме)

В районах с хорошими ветровыми условиями (рис. 4, б) при повышении цены на электроэнергию приоритетным является использование ВЭУ (стоимость электроэнергии ВЭУ меньше аналогичного показателя для ФЭП), по мере повышения цены на электроэнергию увеличивается установленная мощность и выработка ФЭП.

Зависимость доли энергоисточников в энергоснабжении потребителей от средней многолетней скорости ветра для ВЭУ показана на рис. 5 при фиксированной цене на электроэнергию от сети

8 цент/кВт·ч. В районах с низкими среднегодовыми скоростями ветра используются только ФЭП. В районах со средней многолетней скоростью ветра (на высоте 10 м) 4 м/с оптимальные мощности ФЭП и ВЭУ примерно равны, более существенны различия в выработке электроэнергии. При средней многолетней скорости ветра 5–6 м/с доля ВИЭ возрастает до 70–75 %, причем совместное использование солнечной и ветровой энергии позволяет уменьшить суммарные затраты на систему электроснабжения на 26–28 % по сравнению с вариантом использования только солнечной энергии (рис. 6).

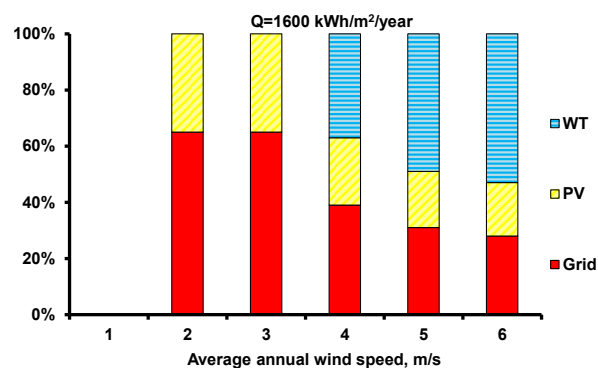


Рис. 5. Зависимость доли энергоисточников в выработке электроэнергии от средней многолетней скорости ветра (при цене электроэнергии от сети 8 цент/кВт·ч)

Fig. 5. Dependence of energy sources share in electricity generation on average long-term wind speed (with the price of electricity from the network of 8 cents/kWh)

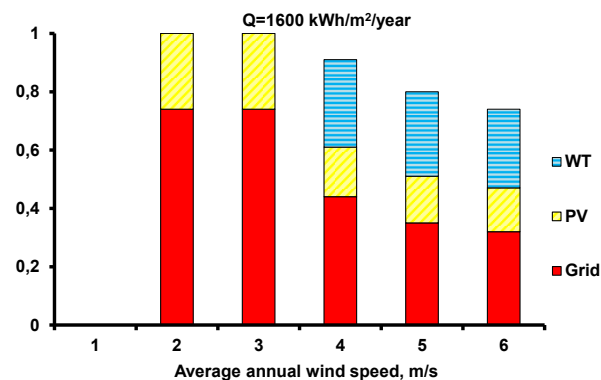


Рис. 6. Зависимость затрат (в относительных единицах) на электроснабжение от средней многолетней скорости ветра (при цене электроэнергии от сети 8 цент/кВт·ч)

Fig. 6. Dependence of costs (in relative units) for electricity supply on average long-term wind speed (with the price of electricity from the network of 8 cents/kWh)

Заключение

Определена оптимальная структура и выполнена оценка экономической эффективности ветровых и солнечных электростанций в монгольской части пустыни Гоби для различных сочетаний экономических и климатических условий.

Для оптимизации структуры системы электроснабжения использовалась математическая модель REM-2 (Renewable Energy Model). С помощью моделирования режимов работы ФЭП и ВЭУ по времени (часам) для различных значений прихода солнечной радиации и скорости ветра определены оптимальные соотношения между мощностями возобновляемых источников энергии, производством электроэнергии фотоэлектрическими преобразователями и ветротурбинами, а также поставками электроэнергии из энергосистем Северного и Северо-Восточного Китая, которые компенсируют неравномерность выработки ВИЭ.

ФЭП в условиях пустыни Гоби могут вырабатывать электроэнергию стоимостью 4–6 цент/кВт·ч, а ВЭУ – 3–9 цент/кВт·ч. Стоимость транспорта электроэнергии в Китай составляет 2–3 цент/кВт·ч. В благоприятных для ВИЭ условиях они могут быть конкурентоспособны с угольными и газовыми электро-

станциями, а также с электростанциями на дизельном топливе в Монголии и других странах Северо-Восточной Азии, прежде всего в Китае.

Показана экономическая эффективность совместного использования солнечной и ветровой энергии в монгольской части пустыни Гоби за исключением некоторых районов с низкими средними многолетними скоростями ветра. Оптимальная доля ВИЭ составляет 70–75 % при средней многолетней скорости ветра 5–6 м/с. За счет совместного использования ветровой и солнечной энергии можно снизить затраты на электроснабжение более чем на четверть по сравнению с вариантом использования только солнечной энергии.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания III.17.6.2 (рег. № АААА-А17-117030310447-3) фундаментальных исследований СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Россия в Евразийской электроэнергетической интеграции / О.В. Марченко, С.В. Подковальников, В.А. Савельев, С.В. Соломин, Л.Ю. Чудинова // Мировая экономика и международные отношения. – 2018. – Т. 62. – № 6. – С. 18–29.
2. Podkvalnikov S.V., Savelyev V.A., Chudinova L.Y. Prospects of electric-energy cooperation between Russia and northeast Asian countries // Studies on Russian Economic Development. – 2015. – V. 26. – № 4. – P. 403–412.
3. Mongolia's potential in international cooperation in the Asian energy space / S. Batmunkh, V. Stennikov, B. Bat-Erdene, A. Erdenebaatar // E3S Web of Conferences. – 2018. – V. 27. – № 01006. – P. 1–10.
4. Bogdanov D., Breyer C. North-East Asian Super Grid for 100 % renewable energy supply: optimal mix of energy technologies for electricity, gas and heat supply options // Energy Conversion and Management. – 2016. – V. 112. – P. 176–190.
5. Otsuki T., Mohd Isa A.B., Samuelson R.D. Electric Power Grid interconnections in Northeast Asia: a quantitative analysis of opportunities and challenges // Energy Policy. – 2016. – V. 89. – P. 311–329.
6. Otsuki T. Costs and benefits of large-scale deployment of wind turbines and solar PV in Mongolia for international power exports // Renewable Energy. – 2017. – V. 108. – P. 321–335.
7. GOBITEC and Asian Super Grid for renewable energies in Northeast Asia / S. Mano, B. Ovgor, Z. Samadov, M. Pudlik, V. Jülich, D. Sokolov, J. Y. Yoon. – Sofia: Spotinov print Ltd, 2014. – 114 p.
8. Study on the local climatic effects of large photovoltaic solar farms in desert areas exports / L. Yang, X. Gao, F. Lv, X. Hui, L. Ma, X. Hou // Solar Energy. – 2017. – V. 144. – P. 244–253.
9. Middleton N.J. Desert dust hazards: a global review // Aeolian Research. – 2017. – V. 24. – P. 53–63.
10. A preliminary study on potential for very large-scale photovoltaic power generation (VLS-PV) system in the Gobi desert from economic and environmental viewpoints / M. Ito, K. Kato, H. Sugiharac, T. Kichimid, J. Songe, K. Kurokawa // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2003. – V. 75. – P. 507–517.
11. Bhargava A. Developing the Northeast Asia regional energy market. – Manila: ADB, 2017. – 14 p.
12. Global Energy Interconnection Development Index 2018. – Beijing: Global Energy Interconnection Development Organisation, 2018. – 112 p.
13. Марченко О.В., Соломин С.В. Исследование влияния экологических ограничений на конкурентоспособность атомных электростанций // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2015. – № 3. – С. 20–30.
14. Марченко О.В., Соломин С.В. Влияние платы за выбросы диоксида углерода на конкурентоспособность электростанций в России и в некоторых странах Азии // Энергетик. – 2018. – № 9. – С. 27–30.
15. Lilienthal P. The HOMER micropower optimization model. – Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2005. – 5 p.
16. Lambert T., Gilman P., Lilienthal P. Micropower system modeling with HOMER. URL: <https://www.homerenergy.com/documents/MicropowerSystemModelingWithHOMER.pdf> (дата обращения 18.01.2019).
17. TRNSYS. Transient system simulation tool. URL: <http://www.trnsys.com> (дата обращения 18.01.2019).
18. Mathematical modeling of hybrid renewable energy system: a review on small hydro-solar-wind power generation / B. Bhandari, S.R. Poudel, K.-T. Lee, S.-H. Ahn // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. – 2014. – V. 1. – № 2. – P. 157–173.
19. Evaluating the value of batteries in microgrid electricity systems using an improved Energy Systems Model / E. Hittinger, T. Wiley, J. Kluza, J. Whitacre // Energy Conversion and Management. – 2015. – V. 89. – P. 458–472.
20. Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: a review / L. Olatomiwa, S. Mekhies, M.S. Ismail, M. Moghavvemi // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 62. – P. 821–835.
21. Erdinc O., Uzunoglu M. Optimum design of hybrid renewable energy systems: Overview of different approaches // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2012. – V. 16. – P. 1412–1425.
22. Dynamical Simulation of PV/Wind Hybrid Energy Conversion System / V. Bakić, M. Pezo, Ž. Stevanović, M. Živković, B. Grubor // Energy. – 2012. – V. 45. – № 1. – P. 324–328.
23. Multi-turbine wind-solar hybrid system / Q. Huang, Y. Shi, Y. Wang, L. Lu, Y. Cui // Renewable Energy. – 2015. – V. 76. – № 4. – P. 401–407.
24. Marchenko O.V. Mathematical modeling and economic efficiency assessment of autonomous energy systems with production and storage of secondary energy carriers // International Journal of Low-carbon Technologies. – 2010. – V. 10. – № 5. – P. 250–255.
25. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of hybrid renewable energy systems in Russia // International Journal of Renewable Energy Research. – 2017. – V. 7. – № 4. – P. 1561–1569.
26. Карамов Д.Н. Математическое моделирование солнечной радиации с использованием многолетних метеорологических рядов, находящихся в открытом доступе // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 238. – № 6. – С. 28–37.
27. Карамов Д.Н. Формирование исходных метеорологических массивов с использованием многолетних рядов FM 12 SYNOP и METAR в системных энергетических исследованиях // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 239. – № 1. – С. 69–88.
28. Обухов С.Г., Плотников И.А. Выбор параметров и анализ эффективности применения систем слежения за Солнцем //

- Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 239. – № 10. – С. 95–106.
29. Boxwell M. The Solar Electricity Handbook. 2017 Edition. – Birmingham: Greenstream Publishing, 2017. – 206 p. URL: <http://solarelectricityhandbook.com/solar-irradiance.html> (дата обращения 16.01.2019).
30. Wind energy resource atlas of Mongolia / D. Elliott, M. Schwartz, G. Scott, S. Haymes, D. Heimiller, R. George. – Colorado: NREL/TP-500-28972, 2001. – 215 p.
31. World leader in PMDD turbine technology. Goldwind. URL: <https://www.goldwindamericas.com/> (дата обращения 18.01.2019).
32. Projected costs of generating electricity / M. Wittenstein, G. Rothwell, C. Yu, M. Defferenes, H. Paillere, U. Remme et al. – Paris: International Energy Agency/Nuclear Energy Agency, 2015. – 215 p.
33. Marchenko O.V., Solomin S.V. Economic efficiency of renewable energy sources in Russia // International Journal of Renewable Energy Research. – 2014. – V. 4. – № 3. – P. 548–554.

Поступила 14.05.2019 г.

Информация об авторах

Марченко О.В., кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

Соломин С.В., кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 620.9

DETERMINATION OF THE OPTIMAL STRUCTURE OF WIND-SOLAR POWER PLANTS IN THE MONGOLIAN PART OF THE GOBI DESERT

Oleg V. Marchenko¹,
marchenko@isem.irk.ru

Sergei V. Solomin¹,
solomin@isem.irk.ru

¹ Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
130, Lermontov street, Irkutsk, 664033, Russia.

The relevance of the work is caused by the intensive economic development of the countries of Northeast Asia, the increase in their electricity demand and feasibility of improving the economic and environmental efficiency of electricity supply through the implementation of electrical energy integration projects. In this case, the large-scale introduction of renewable energy sources can play an important role.

The aim of the research is to determine the optimal structure of wind power plants in the Mongolian part of the Gobi Desert (the ratio of the capacities of different types of power plants and their generation of electricity) for different combinations of economic and climatic conditions.

Methods: systematization of climatic and meteorological information, preliminary assessment of the effectiveness of energy sources of various types according to the criterion of the cost of electricity produced, mathematical modeling of the structure and modes of operation of the power system. The mathematical model takes into account the random nature of solar and wind energy.

Results. It is shown that the electricity produced by photoelectric converters and wind turbines, taking into account the cost of its transport along power transmission lines, is competitive in the electricity markets of China and other countries of Northeast Asia. For various values of solar radiation input and wind speed, the optimum ratios were determined between the capacities of renewable energy sources, the production of electricity by photoelectric converters and wind turbines, as well as the supply of electricity from China's power system to compensate the unevenness in production of renewable energy sources. The economic efficiency of joint use of solar and wind energy in the Mongolian part of the Gobi desert is shown, with the exception of some areas with low wind speeds. The combined use of solar and wind energy allows reducing the total costs in the power supply system by more than a quarter compared with the variant of using only solar energy.

Key words:

Gobi Desert, Mongolia, power system, renewable energy sources, effectiveness, electricity price.

The research was carried out under State Assignment, Project III.17.6.2 (reg. no. AAAA-A17-117030310447-3) of the Fundamental Research of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

REFERENCES

1. Marchenko O.V., Podkovalnikov S.V., Savelyev V.A., Solomin S.V., Chudinova L.Y. Russia in Eurasian electric power integration. *World Economy and International Relations*, 2018, vol. 62, no.6, pp. 18–29. In Rus.
2. Podkovalnikov S.V., Savelyev V.A., Chudinova L.Y. Prospects of electric-energy cooperation between Russia and northeast Asian countries. *Studies on Russian Economic Development*, 2015, vol. 26, no. 4, pp. 403–412.
3. Batmunkh S., Stennikov V., Bat-Erdene B., Erdenebaatar A. Mongolia's potential in international cooperation in the Asian energy space. *E3S Web of Conferences*, 2018, vol. 27, no. 01006, pp. 1–10.
4. Bogdanov D., Breyer C. North-East Asian Super Grid for 100 % renewable energy supply: Optimal mix of energy technologies for electricity, gas and heat supply options. *Energy Conversion and Management*, 2016, vol. 112, pp. 176–190.
5. Otsuki T., Mohd Isa A. B., Samuelson R. D. Electric Power Grid Interconnections in Northeast Asia: A Quantitative Analysis of Opportunities and Challenges. *Energy Policy*, 2016, vol. 89, pp. 311–329.
6. Otsuki T. Costs and benefits of large-scale deployment of wind turbines and solar PV in Mongolia for international power exports. *Renewable Energy*, 2017, vol. 108, pp. 321–335.
7. Mano S., Ovgor B., Samadov Z., Pudlik M., Jülich V., Sokolov D., Yoon J.Y. *GOBITEC and Asian Super Grid for Renewable Energies in Northeast Asia*. Sofia, Spotinov print Ltd, 2014. 114 p.
8. Yang L., Gao X., Lv F., Hui X., Ma L., Hou X. Study on the local climatic effects of large photovoltaic solar farms in desert areas exports. *Solar Energy*, 2017, vol. 144, pp. 244–253.
9. Middleton N.J. Desert dust hazards: a global review. *Aeolian Research*, 2017, vol. 24, pp. 53–63.
10. Ito M., Kato K., Sugiharac H., Kichimid T., Songe J., Kurokawa K. A preliminary study on potential for very large-scale photovoltaic power generation (VLS-PV) system in the Gobi desert from economic and environmental viewpoints. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2003, vol. 75, pp. 507–517.
11. Bhargava A. *Developing the Northeast Asia regional energy market*. Manila, ADB, 2017. 14 p.
12. Global Energy Interconnection Development Index 2018. Beijing, *Global Energy Interconnection Development Organisation*, 2018. 112 p.
13. Marchenko O.V., Solomin S.V. Investigation of ecological constraints influence on competitiveness of nuclear power plants. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy, Yadernaya Energetika*, 2015, no. 3, pp. 20–30. In Rus.
14. Marchenko O.V., Solomin S.V. Effect of carbon tax on the competitiveness of power stations in Russia and in some countries of Asia. *Energetik*, 2018, no. 9, pp. 27–30. In Rus.
15. Lilienthal P. *The HOMER micropower optimization model*. Golden, Colorado, National Renewable Energy Laboratory, 2005. 5 p.
16. Lambert T., Gilman P., Lilienthal P. *Micropower system modeling with HOMER*. Available at: <https://www.homerenergy.com/documents/MicropowerSystemModelingWithHOMER.pdf> (accessed 18 January 2019).
17. TRNSYS. *Transient system simulation tool*. Available at: <http://www.trnsys.com> (accessed 18 January 2019).
18. Bhandari B., Poudel S.R., Lee K.-T., Ahn S.-H. Mathematical modeling of hybrid renewable energy system: a review on small

- hydro-solar-wind power generation. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 157–173.
19. Hittinger E., Wiley T., Kluza J., Whitacre J. Evaluating the value of batteries in microgrid electricity systems using an improved Energy Systems Model. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 89, pp. 458–472.
 20. Olatomiwa L., Mekhies S., Ismail M.S., Moghavvemi M. Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 62, pp. 821–835.
 21. Erdinc O., Uzunoglu M. Optimum design of hybrid renewable energy systems: Overview of different approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16, pp. 1412–1425.
 22. Bakić V., Pezo M., Stevanović Ž., Živković M., Grubor B. Dynamical Simulation of PV/Wind Hybrid Energy Conversion System. *Energy*, 2012, vol. 45, no. 1, pp. 324–328.
 23. Huang Q., Shi Y., Wang Y., Lu L., Cui Y. Multi-turbine wind-solar hybrid system. *Renewable Energy*, 2015, vol. 76, no. 4, pp. 401–407.
 24. Marchenko O.V. Mathematical modeling and economic efficiency assessment of autonomous energy systems with production and storage of secondary energy carriers. *International Journal of Low-carbon Technologies*, 2010, vol. 10, no. 5, pp. 250–255.
 25. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of hybrid renewable energy systems in Russia. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2017, vol. 7, no. 4, pp. 1561–1569.
 26. Karamov D.N. Mathematical modeling of solar radiation based on open access long-term meteorological observation data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 28–37. In Rus.
 27. Karamov D.N. Formation of initial meteorological arrays using long-term series FM 12 SYNOP and METAR in system energy studies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 1, pp. 69–88. In Rus.
 28. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Choosing the parameters and analyzing the efficiency of tracking systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 10, pp. 95–106. In Rus.
 29. Boxwell M. *The Solar Electricity Handbook*. 2017 Edition. Birmingham, Greenstream Publ., 2017. 206 p. Available at: <http://solarelectricityhandbook.com/solar-irradiance.html> (accessed 16 January 2019).
 30. Elliott D., Schwartz M., Scott G., Haymes S., Heimiller D., George R. *Wind energy resource atlas of Mongolia*. Colorado, NREL/TP-500-28972, 2001. 215 p.
 31. *World leader in PMDD turbine technology*. Goldwind. Available at: <https://www.goldwindamericas.com/> (accessed 18 January 2019).
 32. Wittenstein M., Rothwell G., Yu C., Defferenes M., Paillere H., Remme U. *Projected costs of generating electricity*. Paris, International Energy Agency/Nuclear Energy Agency, 2015. 215 p.
 33. Marchenko O.V., Solomin S.V. Economic efficiency of renewable energy sources in Russia. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 548–554.

Received: 14 May 2019.

Information about the authors

Oleg V. Marchenko, Cand. Sc, senior researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Sergei V. Solomin, Cand. Sc, senior researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 549.2:553.3/4(571.151)

АКЦЕССОРНЫЕ НИОБИЙ-ТАНТАЛОВЫЕ МИНЕРАЛЫ АЛЕЙСКОГО ГРАНИТНОГО МАССИВА (СЗ РУДНОГО АЛТАЯ)

Новоселов Константин Леонидович,
nkonstantin1@rambler.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Ниобий-танталовая акцессорная минерализация гранитоидов представляется важным дополнительным индикаторным признаком выявления потенциальной редкометальной рудоносности лейкогранитов – производных заключительной фазы становления полифазного Алейского гранитоидного массива (D_{2-3}).

Цель исследования включает установление форм нахождения ниобия и тантала, а также сопутствующих им других редких элементов, изучение распространенности и возможностей использования их в качестве минералов-индикаторов условий формирования лейкогранитов.

Методы исследования включают традиционные минералого-петрографические, изучение видового состава акцессорных минералов в искусственных протоколках, начальный вес которых составлял 5...8 кг; аналитические исследования минералов выполнены в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) на электронном сканирующем микроскопе JSM-6510LV (Jeol Ltd) с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350+ (аналитик мл. науч. сотр. М. В. Хлестов) и на рентгено-флуоресцентном микроскопе (отделение геологии Инженерной школы природных ресурсов ТПУ, аналитик канд. геол.-минер. наук Рудмин М.А.).

Результаты. Установлены две формы нахождения ниобия и тантала в лейкограните Алейского массива: 1) структурная примесь в титаните, цирконе, апатите; 2) самостоятельные минералы ниобия и тантала – ильменорутил, колумбит. Концентрации ниобия обычно резко доминируют над концентрациями тантала. Специфическая особенность химизма акцессорного колумбита – высокая железистость, и повышенные концентрации примесного скандия соответствуют редкой разновидности – скандистому ферроколумбиту. Выделение минералов ниобия – ильменорутила и колумбита – происходило на постмагматическом этапе становления лейкогранитного интрузива в щелочную стадию автометасоматоза, причем ильменорутил по отношению к колумбиту является более ранним минералом.

Ключевые слова:

Рудный Алтай, гранитоиды, акцессорные минералы, ильменорутил, колумбит.

Введение

Алейский гранитоидный массив, площадью около 300 кв. км, расположен в пределах северной части Алейского поднятия, прорывает и метаморфизует терригенные отложения силурийско-нижнедевонской корбалихинской толщи. Массив имеет сложное полифазное строение с гомотромной последовательностью становления магматических тел – от габброидов ранней фазы до лейкогранитов заключительной четвертой, объединенных в составе средне-позднедевонского алейско-змеиногорского гранитоидного комплекса. Наибольшую часть площади массива занимают лейкограниты четвертой интрузивной фазы и по своим петрохимическим показателям отвечают гранитоидам А-типа [1].

Для лейкогранитов характерна несколько варьирующая структура от средне-крупнозернистой и слабо порфирированной до мелкозернистой и аплитовидной. Идиоморфные кристаллы плагиоклаза проявляют слабо выраженную зональность с постепенным переходом от олигоклаз-андезиновое ядро к олигоклаз-альбитовой периферии. Калиевый полевой шпат представлен микроклином, который часто образует пертитовые каемки вокруг зерен плагиоклаза. Количественные соотношения микроклина и плагиоклаза непостоянны и варьируют от незначительного преобладания плагиоклаза до заметного доминирования микроклина. Темноцветные минералы представлены железистым биотитом, реже отмечается зеленая роговая обманка. Ведущая ассоциация акцессорных мине-

ралов – титаномagnetит, ильменит, алланит, рутил, апатит, гематит, сфен, спессартин; в единичных зернах отмечаются ксенотим, циркон, монацит, турмалин, топаз, а также ильменорутил.

Результаты исследования

Ильменорутил и единичные зерна колумбита отмечены в электромагнитной фракции совместно с ильменитом, титаномagnetитом, рутилом, алланитом, спессартином. Подобная ассоциация акцессорных минералов отмечается в гранитоидах А-типа [2]. Зерна ильменорутила изометрической таблитчатой формы, размером 0,1...0,25 мм (рис. 1).

Исследование химического состава ильменорутила проведено в шести его зернах, каждое из которых анализировалось в 3–4 точках – в краевых и центральных частях. В химическом составе ильменорутила (табл. 1) содержания главных минералообразующих компонентов (TiO_2 , FeO , Nb_2O_5 , Ta_2O_5) находятся в рамках его теоретического состава, приводимого в справочных руководствах [3, 4] и в работах предыдущих исследователей [5, 6]. В качестве примесей постоянно присутствует ванадий, а в отдельных зернах эпизодически устанавливается кремний. Особенности химического состава минерала сводятся к следующему.

1. Содержания ниобия в ильменорутиле резко доминируют над танталом, коэффициент Ta_2O_5/Nb_2O_5 варьирует в широких пределах (0,05...0,31), в отдельных точках профиля зерна Ta не устанавлива-

ется, что подчеркивает его низкие концентрации и неравномерность распределения даже в пределах одного зерна.

- Ильменорутит характеризуется обогащенностью титаном относительно количества ниобия и тантала ($(\text{Nb}_2\text{O}_5+\text{Ta}_2\text{O}_5)/\text{TiO}_2=0,16\ldots0,32$).
- Ванадий в качестве структурной примеси ($\text{V}^{5+}\leftrightarrow\text{Nb}^{5+}$) в ильменорутите присутствует посто-

янно (0,34...0,89 %), в отдельных зернах содержание этого элемента повышается до 1,15 %. Повышенные содержания примеси V в ильменорутите из гранитных пегматитов Среднего Урала отмечается многими исследователями [7, 8].

Кремний в качестве примеси фиксируется в отдельных точках зерен ильменорутита (0,36...0,88 %) и, видимо, является неструктурной примесью.

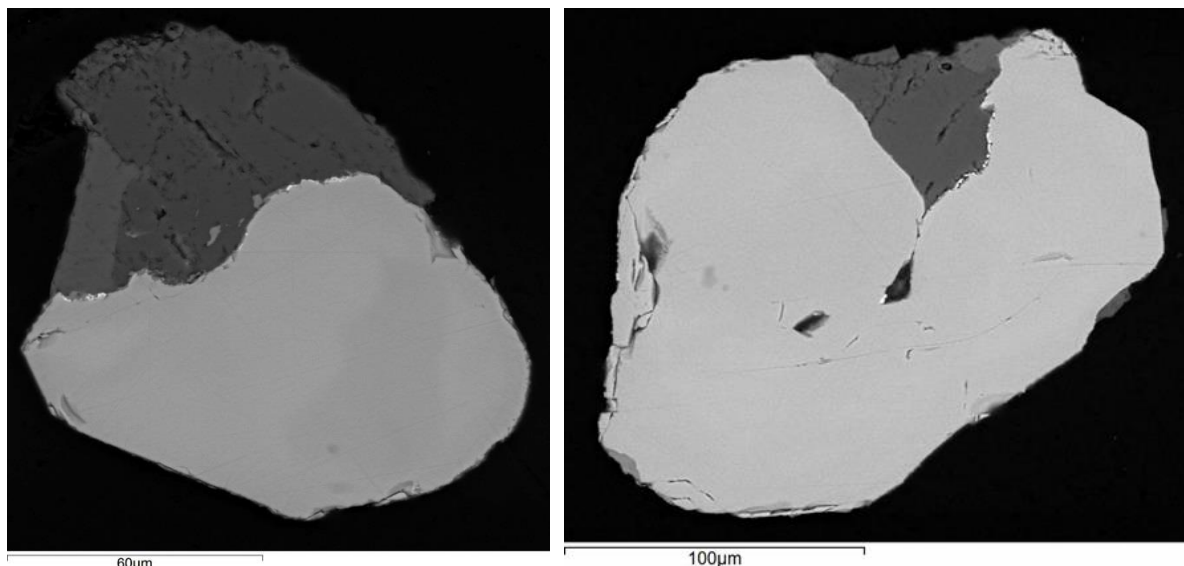


Рис. 1. Форма зерен ильменорутита. Здесь и на последующих рисунках изображение в обратно рассеянных электронах
Fig. 1. Grain shape of ilmenorutile. In all figures – backscattered electron image

Таблица 1. Химический состав ильменорутита (мас. %)

Table 1. Ilmenorutile chemical composition, wt. %

№ п.п Ordinal number	FeO _{общ} FeO _{ген}	TiO ₂	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	V ₂ O ₅	SiO ₂	Сумма Total	Ta ₂ O ₅ Nb ₂ O ₅	$\frac{\text{Nb}_2\text{O}_5+\text{Ta}_2\text{O}_5}{\text{TiO}_2}$
Зерно 1/Grain 1									
1	8,1	74,75	16,34	1,18	0,82	–	101,2	0,07	0,23
2	8,48	73,33	17,81	0,9	0,57	–	101,1	0,05	0,26
3	8,61	71,29	17,54	2,92	0,51	–	100,9	0,17	0,28
4	8,05	72,33	16,91	2,65	0,41	0,68	101,03	0,16	0,27
X	8,31	72,93	17,15	1,91	0,58	–	101,31	0,11	0,26
Зерно 2/Grain 2									
5	7,27	75,78	14,46	2,52	0,69	0,45	101,17	0,17	0,22
6	9,01	69,04	19,71	2,47	0,43	–	100,66	0,13	0,32
7	7,62	75,2	15,18	2,44	0,69	0,36	101,49	0,12	0,23
8	8,94	70,46	16,88	4,69	0,34	–	101,31	0,28	0,31
X	8,21	72,62	16,56	3,03	0,54	0,41	101,16	0,175	0,27
Зерно 3/Grain 3									
9	7,81	73,69	15,32	2,42	0,65	–	99,89	0,16	0,24
10	8,1	72,86	14,26	4,36	0,54	–	100,12	0,31	0,25
11	8,89	72,34	18,71	–	0,59	–	100,53	–	0,26
X	8,27	72,96	16,09	3,39	0,59	–	100,18	0,235	0,25
Зерно 4/Grain 4									
12	9,25	68,87	19,03	3,19	0,56	0,79	101,69	0,17	0,3
13	8,44	73,14	17,21	1,59	0,47	0,41	101,26	0,09	0,26
14	8,39	73,33	17,17	1,67	0,41	–	100,97	0,1	0,26
X	8,69	71,78	17,80	2,15	0,48	0,60	101,31	0,12	0,27
Зерно 5/Grain 5									
15	8,14	72,33	17,12	2,48	0,56	–	100,63	0,14	0,27
16	8,67	72,64	17,28	2,17	0,49	–	101,25	0,13	0,26
X	8,41	72,49	17,2	2,33	0,53	–	100,94	0,135	0,265
Зерно 6/Grain 6									
17	7,24	78,25	12,73	–	1,14	0,88	100,24	–	0,16
18	6,97	78,32	12,86	–	0,89	0,75	99,79	–	0,16
19	7,24	78,57	12,75	1,71	0,77	–	101,04	0,13	0,18
X	7,15	78,38	12,78	–	0,93	0,82	100,36	–	0,17

Кристаллохимические формулы ильменорутита (номер формулы соответствует порядковому номеру анализа):

3. $\text{Fe}_{0,315}\text{Ti}_{2,347}(\text{Nb}_{0,347}\text{Ta}_{0,035}\text{V}_{0,015})_{0,397}\text{O}_6$
5. $\text{Fe}_{0,262}\text{Ti}_{2,456}(\text{Nb}_{0,282}\text{Ta}_{0,03}\text{V}_{0,02})_{0,332}\text{O}_6$
9. $\text{Fe}_{0,285}\text{Ti}_{2,42}(\text{Nb}_{0,302}\text{Ta}_{0,029}\text{V}_{0,019})_{0,35}\text{O}_6$
11. $\text{Fe}_{0,322}\text{Ti}_{2,359}(\text{Nb}_{0,367}\text{V}_{0,017})_{0,384}\text{O}_6$
17. $\text{Fe}_{0,262}\text{Ti}_{2,553}(\text{Nb}_{0,22}\text{V}_{0,033})_{0,253}\text{O}_6$

В формулах ильменорутита несколько завышен коэффициент железа вследствие использования в пересчете $\text{FeO}_{\text{общ}}$, без разделения на FeO и Fe_2O_3 .

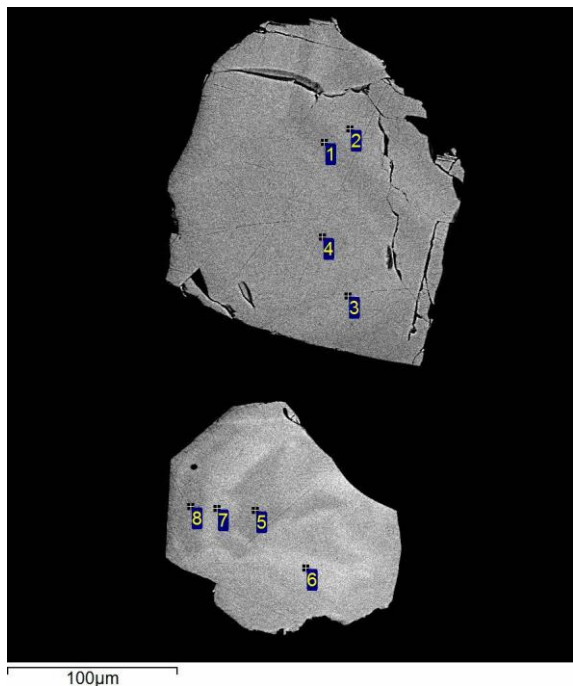


Рис. 2. Зональные зерна ильменорутита. Номера точек на рисунке соответствуют номерам анализов в табл. 2

Fig. 2. Zonal grains of ilmenorutile. The numbers of points in the figure correspond to the numbers of analyzes in table 2

На отдельных кристаллах ильменорутита проявляется зональное строение в виде чередования «свет-

лых» и «темных» полос с несколько расплывчатыми границами (рис. 2).

Кристаллохимические формулы:

«Темные» зоны

1. $\text{Fe}_{0,256}\text{Ti}_{2,472}(\text{Nb}_{0,282}\text{V}_{0,022}\text{Ta}_{0,017})_{0,321}\text{O}_6$
4. $\text{Fe}_{0,273}(\text{Ti}_{2,471}\text{Al}_{0,018})_{2,489}(\text{Nb}_{0,28}\text{Ta}_{0,023})_{0,303}\text{O}_6$
5. $\text{Fe}_{0,314}\text{Ti}_{2,376}(\text{Nb}_{0,343}\text{Ta}_{0,012}\text{V}_{0,019})_{0,374}\text{O}_6$
8. $\text{Fe}_{0,3}\text{Ti}_{2,406}(\text{Nb}_{0,321}\text{Ta}_{0,019}\text{V}_{0,015})_{0,355}\text{O}_6$

«Светлые» зоны

2. $\text{Fe}_{0,266}\text{Ti}_{2,476}(\text{Nb}_{0,268}\text{Ta}_{0,028}\text{V}_{0,016})_{0,312}\text{O}_6$
3. $\text{Fe}_{0,284}\text{Ti}_{2,453}(\text{Nb}_{0,279}\text{Ta}_{0,034}\text{V}_{0,011})_{0,324}\text{O}_6$
6. $\text{Fe}_{0,314}\text{Ti}_{2,364}(\text{Nb}_{0,324}\text{Ta}_{0,046}\text{V}_{0,014})_{0,384}\text{O}_6$
7. $\text{Fe}_{0,304}\text{Ti}_{2,378}(\text{Nb}_{0,33}\text{Ta}_{0,03}\text{V}_{0,016})_{0,376}\text{O}_6$

Химический состав «светлых» и «темных» зон ильменорутита несколько отличается концентрациями минералообразующих компонентов: в «светлых» зонах вдвое выше содержание тантала, также несколько повышена кремнеземистость, снижена титанистость (табл. 2).

По краю зерен ильменорутита, а также в их трещинках и пустотках часто наблюдаются включения агрегатов зерен альбита, кварца, ниобий-содержащего титани-
та – $\text{Ca}_{1,159}(\text{Ti}_{0,793}\text{Nb}_{0,179}\text{Fe}_{0,066})_{1,038}[(\text{Si}_{0,729}\text{Al}_{0,189})_{0,918}\text{O}_4]\text{O}$.

В единичном зерне ильменорутита в пустотке и по его периферии отмечено два кристалла ксенотима (рис. 3), редкоземельного, уран-ториевого по составу. Кристаллохимическая формула ксенотима: $(\text{Y}_{0,662}\text{Dy}_{0,061}\text{Yb}_{0,043}\text{Er}_{0,035}\text{Gd}_{0,033}\text{Ca}_{0,03}\text{Ti}_{0,024}\text{U}_{0,014}\text{Th}_{0,01})_{0,912}(\text{P}_{0,979}\text{Si}_{0,06})_{1,039}\text{O}_4$.

Колумбит, как и ниобиевый титанит, образует вроски кристаллов, приуроченных к трещинкам и пустоткам зерна ильменорутита (рис. 4). Подобные включения зерен колумбита в ильменорутите отмечаются в работах ряда исследователей редкометалльных гранитоидов и пегматитов Южного Урала [9–13]. Один кристалл колумбита, размером около 14 мкм, имеет идиоморфную, близкую к прямоугольной, форму с отходящими «ответвлениями» в матрицу ильменорутита, второе зерно, размером около 20 мкм, с неровными извилистыми краями вместе с титанитом выполняет пустотку в ильменорутите (рис. 4).

Таблица 2. Химический состав зональных кристаллов ильменорутита (мас. %)

Table 2. Chemical composition of zonal crystals of ilmenorutile, wt. %

№ зон Zone number	$\text{FeO}_{\text{общ}}$ $\text{FeO}_{\text{ген}}$	TiO_2	Nb_2O_5	Ta_2O_5	V_2O_5	SiO_2	Сумма Total	$\frac{\text{Ta}_2\text{O}_5}{\text{Nb}_2\text{O}_5}$	$\frac{\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{Ta}_2\text{O}_5}{\text{TiO}_2}$
«темные» зоны/«dark» zones									
1	7,14	76,45	14,49	1,42	0,76	–	100,26	0,098	0,21
4	7,56	76,23	14,38	1,98	–	0,34	100,49	0,138	0,21
5	8,65	72,84	17,52	1,0	0,6	0,32	100,93	0,057	0,25
8	8,29	73,89	16,41	1,61	0,51	–	100,71	0,098	0,24
\bar{X}	7,91	74,85	15,7	1,5	0,62	0,33	100,60	0,096	0,23
«светлые» зоны/«light-coloured» zones									
2	7,33	75,95	13,69	2,39	0,57	0,63	100,56	0,175	0,21
6	8,52	71,39	16,28	3,82	0,47	0,88	101,36	0,235	0,28
7	8,36	72,63	16,75	2,95	0,57	0,64	101,9	0,176	0,27
3	7,9	75,75	14,31	2,91	0,4	–	101,27	0,203	0,23
\bar{X}	8,0	73,93	15,26	3,02	0,5	0,72	101,27	0,198	0,25

Примечание. Номер в таблице соответствует точкам анализа зон ильменорутита, обозначенным на рис. 2.

Note. The number in the table corresponds to the points of analysis of the ilmenorutile zones indicated in Fig. 2.

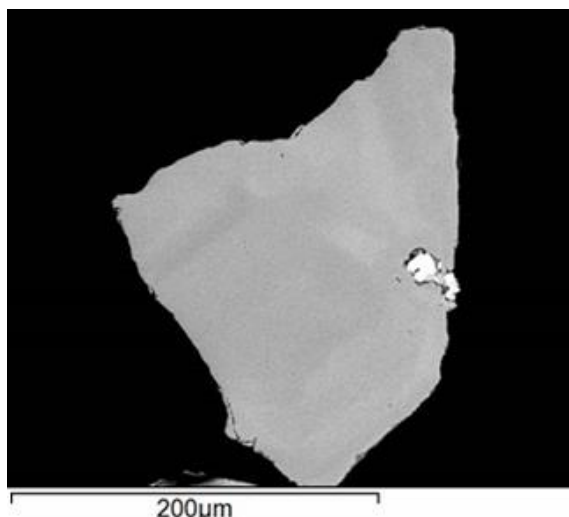


Рис. 3. Включения кристаллов ксенотима (белое) в зерне ильменорутила

Fig. 3. Inclusions of xenotime crystals (white) in ilmenorutile grain

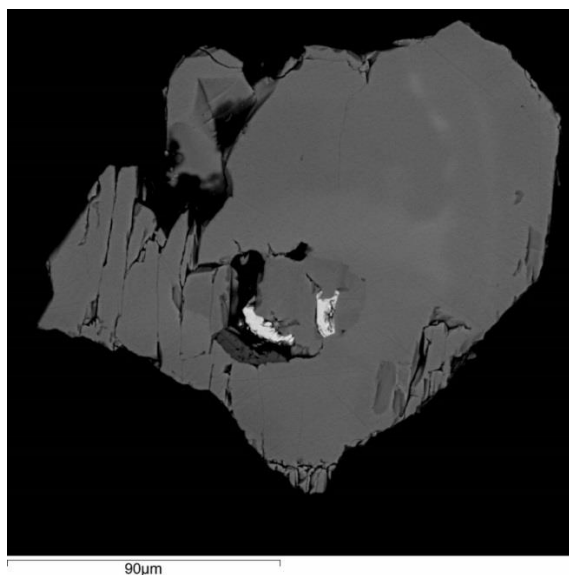


Рис. 4. Включения зерен колумбита (белое) в пустотах и трещинах зерна ильменорутила

Fig. 4. Inclusions of columbite grains (white) in voids and fissures of ilmenorutile grain

В химическом составе колумбита (табл. 3) ниобий резко доминирует над танталом, коэффициент тантал-ниобиевого отношения варьирует (0,012...0,014) при неизменно низком содержании тантала (0,81...0,84 %). Преобладание Nb над Ta типично для акцессорных колумбитов гранитоидов [14–17]. Для колумбита характерны железистость (17,64...19,16 %) и весьма низкая марганцовистость (0,19...0,3 %), коэффициент отношения Mn/(Mn+Fe) не превышает 0,01...0,02. Постоянно присутствует и в повышенных количествах (6,14...10,01 %) примесь титана, изоморфно замещающего ниобий (по схеме $Ti^{4+} \leftrightarrow Nb^{5+}$). Обращает внимание постоянное присутствие в повышенных количествах скандия (1,03...1,84 %), образующего структурную примесь по схеме $Sc^{3+} \leftrightarrow Fe^{2+}$ [18]. Дру-

гие примесные элементы (Al, Si, Ca) по их концентрации в составе колумбита не значительны.

Таким образом, по составу и степени насыщенности примесными элементами изучаемый минерал отвечает редкой разновидности – скандистому ферроколумбиту [3], и его кристаллохимические формулы следующие:

1. $(Fe_{0,884}Sc_{0,050}Ca_{0,021}Mn_{0,009})_{0,964}(Nb_{1,789}Ti_{0,255}Ta_{0,012})_{2,056}O_6$
2. $(Fe_{0,878}Sc_{0,071}Ca_{0,024}Mn_{0,015})_{0,988}(Nb_{1,654}Ti_{0,403}Ta_{0,013})_{2,07}O_6$
3. $(Fe_{0,871}Sc_{0,058}Mn_{0,009}Ca_{0,008})_{0,946}(Nb_{1,685}Ti_{0,392}Ta_{0,012})_{2,089}O_6$
4. $(Fe_{0,904}Sc_{0,092}Mn_{0,013})_{1,009}(Nb_{1,617}Ti_{0,434}Ta_{0,013})_{2,064}O_6$

Кроме самостоятельных минеральных форм ниобий в качестве изоморфной примеси установлен в цирконе (2,53...2,83 %), рутиле (5,05...9,64 %), ильмените (0,03...0,7 %), тантал концентрируется в апатите (0,48...0,51 %), ильмените (0,01...0,07 %) [19].

Обсуждение результатов исследования и выводы

Изучаемые лейкограниты представляют собой производные четвертой, заключительной фазы становления гранитоидов алейско-змеиногорского комплекса (D_{2-3}). В составе акцессорных минералов лейкогранитов наибольшие весовые количества образуют минералы железа и титана – титаномагнетит, гематит, ильменит, рутил, титанит, а также присутствуют минералы редких и редкоземельных металлов – ильменорутил, колумбит, ксенотим.

Видовой состав раннемагматических акцессорных минералов – циркон, апатит, ильменит, рутил, титаномагнетит, титанит, а также содержание в них примесных редких элементов позволяет сделать вывод о присутствии в расплаве рудных, редкометаллических, редкоземельных элементов – Ti, Fe, V, Zr, Nb, Ta, а также U, Th. На магматическом этапе Nb^{5+} и Ta^{5+} образовывали изоморфную примесь в цирконе, апатите, титаните, ильмените, магнетите; не вошедшие в решётки ранних акцессорных минералов Nb и Ta накапливались в остаточном расплаве. В постмагматическую стадию формирования гранитоидов проявился щелочной автометасоматоз, который хорошо подтверждается использованием отношений петрогенных оксидов [20]. Согласно рассчитанным отношениям, гранитоиды разделились на две группы: 1 – лейкограниты, «незатронутые» процессом автометасоматоза, и 2 – лейкограниты, подвергшиеся автометасоматозу, который проявился в их альбитизации и калишпатизации. Акцессорные минералы ниобия – ильменорутил и колумбит, присутствуют лишь в метасоматически измененных лейкогранитах.

Формы зерен ильменорутила, близкие к кристаллогранным, распространенность зональных индивидов, постоянно присутствующая примесь ванадия указывают на его более раннюю стадию постмагматической кристаллизации и обогащенность остаточного метасоматического раствора редкими металлами – Nb, Ta, V, Ti и др. Разброс величин ниобий-танталового отношения в ильменорутиле, присутствие зональных его индивидов свидетельствует о меняющемся режиме щелочности – кислотности метасоматизирующего раствора. Повышенная щелочность остаточного раствора обусловила доминирование Nb над Ta.

Таблица 3. Химический состав колумбита (мас. %)

Table 3. Columbite chemical composition, wt. %

№ п.п. Ordinal number	FeO _{общ} FeO _{ген}	MnO	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	TiO ₂	Sc ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Сумма Total	Ta ₂ O ₅ Nb ₂ O ₅
1	19,16	0,19	71,77	0,83	6,14	1,03	0,35	—	0,36	99,83	0,012
2	17,64	0,3	61,47	0,82	9,01	1,37	0,38	0,51	0,56	92,04	0,013
3	18,94	0,19	67,78	0,81	9,47	1,2	0,14	0,28	0,28	99,09	0,012
4	18,78	0,26	62,1	0,84	10,01	1,84	—	0,32	0,47	94,62	0,014

Скандистый ферроколумбит, кристаллы которого выполняют трещинки и пустоты в зернах ильменорутита, выделился на заключительном этапе щелочного автометасоматоза в условиях высокой активности Sc, Ti, Fe, Ca, редких и редкоземельных элементов, а также урана и тория.

Таким образом, в постмагматическую стадию формирования лейкогранитов алейско-змеиногорского комплекса проявился щелочной автометасоматоз, в результате которого образовались ильменорутит, скандистый ферроколумбит, уран-ториевый редкоземельный ксенотим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туркин Ю.А., Новоселов К.Л. Петролого-геохимические особенности девонских гранитоидов северо-западной части Рудного Алтая // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 5–15.
2. Petrogenesis and geodynamic implications of Ediacaran highly fractionated A-type granitoids in the north Arabian-Nubian Shield (Egypt): constraints from whole-rock geochemistry and Sr-Nd isotopes / M. Sami, Th. Ntaflos, E.S. Farahat, H.A. Mohamed, Ch. Hauzenberger, A.F. Ahmed // Lithos. – 2018. – V. 304–307. – P. 329–346.
3. Солодов Н.А., Семенов Е.И., Бурков В.В. Геологический справочник по тяжелым литофильным редким металлам / под ред. Н.П. Лаверова. – М.: Недра, 1987. – 438 с.
4. Минералы (справочник). Т. II. Вып. 2. Простые окислы / под ред. Ф.В. Чухрова, Э.М. Бонштедт-Куплетской. – М.: Наука, 1965. – 342 с.
5. Niobian rutile from the McGuire granitic pegmatite, Park County, Colorado: solid solution, exsolution, and oxidation / P. Černý, R. Chapman, W.B. Simmons, L.E. Chackowsky // American Mineralogist. – 1999. – V. 84. – P. 754–763.
6. Subsolidus behavior of niobian rutile from Věžná, Czech Republic: a model for exsolutions in phases with Fe²⁺→Fe³⁺ / P. Černý, M. Novák, R. Chapman, M. Masau // Journal of the Czech Geological Society. – 2000. – № 45/1–2. – P. 21–35.
7. Гракова О.В. Акцессорный ильменорутит из алмазодержащих среднедевонских пород Южного Тимана // Вестник. – 2011, октябрь. – № 10. – С. 11–13.
8. Редкометалльная минерализация гранитных пегматитов Режевского района на Среднем Урале / В.И. Попова, В.А. Губин, Е.И. Чурин, В.А. Котляров, В.В. Хиллер // Записки Российского минералогического общества. – 2013. – Ч. CXLII. – № 1. – С. 23–38.
9. Ферроколумбит-ильменорутитовые графические сростания из гранитных пегматитов Миассово-Таткульского жильного поля Ильменских гор / В.И. Попова, А.А. Леванов, В.А. Попов, Л.Н. Поспелова // Уральское отделение РАН, Уральский минералогический сборник. – 2001. – № 11. – С. 14–21.
10. Савельева В.Б., Базарова Е.П., Карманов Н.С. Акцессорные минералы Приморского комплекса гранитов рапакиви (Западное Прибайкалье) // Записки Российского минералогического общества. – 2011. – Ч. CXXX. – № 2. – С. 38–58.
11. Макеев А.Б., Борисовский С.Е. Типоморфизм и источники титановых и ниобиевых минералов проявления Ичетью, Средний Тиман // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 2013. – № 2. – С. 30–37.
12. Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Хиллер В.В. Ниобиевая минерализация гранитных пегматитов Липовского жильного поля (Средний Урал) // Труды Института геологии и геохимии Уральского отделения Российской Академии наук. – 2014. – Вып. 161. – С. 253–256.
13. Titaniferous heavy mineral aggregates as a tool in exploration for pegmatitic and aplitic rare-metal deposits (SE Germany) / H.G. Dill, B. Weber, F. Melcher, W. Wiesner, A. Müller // Ore Geology Reviews. – 2014. – V. 57. – P. 29–52.
14. London D. Ore-forming processes within granitic pegmatites // Ore Geology Reviews. – 2018. – V. 101. – P. 343–383.
15. Mineralogical and chemical evolution of tantalum-(niobium-tin) mineralisation in pegmatites and granites. P. 2: Worldwide examples (excluding Africa) and an overview of global metallogenetic patterns / F. Melcher, T. Graupner, H.-E. Gäbler, M. Sitnikova, T. Oberthür, A. Gerdes, E. Badanina, T. Chudy // Ore Geology Reviews. – 2017. – V. 89. – P. 946–987.
16. Petrogenesis of syn-orogenic rare metal pegmatites in the Chinese Altai: evidences from geology, mineralogy, zircon U-Pb age and Hf isotope / Zheng-Hang Lv, Hui Zhang, Yong Tang, Yun-Long Liu, Xin Zhang // Ore Geology Reviews. – 2018. – V. 95. – P. 161–181.
17. Mineralogical and geochemical characteristics of the Miaoya REE prospect, Qinling Orogenic Belt, China: insights from Sr-Nd-C-O isotopes and LA-ICP-MS mineral chemistry / D. Zhang, Y. Liu, J. Pan, T. Dai, R.C. Bayless // Ore Geology Reviews. – 2019. – V. 210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.05.018>
18. Макаров Е.С. Изоморфизм атомов в кристаллах. – М.: Атомиздат, 1973. – 288 с.
19. Новоселов К.Л., Гаврилова К.А. Типоморфические особенности акцессорного ильменита в гранитоидах полифазного Алейско-Змеиногорского комплекса (Н-В Рудный Алтай) // MATEC Web of Conferences. – 2016. – V. 85: Chemistry and Chemical Technology in XXI Century (CCT 2016). – 4 p.
20. Кудрин В.С., Кудрина М.А., Шурыга Т.Н. Редкометалльные метасоматические образования, связанные с субщелочными гранитоидами // Геология месторождений редких элементов. – М.: Недра, 1965. – Вып. 25. – 147 с.

Поступила 18.06.2019 г.

Информация об авторах

Новоселов К.Л., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

UDC 549.2:553.3/.4(571.151)

ACCESSORY NIOBIUM-TANTALUM MINERALS OF THE ALEISK GRANITE MASSIF (N-W RUDNY ALTAY AREA)

Konstantin L. Novoselov,
nkonstantin1@rambler.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance of the research. Accessory niobium-tantalum mineralization of granitoids is an important additional feature at detecting potential rare-metal ore content of leucogranites, which are the derivatives of the final stage of polyphase Aleisk granitoid massif (D_{2-3}) formation.

The aim of the research is to discover the forms of niobium and tantalum occurrence as well as the other corresponding rare elements. It includes investigation of their spread and possibilities for their usage as minerals-indicators for conditions of leucogranite formation.

Methods: traditional mineralogical and petrographic studies of accessory mineral composition in artificial crushed samples, the initial weight of which is about 5–8 kg. Analytical investigation of minerals is performed in the Institute of Geology and Mineralogy (SB RAS, Novosibirsk), using an electronic scanning microscope JSM–6510LV (Jeol Ltd) with an energy dispersive spectrometer INCA Energy 350+ (the analyst M.V. Khlestov, junior research scientist). X-ray fluorescent microscope is used (the Division for Geology, School of Earth Science and Engineering, TPU, the analyst M.A. Rudmin, Cand. Sc.).

Results. Two forms of niobium and tantalum occurrence are discovered in the leucogranite of the Aleisk massif: 1) structural impurity in titanite, zircon, and apatite; 2) individual minerals of niobium and tantalum – ilmenorutile and columbite. Usually niobium concentrations dominate distinctly over tantalum. The striking feature of chemistry of accessory columbite is its high ferruginosity, and enhanced concentrations of impurity scandium correspond to a rare type – scandium ferrocolumbite. Crystallization of niobium minerals (ilmenorutile and columbite) occurred at the post-magmatic period of leucogranite intrusive formation during the alkali stage of autometasomatism. Notably, ilmenorutile is an older mineral in regard to columbite.

Key words:

Rudny Altay, granitoids, accessory minerals, ilmenorutile, columbite.

References

1. Turkin Yu.A., Novoselov K.L. Petrological and geochemical features of Devonian granitoids in north-west part of Rudny Altai. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 5–15. In Rus.
2. Sami M., Ntaflou Th., Farahat E.S., Mohamed H.A., Hauzenberger Ch., Ahmed A.F. Petrogenesis and geodynamic implications of Ediacaran highly fractionated A-type granitoids in the north Arabian-Nubian Shield (Egypt): Constraints from whole-rock geochemistry and Sr-Nd isotopes. *Lithos*, 2018, vol. 304–307, pp. 329–346.
3. Solodov N.A., Semenov E.I., Burkov V.V. *Geologicheskii spravochnik po tyazhelym litofilnym redkim metallam* [Geological reference book on heavy lithophile rare metals]. Ed. by N.P. Laverov. Moscow, Nedra Publ., 1987. 438 p.
4. *Mineraly. Spravochnik* [Minerals. Reference book]. Vol. II. Iss. 2. Prostye okisly [Simple oxides]. Eds. F.V. Chukhrov, E.M. Bonshtedt-Kupletskaya. Moscow, Nauka Publ., 1965. 342 p.
5. Černý P., Chapman R., Simmons W.B., Chackowsky L.E. Niobian rutile from the McGuire granitic pegmatite, Park County, Colorado: Solid solution, exsolution, and oxidation. *American Mineralogist*, 1999, vol. 84, pp. 754–763.
6. Černý P., Novák M., Chapman R., Masau M. Subsolidus behavior of niobian rutile from Věžná, Czech Republic: a model for exsolutions in phases with $Fe^{2+}>Fe^{3+}$. *Journal of the Czech Geological Society*, 2000, no. 45/1–2, pp. 21–35.
7. Grakova O.V. Accessory ilmenorutile of diamondiferous middledevonian deposits of South Timan. *Vestnik*, October, 2011, no. 10, pp. 11–13. In Rus.
8. Popova V.I., Gubin V.A., Churin E.I., Kotlyarov V.A., Hiller V.V. Rare metal mineralization in granite pegmatites of Rezhevsky area at the Middle Urals. *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, 2013, Pt. CXLII, no. 1, pp. 23–38. In Rus.
9. Popova V.I., Levanov A.A., Popov V.A., Pospelova L.N. Ferrocolumbite-ilmenorutile graphic intergrowth from the Tatkul-Miassovo field granite pegmatite, Ilmen Mountains. *Ural'skiy mineralogicheskii sbornik*, 2001, no. 11, pp. 14–21. In Rus.
10. Saveleva V.B., Bazarova E.P., Karmanov N.S. Accessory minerals of the Primorsky rapakivi granite complex (The West Baikal region). *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, 2011, Pt. CXXXX, no. 2, pp. 38–58. In Rus.
11. Makeev A.B., Borisovskiy S.E. Tipomorfizm i istochniki titanovykh i niobievyykh mineralov proyavleniya Ichetyu, Sredniy Timan [Typomorphism and sources of titanium and niobic minerals of Ichetue deposit, Middle Timan]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 2013, no. 2, pp. 30–37.
12. Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Hiller V.V. Niobievaya mineralizatsiya granitnykh pegmatitov Lipovskogo zhilnogo polya (Sredniy Ural) [Niobic mineralization of Lipovsky vien field granitic pegmatites (Middle Ural)]. *Trudy Instituta geologii i geokhimii Uralskogo otdeleniya Rossiyskoy Akademii nauk*, 2014, Iss. 161, pp. 253–256.
13. Dill H.G., Weber B., Melcher F., Wiesner W., Müller A. Titaniferous heavy mineral aggregates as a tool in exploration for pegmatitic and aplitic rare-metal deposits (SE Germany). *Ore Geology Reviews*, 2014, vol. 57, pp. 29–52.
14. London D. Ore-forming processes within granitic pegmatites. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 101, pp. 343–383.
15. Melcher F., Graupner T., Gäbler H.-E., Sitnikova M., Oberthür T., Gerdes A., Badanina E., Chudy T. Mineralogical and chemical evolution of tantalum-(niobium-tin) mineralisation in pegmatites and granites. P. 2: Worldwide examples (excluding Africa) and an overview of global metallogenetic patterns. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 89, pp. 946–987.
16. Zheng-Hang Lv, Hui Zhang, Yong Tang, Yun-Long Liu, Xin Zhang. Petrogenesis of syn-orogenic rare metal pegmatites in the Chinese Altai: Evidences from geology, mineralogy, zircon U-Pb age and Hf isotope. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 95, pp. 161–181.
17. Zhang D., Liu Y., Pan J., Dai T., Bayless R.C. Mineralogical and geochemical characteristics of the Miaoya REE prospect, Qinling Orogenic Belt, China: insights from Sr-Nd-C-O isotopes and LA-ICP-MS mineral chemistry. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.05.018>
18. Makarov E.S. *Izomorfizm atomov v kristallakh* [Isomorphism of atoms in crystals]. Moscow, Atomizdat Publ., 1973. 288 p.

19. Novoselov K.L., Gavrilova K.A. Typomorphic characteristic features of accessory ilmenite in granitoids of the polyphase Aleisk-Zmeinogorsk complex (N-W Rudny Altai area). *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 85: Chemistry and Chemical Technology in XXI Century (CCT 2016), 4 p.
20. Kudrin V.S., Kudrina M.A., Shuryaga T.N. Redkomatnlnye metasomaticheskie obrazovaniya, svyazannye s subshchelochnymi granitoidami [Rare metals metasomatic formations related to subalkalic granitoids]. *Geologiya mestorozhdeniy redkikh elementov* [Geology of the rare elements deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1965. Iss. 25, 147 p.

Received: 18 June 2019.

Information about the authors

Konstantin L. Novoselov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК622.271

ОЦЕНКА ВАРИАНТОВ ОТРАБОТКИ ПРИБОРТОВЫХ И ПОДКАРЬЕРНЫХ ЗАПАСОВ РУДНИКА «ОЛЕНИЙ РУЧЕЙ»

Немова Наталья Анатольевна¹,
nemova-nataly@mail.ru

Бельш Татьяна Александровна¹,
tata0303@bk.ru

¹ Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 54.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью отработки новых рудных тел, появившихся в ходе проведения опережающей эксплуатационной разведки. За проектными контурами рудников остаются запасы, которые необходимо доработать либо подземным, либо комбинированным способами. При технологии доработки прикарьерных запасов возникают наибольшие сложности, поскольку их отработка вызывает нарушение обеспечения устойчивости откосов борта карьера. Поэтому поиск, выбор и определение главных параметров системы разработки прикарьерных запасов при доработке месторождений, обеспечивающих эффективное и безопасное освоение запасов, представляет весьма актуальную задачу.

Цель: рассмотреть возможные варианты отработки прибортовых и подкарьерных запасов с учетом залегания новых рудных тел апатит-нефелинового месторождения и соблюдением необходимых условий для заданного направления развития горных работ в границах горного отвода и произвести технико-экономическую оценку предложенных вариантов.

Объект: крупное месторождение апатит-нефелиновых руд «Олений ручей».

Методы: горно-геологический анализ верхнего яруса месторождения апатит-нефелиновых руд «Олений ручей» и анализ существующих данных о физико-механических свойствах горных пород, слагающих массив рассматриваемого месторождения, анализ возможных схем развития горных работ при отработке прикарьерных запасов с оценкой возможности внутреннего отвалообразования при доработке карьера.

На примере разработки месторождения апатит-нефелиновых руд «Олений ручей» авторами рассмотрены возможные варианты отработки и вскрытия прибортовых и подкарьерных запасов верхнего яруса месторождения с соблюдением условий развития горных работ в границах горного отвода. Предложено оптимальное развитие горных работ по варианту, предусматривающему минимальный коэффициент вскрыши.

Ключевые слова:

Прибортовые и подкарьерные запасы, рудные тела, схемы вскрытия, доработка запасов, коэффициент вскрыши, положения горных работ.

Введение

Поиск, выбор и обоснование вариантов разработки рудных тел, обнаруженных в ходе разведки, обеспечивающих безопасное и эффективное освоение месторождения, а также экономически целесообразное с наибольшей полнотой извлечения, является актуальной задачей в настоящее время.

В горно-добывающей области произведен наибольший объем исследований, но отсутствие нормативной базы и документов является большой проблемой для проектирования рациональных систем разработки и схем вскрытия прибортовых и подкарьерных запасов.

Отсутствуют методики выбора конструкции систем разработки прибортовых и подкарьерных запасов открытым, подземным или комбинированным способом, не обоснован рациональный порядок отработки таких запасов.

Анализ месторождений полезных ископаемых, обрабатываемых открытым способом, показал, что геологические запасы в бортах достигают 45 % всех запасов, находящихся в прикарьерной зоне. Однако, как показывает опыт, не все горно-добывающие предприятия готовы отработать их, при этом увеличиваются потери полезного ископаемого. Но, с другой стороны, для повышения эффективности доосвоения,

полноты извлечения рудных залежей, находящихся в подкарьерной и прибортовой зоне, и получения дополнительной прибыли необходимо найти эффективные технологические решения рациональной отработки этих запасов и технико-экономической оценки целесообразности выемки для различных участков залежи [1–5].

Эффективные технологические решения доработки законтурных запасов должны учитывать ряд условий:

- безопасность отработки рудных запасов;
- сохранность бортов карьера в устойчивом состоянии;
- минимальные показатели потерь и разубоживания руды.

Выемка законтурных запасов руды была успешно осуществлена на карьерах Гайского ГОКа, Сибайском, Учалинском, Бакальского рудоуправления и др. Например, на Сибайском месторождении после завершения открытых горных работ в карьере и постановки борта в предельное положение отработка прибортовых запасов осуществлялась подземным способом, а существующий съезд, расположенный на борту, использовался для доступа к штольням. Доработка Учалинского месторождения продолжается как открытым, так и подземным способами, где подкарьерные запасы были отработаны подземным способом [6–18].

Таким образом, объектом исследований являются прибортовые и подкарьерные запасы верхнего яруса месторождения «Олений ручей».

В связи с этим был произведен детальный анализ условий залегания запасов верхнего яруса месторождения «Олений ручей», по результатам которого предложены варианты доработки части прикарьерных запасов.

Анализ горно-геологических условий залегания прибортовых и подкарьерных запасов верхнего яруса месторождения «Олений ручей»

При проектировании технологии выемки прикарьерных запасов возникают наибольшие сложности из-за снижения устойчивости откосов бортов и уступов карьера. Месторождение апатит-нефелиновых руд «Олений ручей» расположено в восточной части Хибинского горного массива в Кировском районе Мурманской области, в 22 км северо-восточнее города Кировск. Месторождение представлено несколькими рудными телами, вытянутыми в направлении с юго-запада на северо-восток на 1,5 км. Его освоение возможно комбинированным открыто-подземным способом для большей полноты извлечения запасов апатит-нефелиновых руд [19–24].

В верхнем ярусе выделено шесть рудных тел (сверху вниз: 1В, 2В, 3В, 4В, 5В и 6В), имеющих лин-

зообразную форму, сложную морфологию и изменчивое качество руды, по падению они прослеживаются на абсолютных отметках от –115 до +450 м (рис. 1).

Мощность подкарьерных и прибортовых рудных тел изменяется от 2,0–9,0 до 25,0–65,0 м.

Результаты анализа горно-геологических условий залегания и размеров рудных тел верхнего яруса, располагающихся в рассматриваемых подкарьерной и прибортовой зонах, сведены в табл. 1.

Таблица 1. Размеры рудных тел верхнего яруса

Table 1. Dimensions of ore bodies of the upper tier

Наименование Designation	Рудные тела/Ore bodies						
	1В	2В	2В-1	3В	4В	5В	6В
Прослежено по простиранию, м Traced along the strike, m	280	1120	280	560	740	560	320
Прослежено по падению до горизонта Traced by the fall to the horizon	+180	–115	+80	+50	+85	+195	+205
Прослежено по восстановлению до горизонта Traced from the rebellion to the horizon	+360	+420	+235	+315	+420	+390	+370
Средняя мощность (истин.), м Average power (true), m	10,85	13,58	17,97	10,07	12,81	14,4	10,51

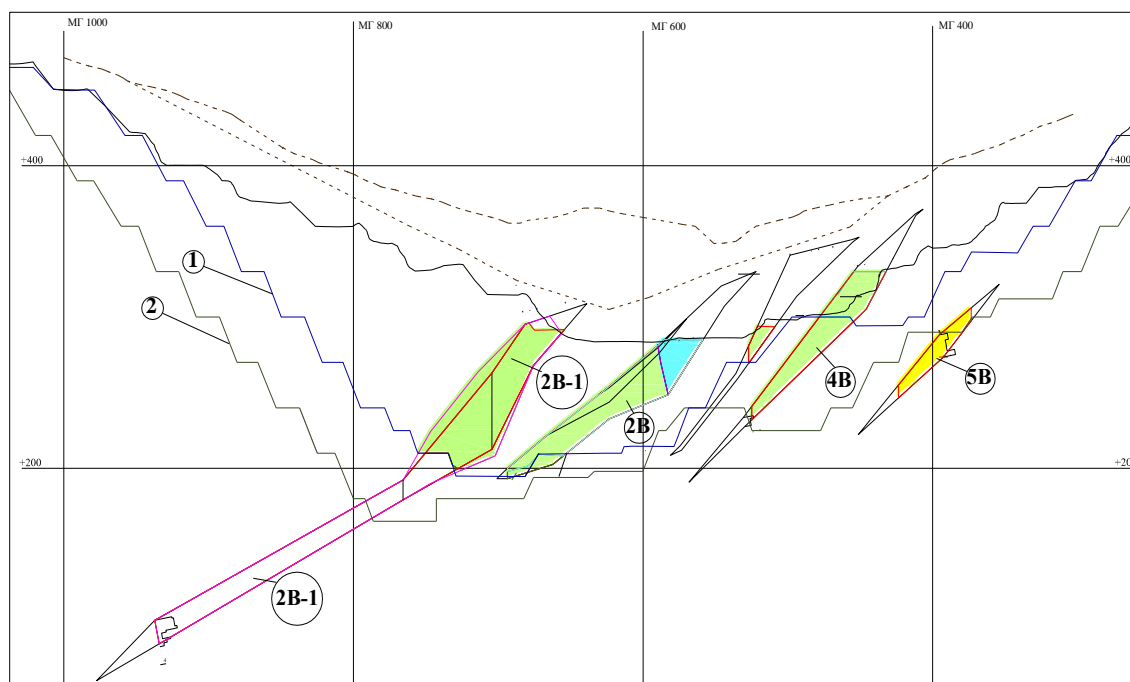


Рис. 1. Рудные тела 2В, 4В, 5В, 2В-1 подкарьерного и прибортового контура верхнего яруса месторождения «Олений ручей»: 1) проектный контур карьера; 2) контур карьера по варианту 3

Fig. 1. Ore bodies 2B, 4B, 5B, 2B-1 of the pit bottom and pit wall contour of the upper tier of the deposit «Oleniy Ruchey»: 1) design contour of the quarry; 2) contour of the quarry according to option 3

Метод исследования

При проведении эксплуатационной разведки на поле верхнего яруса месторождения «Олений ручей» за пределами контура технических границ карьера в подкарьерной и прибортовой (в лежачем боку рудной за-

лежи) зонах выявлены и прослежены рудные тела 1В, 2В, 2В-1, 3В, 4В, 5В и 6В. Эти рудные тела разделены вмещающими породами мощностью 10–70 м, либо целиком локализируются за пределами технических границ на определенном удалении от них, которое состав-

ляет от 6–18 до 28–200 м, либо залегают так, что часть рудного тела располагается в проектном контуре карьера, а часть – за его пределами, что чаще всего наблюдается в подкарьерной зоне [7, 19–22].

Проведен подробный горно-геометрический анализ верхнего яруса месторождения. При выполнении анализа методом параллельных сечений произведен подсчет объемов руды и вскрышной породы за пределами проектного контура карьера. Сущность метода заключается в разбиении месторождения вертикальными сечениями (разрезами), расстояние между которыми составляет от 20 до 80 м. Для подсчета запасов залежь полезного ископаемого разделяется на отдельные блоки, границами которых являются профильные сечения. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2. Распределение подкарьерных и прибортовых запасов руды по профильным линиям

Table 2. Distribution of pit bottom and pit wall ore reserves for profile lines

Наименование Designation	Объемы руды/Ore volumes					
	Общие Total	в том числе including		Общие Total	в том числе including	
		подкарь- ерные pit bottom	прибор- товые pit wall		подкарь- ерные pit bottom	прибор- товые pit wall
	тыс. м³/thousand m³			тыс. т/thousand tons		
Про- фильные линии 18...42 Profile lines 18...42	3840	2756	1084	11520	8268	3252

Анализ возможных схем развития горных работ с оценкой возможности внутреннего отвалообразования при доработке карьера

Исследованы возможные схемы развития горных работ при отработке прибортовых и подкарьерных запасов.

В результате анализа выявлено, что рудные тела в подкарьерной зоне по падению простираются вплоть до горизонта –115 м, по восстанию – до горизонта +435 м.

Рассмотрены три варианта возможных схем вскрытия и доработки подкарьерных и прибортовых запасов верхнего яруса месторождения с соблюдением условий развития горных работ в границах горного отвода и предложены новые положения горных работ, отличающиеся от проектного [7, 19–22]:

Вариант 1 предусматривает максимально возможное вовлечение в отработку прибортовых и подкарьерных запасов в существующих границах горного отвода карьера из условия обеспечения заезда с поверхности на самый нижний горизонт.

В результате исследований выявлено, что открытыми горными работами в подкарьерную зону возможно спуститься максимально только до горизонта +120 м в северо-восточной части месторождения и до горизонта +150 м в юго-западной части месторождения, а также максимально вовлечь в отработку запасы руды в прибортовой части.

Всего по рассматриваемому варианту в отработку вовлекаются 1710 тыс. м³ руды (табл. 3). Из них прибортовых запасов руды, прослеженных в лежащем боку рудной залежи (под восточным бортом рудника), в рассматриваемом варианте в отработку вовлекаются 788 тыс. м³, и объем вовлекаемых в отработку подкарьерных запасов руды составляет 922 тыс. м³ (табл. 4).

Таким образом, общий объем запасов руды в прибортовой зоне, который не представляется возможным отработать открытым способом при неизменном положении восточного участка границы горного отвода карьера, составляет 296 тыс. м³.

Для обеспечения добычи руды потребуется извлечь 29650 тыс. м³ вскрышных пород, в том числе уборка старых навалов – 1550 тыс. м³. Однако значение коэффициента вскрыши в этом случае составляет 17,3 м³/м³, что значительно превышает значение граничного коэффициента вскрыши, определяющегося из условия равенства себестоимости отработки руды подземным и открытым способами, 12 м³/м³. При этом весь объем вынимаемых вскрышных пород должен быть вывезен и уложен во внешние отвалы.

Вариант 2 предусматривает максимально возможное, как в варианте 1, вовлечение в отработку прибортовых запасов и части подкарьерных запасов рудных тел, прослеженных эксплуатационной разведкой в юго-западной части поля рудника с углубкой проектных границ на 15–45 м.

Анализируя результаты построений и расчетов, произведенных по варианту 1, при максимально возможной углубке карьера, в варианте 2 предлагается:

- как и в предыдущем варианте, максимально возможно забрать открытым способом прибортовые запасы руды, прослеженные в лежащем боку рудной залежи (под восточным бортом рудника);
- из подкарьерных запасов в отработку вовлечь только рудные тела 6В и часть 2В с углубкой проектных границ в указанной части поля рудника на 15–45 м (с горизонта +210 до горизонта +195 м);
- в северо-восточной части поля рудника его техническая граница по дну и по западному борту остается не измененной.

В рассматриваемом варианте схемы вскрытия общий объем запасов руды, вовлекаемых в отработку, составляет 880 тыс. м³, из которых 788 тыс. м³ составляют прибортовые запасы и 92 тыс. м³ – подкарьерные (табл. 3, 4).

Для обеспечения такого объема добычи руды по варианту 2 потребуется извлечь 7800 тыс. м³ вскрышных пород. Значение коэффициента вскрыши в варианте составляет 8,9 м³/м³ (табл. 3).

Ввиду того, что отработку подкарьерных запасов после окончания открытых горных работ предусматривается осуществлять подземным способом с применением системы разработки с обрушением кровли, в донной части карьерной выемки предварительно необходимо отсыпать слой из вскрышных пород мощностью как минимум до 20 м – так называемую породную подушку.

В рассматриваемом варианте схемы вскрытия весь объем вынимаемой породы вскрыши представляется возможным уложить во внутренний отвал в северо-восточной части поля рудника, при этом углубка в торце и в донной части выработанного до проектного контура пространства рудника не предусматривается.

Вариант 3. Оработка прибортовых запасов осуществляется так же, как в вариантах 1, 2. Подкарьерные запасы руды в юго-западной части поля рудника вскрывается так же, как в варианте 2, а в северо-восточной части производится углубка карьера и вовлекаются в отработку подкарьерные запасы руд до горизонта +135 м [7, 8].

В предлагаемом варианте рассматривается отработка прибортовых запасов руды и части подкарьерных запасов в юго-западной части поля рудника так же, как и в варианте 2, а в северо-восточной части рудника отработка подкарьерных запасов осуществляется с углубкой до горизонта +135 м (рис. 2).

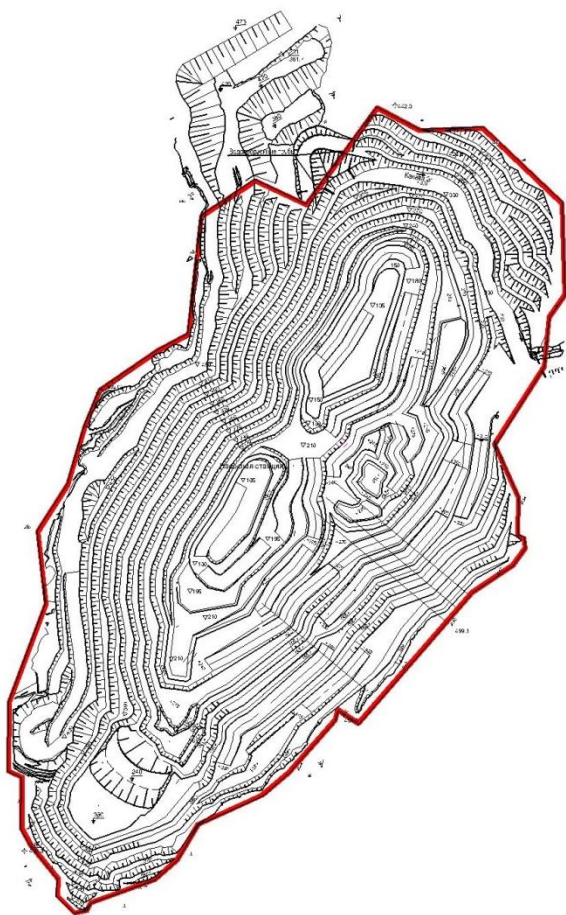


Рис. 2. Положение горных работ на конец отработки опытно-промышленного участка по Варианту 3
Fig. 2. Position of mining operations at the end of development of the pilot industrial site for Option 3

Как показали результаты горно-геометрического анализа и расчеты вынимаемых объемов полезного ископаемого (руды) и вскрышных пород, схема вскрытия и подготовки прибортовых и подкарьерных запасов по предлагаемому варианту является наиболее

рациональной по сравнению с предыдущими двумя вариантами.

Общий объем руды, вовлекаемый в отработку по рассматриваемому варианту, составляет 1039 тыс. м³ (табл. 3). В том числе 788 тыс. м³ составляют прибортовые запасы и 251 тыс. м³ – подкарьерные (табл. 4).

Общий объем вскрышных пород, извлекаемых при этом, составит 8550 тыс. м³. Геологический коэффициент вскрыши по варианту равен 8,2 м³/м³ при значении граничного 12 м³/м³, что меньше не только по сравнению с результатом, полученным в *Варианте 1*, но и по сравнению с результатом, полученным в *Варианте 2*.

Вынимаемые породы вскрыши в рассматриваемом варианте предусматривается уложить частично в выработанном пространстве с закладкой его южного и северного торцов до горизонта +240 и частично на внешний отвал.

Таблица 3. Объемы вынимаемой руды и вскрыши по вариантам

Table 3. Volumes of removable ore and overburden by options

Наименование Designation	Объемы вскрыши, тыс. м ³ Overburden amount, thousand m ³	Объемы руды, тыс. м ³ Volume of ores, thousand m ³	Объемы руды, тыс. т Volume of ores, thousand tons	Коэффициент вскрыши, м ³ /м ³ Overburden coal ratio, m ³ /m ³
Вариант Option				
1	29650	1710	5130	17,3
2	7800	880	2640	8,9
3	8550	1039	3117	8,2

Таблица 4. Распределение обрабатываемых по вариантам запасов руды на подкарьерные и прибортовые

Table 4. Distribution of ore reserves worked out by the options over pit wall and pit bottom

Наименование Designation	Погоризонтные объемы руды horizontal ore volumes					
	Общие Total	в том числе including		Общие Total	в том числе including	
		подкарьерные pit bottom	прибортовые pit wall		подкарьерные pit bottom	прибортовые pit wall
		тыс. м ³ /thousand m ³			тыс. т/thousand tons	
Вариант Option						
1	1710	922	788	5130	2766	2364
2	880	92	788	2640	276	2364
3	1039	251	788	3117	753	2364

Обоснование рациональной схемы вскрытия и подготовки прибортовых и подкарьерных запасов месторождения «Олений ручей»

По итогам анализа трех рассмотренных возможных вариантов схем вскрытия и подготовки прибортовых и подкарьерных запасов руды на месторождении «Олений ручей» можно сделать вывод, что наиболее рациональной является схема вскрытия в *Варианте 3*. Этот вариант и предлагается к реализации [22].

При разработке технологических решений отработки прибортовых и подкарьерных запасов с учетом геомеханической обстановки месторождения «Олений ручей» и рассмотрении возможных вариантов были приняты проектные углы наклоны уступа и проектные углы откоса бортов, т. е. результирующий угол откоса висячего борта принят 48° , а лежащего – 44° .

По условиям рельефа местности карьерное поле делится на нагорную часть до отметки 315 м и глубинную часть ниже отметки 315 м.

Нагорные горизонты северо-западного борта карьера, согласно решениям, принятым при реализации *Варианта 3*, также намечается вскрывать полутраншеями с соответствующих отметок автодороги, связывающей карьер с отвалом № 1.

Глубинную часть опытно-промышленного участка (ниже горизонта +315 м), так же как и по факту в действующем карьере, предлагается вскрывать со стороны северо-восточного торца системой постоянных съездов.

Связь с промплощадкой рудника также будет осуществляться автодорогой, располагающейся с северо-восточной стороны карьера.

Рекомендации по выбору систем разработки при отработке прибортовых и подкарьерных запасов

Учитывая тот факт, что горно-геологические условия в пределах технических границ верхнего яруса рассматриваемого месторождения «Олений ручей» не изменяются по глубине и по простиранию, для отработки прибортовых запасов, как и при отработке запасов в технических границах карьера, принимается следующая система разработки месторождения:

- по степени зависимости вскрышных, добычных и горно-подготовительных работ – зависимая;
- по направлению подвигания фронта горных работ в плане – продольная;
- по направлению выемки в плане – углубочная однобортная;
- по направлению перемещения вскрышных пород в отвал – транспортная, с продольным перемещением вскрышных пород во внешний и внутренний отвалы [22].

Порядок отработки запасов, находящихся в прикарьерной зоне

Установлено, что отработку запасов, находящихся в прикарьерной зоне в границах опытно-промышленного участка с учетом горно-геологических условий месторождения «Олений ручей», рационально производить в следующем порядке:

На первом этапе произвести отработку максимально возможного объема прибортовых и подкарьерных запасов с углубкой карьера (по сравнению с проектным контуром) на 15 м в его северо-восточной части. Продолжительность этого этапа составит два года эксплуатации карьера. Параллельно с отработкой прибортовых подкарьерных запасов необходимо строить шахты для отработки подкарьерных запасов.

На втором этапе, после завершения работ в верхнем ярусе опытно-промышленного участка карьера, в эксплуатацию сдается шахта и осуществляется отработка подкарьерных запасов подземным способом [22].

Основные технико-экономические показатели

Основные технико-экономические показатели по геотехнологии отработки подкарьерных и прибортовых запасов верхнего яруса месторождения «Олений ручей» по принятому варианту приводятся в табл. 5 [22].

Таблица 5. Техничко-экономические показатели

Table 5. Mining results

Наименование Name	Показатели Indicators
Балансовые запасы для открытой отработки, тыс. т. Balance reserves for open mining, thousand tons	3117,0
Потери руды, %/Ore loss, %	3,03
Разубоживание руды, %/Ore contamination, %	6,97
Эксплуатационные запасы (добыча), тыс. т Mineable reserves (mining), thousand tons	3159,0
Годовая производственная мощность, тыс. т/год Annual capacity, thousand tons/year	1881,0
Количество добытой руды, тыс. т/тыс. м ³ Quantity of ore mined, thousand tons/thousand m ³	3159/1053
Вскрыша, тыс. м ³ /Overburden, thousand m ³	8550
Горная масса, тыс. м ³ /Mined rock, thousand m ³	9603
Стоимость товарной продукции, млн р. Amount of saleable output, million rubles	5708,4
Цена реализации апатитового концентрата (без НДС), р./т Selling price of apatite concentrate (without VAT), rub./t	6903,0
Эксплуатационные расходы на производство товарной продукции, млн р., всего Operating costs for production of commercial products, million rubles, total	4244,3
в том числе/including:	
добыча руды/ore mining	3220,0
обогащение/benefication	832,4
коммерческие расходы/business expenses	191,9
Себестоимость единицы, р./т/Unit cost, rubles/t	
товарной продукции/marketable mineral products	5132
добычи руды (производственной) ore mining (working)	713
то же, р/1 м ³ горной массы the same, rubles/m ³ mined rock	235
добычи руды (полной с учетом административно-хозяйственных расходов) ore mining (full taking into account administrative expenses)	1019
то же, р/1 м ³ горной массы the same, rubles/m ³ mined rock	335

Выводы

Рассмотрены варианты доработки подкарьерных и прибортовых запасов верхнего яруса месторождения «Олений ручей» с соблюдением условий развития горных работ в границах горного отвала и предложены новые положения горных работ, отличающиеся от проектного.

Выполненный горно-геометрический анализ рассмотренных вариантов показал, что в первом варианте коэффициент вскрыши, равный $17 \text{ м}^3/\text{м}^3$, превышает

ет значение граничного, определяющегося из условия равенства себестоимости отработки руды подземным и открытым способами. При сравнении *Варианта 2* и *Варианта 3* более приемлемым оказался *Вариант 3*, т. к. коэффициент вскрыши меньше по сравнению с результатом, полученным в *Варианте 2*.

Предложенные положения горных работ для рассмотренных вариантов позволяют определить рациональную схему вскрытия прикарьерных запасов верхнего яруса месторождения «Олений ручей» для выбранного варианта.

Рассчитаны технико-экономические показатели по выбранному варианту доработки подкарьерных и прибортовых запасов верхнего яруса месторождения «Олений ручей» и приведены основные финансовые

результаты производственной деятельности рудника в границах опытно-промышленного, которые имеют высокие положительные значения:

- чистая прибыль за рассматриваемый период отработки (2 года) составляет 1160,7 млн р. (в каждом году периода оценки предприятие имеет чистую прибыль, что свидетельствует о финансовой состоятельности);
- чистый дисконтированный бюджетный доход государства за период оценки составляет 1039,3 млн р.;
- для отработки прибортовых и подкарьерных запасов верхнего яруса месторождения «Олений ручей» открытым способом не требуется привлечения дополнительных капитальных вложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гавришев С.Е., Кузнецова Т.С., Некерова Т.В. Методика обоснования параметров бортов карьеров при выемке прибортовых запасов подземным способом // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2010. – № 1. – С. 14–17.
2. Калмыков В.Н., Григорьев В.В., Волков П.В. Изыскание вариантов систем разработки для выемки прибортовых запасов при комбинированной геотехнологии // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2010. – № 1. – С. 17–20.
3. Совершенствование систем разработки глубоких залежей на основе оптимизации элементов их вскрытия и параметров карьеров / Г.Г. Саканцев, М.Г. Саканцев, В.И. Ческидов, В.К. Норри // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 4. – С. 117–123.
4. Повышение эффективности технологий открытой разработки месторождений твердых полезных ископаемых / В.И. Ческидов, В.К. Норри, Г.Д. Зайцев, А.А. Ботвинник, А.С. Бобыльский, А.В. Резник // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 5. – С. 107–123.
5. Еремин Г.М. Повышение эффективности отработки Нюркпахского месторождения открытым способом // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). – 2012. – № 4. – С. 36–42.
6. Беляев С.И., Еремин Г.М. Повышение полноты отработки рудных тел Нюркпахского месторождения при применении более крутого выпуклого борта карьера // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). – 2004. – № 5. – С. 238–242.
7. Лобанов Е.А., Чайкин Д.А., Меньшиков П.Ю. Разработка технологических решений вскрытия и отработки прибортовых и подкарьерных запасов апатито-нефелиновых руд // Фундаментальные и прикладные науки в горном деле. – 2018. – Т. 5. – № 1. – С. 88–93.
8. Окунович А.В., Рыжков А.Н. О важности своевременного принятия решений по выбору оптимального варианта отработки запасов (на примере Нюркпахского месторождения апатит-нефелиновых руд) // Горный журнал. – 2010. – № 4. – С. 98–100.
9. Калужный А.С. Определение параметров нарушенной зоны и объемов потенциальных вывалов для условий карьера «Олений ручей» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 7. – С. 403–412.
10. Dowling J., Beale G., Bloom J. Designing a large scale pit slope depressurization system at Bingham canyon // Annual International Mine Water Association Annual Conference. Reliable Mine Water Technology. – Denver, Colorado, USA, 2013. – V. I. – P. 119–125.
11. Risk evaluation of slope failure at the Chuquicamata mine / A. Tapia, L.F. Contreras, M. Jefferies, O. Steffen // Slope Stability 2007. Proc. of 2007 International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering / Ed. by Y. Potvin. – Perth, Australian Centre for Geomechanics, 2007. – P. 477–495.
12. The Transition from open pit to underground mining: An Unusual Slope Failure Mechanism at Palabora / R.K. Brummer, H. Li, A. Moss, T. Casten // Proc. of international symposium on stability of rock slopes in open pit mining and civil engineering. – Johannesburg: The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2006. – P. 411–420.
13. Wines D.R., Lilly P.A. Measurement and analysis of rock mass discontinuity spacing and frequency in part of the Fimiston open pit operation in Kalgoorlie, Western Australia: a case study // International Journal of Rock Mechanics & Mining Science. – 2002. – V. 39. – № 5. – P. 589–602.
14. Руководство по проектированию бортов карьера / под ред. Д. Рид, П. Стейси / Пер с англ. – Екатеринбург: Правовед, 2015. – 544 с.
15. Laubcher D.H. A geomechanics classification system for rating of rock mass in mine design // Journal South Africa Inst. of Mining and Metallurgy. – 1990. – № 10. – P. 257–273.
16. Jacubec J., Laubcher D.H. The MRMR (Mining Rock Mass Rating) rock mass rating classification system in mining practice // Proc. of MassMin 2000. – Brisbane, Australia, 2000. – P. 413–421.
17. Laubcher D.H., Jacubec J. The MRMR (Mining Rock Mass Rating) rock mass classification for jointed rock masses // Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies. – Littleton, Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2000. – P. 475–481.
18. Haines A., Terbrugge P.J., Wittke W. Preliminary estimation of rock slope stability using rock mass classification systems // Proc. 7th Cong. on Rock Mechanics 2. ISRM. – Aachen, Germany; Balkema, Rotterdam, 1991. – P. 887–892.
19. Отчет о научно-исследовательской работе «Инженерно-геологические условия разработки апатитонефелинового месторождения Олений ручей». – Апатиты: Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, 2009. – 160 с.
20. Отчет о научно-исследовательской работе «Регламент на укрупнение бортов карьера месторождения апатит-нефелиновой руды Олений ручей». – Апатиты: Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, 2012. – 175 с.
21. Отчет о научно-исследовательской работе «Определение основных параметров физико-механических свойств горных пород по разрезу структурной инженерно-геологической скважины для оценки геомеханических условий проходки главного ствола». – Апатиты: Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, 2013. – 142 с.
22. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка основных технологических решений (регламента) для вскрытия и отработки прибортовых и подкарьерных запасов верхнего яруса месторождения Олений ручей». – Новосибирск: Институт горного дела Сибирское отделение Российской академии наук (ИГД СО РАН), 2018. – 180 с.
23. Козырев А.А., Семенова И.Э., Журавлева О.Г. Влияние природных и техногенных факторов на проявление сейсмичности на рудниках Хибинского массива // Триггерные эффекты

- в геосистемах: тезисы докладов IV Всероссийской конференции с международным участием. – М.: ГЕОС, 2017. – С. 46–47.
24. Kozyrev A.A., Semenova I.E., Zemtsovskiy A.V. Investigation of geomechanical features of the rock mass in mining of two contiguous deposits under tectonic stresses // Procedia Engineering. – 2017. – V. 191. – P. 324–331. DOI: 10.1016/j.proeng. 2017.05.188.
- Поступила: 15.01.2019 г.*

Информация об авторах

Немова Н.А., кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Открытые горные работы» Института горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук.

Бельш Т.А., инженер лаборатории «Открытые горные работы», Института горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 622.271

ASSESSMENT OF PIT WALL AND PIT BOTTOM RESERVES WORKING OPTIONS IN THE MINE «OLENIY RUCHEY»

Natalya A. Nemova¹,
nemova-natalya@mail.ru

Tatyana A. Belsh¹,
tata0303@bk.ru

¹ Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
54, Krasny avenue, Novosibirsk, 630091, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to develop new ore bodies appeared in the course of advanced operational exploration. Behind the design contours of the mines there are the reserves that need to be improved either by underground or combined methods. With the technology of refining the quarry reserves, the greatest difficulties arise, since their development causes a violation of the stability of the quarry sides. Therefore, the search, selection and justification of the parameters of the systems for developing pre-pit reserves in deposit exploration, providing effective and safe development of reserves, is a very urgent task.

The main aim of the research is to consider possible options for pit mining of the pit wall and pit bottom reserves taking into account the occurrence of new ore bodies of apatite-nepheline deposit and compliance with the necessary conditions for a specified direction of mining development of mining boundary of property and to make a technical and economic assessment of the proposed options.

Objects: large deposit of apatite-nepheline ores «Oleniy Ruchey».

Methods: mining and geological analysis of the upper tier of deposits of apatite-nepheline ores «Oleniy Ruchey» and analysis of existing data on the physicommechanical properties of rocks composing the massif of the deposit in question, analysis of possible mining development schemes for mining deposits and reserves with an assessment of the possibility of internal dumping during quarry development.

Results. On the example of development of the deposit of apatite-nepheline ores «Oleniy Ruchey», the authors considered possible options for mining and developing the pit wall and pit bottom reserves of the upper tier deposits in compliance with the conditions of development of mining boundary of property. The authors proposed the optimal development of mining operations according to the variant providing the minimum stripping ratio.

Key words:

Pit wall and pit bottom reserves, ore body, schemes of opening, completion of reserves, overburden coal ratio, mining position.

REFERENCES

- Gavrishev S.E., Kuznetsova T.S., Nekerova T.V. Methods of substantiation of the parameters of the pit walls during the excavation of near-surface reserves by the underground method. *Bulletin Magnitogorsk state technical University named G.I. Nosov*, 2010, no. 1, pp. 14–17. In Rus.
- Kalmykov V.N., Grigoryev V.V., Volkov P.V. Explore options for development systems for excavating pit walls reserves in combined geotechnology. *Bulletin Magnitogorsk state technical University named G.I. Nosov*, 2010, no. 1, pp. 17–20. In Rus.
- Sakantsev G.G., Sakantsev M.G., Cheskidov V.I., Norri V.K. Improvement of systems of development of deep deposits on the basis of optimization of elements of their opening and parameters of pits. *Physical and technical problems of development of mineral deposits*, 2014, no. 4, pp. 117–123. In Rus.
- Cheskidov V. I., Norri V.K., Zaytsev G.D., Botvinnik A.A., Bobylskiy A.S., Reznik A.V. Povyshenie effektivnosti technology otkrytoy razrabotki mestorozhdeny tverdykh poleznykh iskopaemykh [Increasing efficiency of open pit hard mineral mining]. *Journal of Mining Science*, 2014, vol. 50, no. 5, pp. 892–903.
- Eremin G.M. Increasing the efficiency of Nyorkpakhsy open-pit mining. *Mining information and analytical bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2012, no. 4, pp. 36–42. In Rus.
- Belyaev S.I., Eremin G.M. Increasing the completeness of mining ore bodies of Nyorkpakhsy field when using a steeper convex board pit. *Mining information and analytical bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2004, no. 5, pp. 238–242. In Rus.
- Lobanov E.A., Chaykin D.A., Menshikov P.Yu. Development of technological solutions for the opening and mining of pit bottom and pit wall reserves of apatite-nepheline ores. *Fundamental and applied sciences in mining*, 2018, vol. 5, no. 1, pp. 88–93. In Rus.
- Okunovich A.V., Ryzhkov A.N. The importance of the timely adoption of decisions concerning the choice of optimal reserves (for example Nyorkpakhsy deposits of Apatite-nepheline ores). *Mining journal*, 2010, no. 4, pp. 98–100. In Rus.
- Kalyuzhny A.S. Determination of the parameters of the disturbed zone and the volumes of potential dumps for the conditions of the Oleniy Ruchey quarry. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2016, no. 7, pp. 403–412. In Rus.
- Dowling J., Beale G., Bloom J. Designing a large scale pit slope depressurization system at Bingham canyon. *Annual International Mine Water Association Annual Conference. Reliable Mine Water Technology*. Denver, Colorado, USA, 2013. Vol. I, pp. 119–125.
- Tapia A., Contreras L.F., Jefferies M., Steffen O. Risk evaluation of slope failure at the Chuquicamata mine. *Slope Stability 2007. Proc. of 2007 International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*. Ed. by Y. Potvin. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2007. pp. 477–495.
- Brummer R.K., Li H., Moss A., Casten T. The Transition from open pit to underground mining: an unusual slope failure mechanism at Palabora. *Proc. of international symposium on stability of rock slopes in open pit mining and civil engineering*. Johannesburg, The south African institute of mining and metallurgy, 2006. pp. 411–420.
- Wines D.R., Lilly P.A., Measurement and analysis of rock mass discontinuity spacing and frequency in part of the Fimiston open pit operation in Kalgoorlie, Western Australia: a case study. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 2002, vol. 39, no. 5, pp. 589–602.
- Guidelines for open pit slope design*. Eds. J. Read, P. Stacey. Translated from English. Ekaterinburg, Pravoved Publ., 2015. 544 p.
- Laubcher D.H. A geomechanics classification system for rating of rock mass in mine design. *Journal South Africa Inst. of Mining and Metallurgy*, 1990, no. 10, pp. 257–273.

16. Jacubec J., Laubcher D.H. The MRMR (Mining Rock Mass Rating) rock mass rating classification system in mining practice. *Proceedings of MassMin 2000*. Brisbane, Australia, 2000. pp. 413–421.
17. Laubcher D.H., Jacubec J. The MRMR (Mining Rock Mass Rating) rock mass classification for jointed rock masses. *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. Littleton, Colorado, USA, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2001. pp. 475–481.
18. Haines A., Terbrugge P.J., Wittke W. Preliminary estimation of rock slope stability using rock mass classification systems. *Proc. 7th Cong. on Rock Mechanics. ISRM*. Aachen, Germany; Balkema, Rotterdam, 1991. pp. 887–892.
19. *Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote «Inzhenerno-geologicheskie usloviya razrabotki apatit-nefelinovogo mestorozhdeniya Oleniy ruchey»* [Report on the research work «Engineering and geological conditions for the development of the Oleniy Ruchey apatite-nepheline deposit»]. Apatity, Mining Institute of the Kolskiy Scientific Center Russian Academy of Sciences Publ., 2009. 160 p.
20. *Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote «Reglament na ukrucheniye bortov karera mestorozhdeniya apatit-nefelinovoy rudy Oleniy ruchey»* [Report on the research work «Regulations for the tilting of the pit sides of the pit of the Oleniy Ruchey apatite-nepheline ore deposit»]. Apatity, Mining Institute of the Kolskiy Scientific Center Russian Academy of Sciences Publ., 2012. 175 p.
21. *Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote «Opredeleniye osnovnykh parametrov fiziko-mekhanicheskikh svoystv gornykh porod po razrezu strukturnoy inzhenerno-geologicheskoy skvazhiny dlya otsenki geomekhanicheskikh usloviy prokhodki glavnogo stvola»* [Report on the research work «Determination of the main parameters of the physico-mechanical properties of rocks from the section of a structural engineering-geological well for the assessment of the geomechanical conditions of penetration of the main wellbore»]. Apatity, Mining Institute of the Kolskiy Scientific Center Russian Academy of Sciences Publ., 2013. 142 p.
22. *Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote «Razrabotka osnovnykh tekhnologicheskikh resheniy (reglamenta) dlya vskrytiya i otrabotki pribortovykh i podkarernykh zapasov verkhnego yarusy mestorozhdeniya Oleniy ruchey»* [Report on the research work «Development of the main technological solutions (regulations) for the opening and testing of pit bottom and pit wall reserves of the upper tier of the Oleniy Ruchey deposit»]. Novosibirsk, Institute of Mining Siberian Branch Russian Academy of Sciences Publ., 2018. 180 p.
23. Kozyrev A.A., Semenova I.E.H., Zhuravleva O.G. Vliyaniye prirodnykh i tekhnogennykh faktorov na proyavleniye seysmichnosti na rudnikakh Khibinskogo massiva [The influence of natural and technogenic factors on manifestation of seismicity in the mines of the Khibiny massif]. *Triggernyye efekty v geosistemakh. Tezisy dokladov IV Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Trigger effects in geosystems. Abstracts of the IV All-Russian Conference with international participation]. Moscow, GEOS Publ., 2017. pp. 46–47.
24. Kozyrev A.A., Semenova I.E., Zemtsovskiy A.V. Investigation of Geomechanical Features of the Rock Mass in Mining of Two Contiguous Deposits under Tectonic Stresses. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 191, pp. 324–331. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.188.

Received: 15 January 2019.

Information about the authors

Natalya A. Nemova, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Mining Siberian Branch Russian Academy of Sciences.
Tatyana A. Belsh, engineer, Institute of Mining Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

УДК 621.311.22.002.5:621.181.27.013.3:621.438

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПЕРЕГРЕВА ПАРА В КОТЛЕ-УТИЛИЗАТОРЕ ГТ-НАДСТРОЙКИ ТЕПЛОФИКАЦИОННОГО ЭНЕРГБЛОКА

Минор Александр Александрович¹,
aam45@tpu.ru

Ромашова Ольга Юрьевна¹,
roma@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Модернизация существующего теплоэнергетического оборудования является одним из приоритетных направлений развития энергетики. Внедрение газотурбинной установки в тепловую схему паросилового энергоблока с сохранением инфраструктуры станции может быть менее затратным вариантом по сравнению с сооружением новых энергоблоков парогазовых установок. Одним из малозатратных вариантов интеграции газотурбинных установок в тепловую схему паротурбинных энергоблоков является использование тепловой мощности котла-утилизатора для промежуточного перегрева отработавшего в паровой турбине рабочего тела с утилизацией оставшейся теплоты для нагрева питательной воды и основного конденсата. По сравнению с наиболее распространенными схемами с вытеснением регенерации в котел-утилизатор предложенный альтернативный вариант позволяет повысить тепловую экономичность паротурбинного контура. Такая схема уступает в тепловой экономичности схеме с параллельной генерацией пара в котле-утилизаторе, однако не требует испарительного контура, что упрощает проектирование котла-утилизатора. Проведенный анализ энергетических характеристик газотурбинных установок показал необходимость исследования схемы и параметров промежуточного перегрева для теплофикационных энергоблоков с учетом режимов работы паровой турбины.

Объект: паротурбинный энергоблок Т–165/210–130 с газотурбинной надстройкой (ГТ-надстройкой) для промежуточного перегрева отработавшего в паровой турбине рабочего тела с утилизацией оставшейся теплоты для нагрева питательной воды и основного конденсата.

Цель: выбор схемы и расчет оптимальных параметров промежуточного перегрева применительно к паротурбинному энергоблоку Т–165/210–130 с ГТ-надстройкой, анализ его основных показателей при работе по тепловому графику при изменении температуры промежуточного перегрева в котле-утилизаторе.

Методы: системный анализ и математическое моделирование.

Результаты. Разработана математическая модель и программа расчета предложенной схемы. Выполнен анализ особенностей, связанных с организацией промежуточного перегрева в котле-утилизаторе ГТ-надстройки. Показано, что эффективность работы теплофикационного энергоблока с промежуточным перегревом может быть повышена путем организации промежуточного перегрева в котле-утилизаторе ГТ-надстройки. Определено, что в этом случае наивысшая экономичность паротурбинного энергоблока с ГТ-надстройкой при работе в расчетном теплофикационном режиме достигается при температуре промежуточного перегрева ниже номинального значения.

Ключевые слова:

Промежуточный перегрев, парогазовая установка, газотурбинная надстройка, котел-утилизатор, теплофикационный режим, удельный расход топлива, коэффициент использования теплоты топлива, расход пара, электрическая мощность, тепловая нагрузка.

Введение

Одним из приоритетных направлений развития энергетики является модернизация существующего теплоэнергетического оборудования. На современном этапе развития энергетики России отдается предпочтение внедрению газотурбинных технологий, что обусловлено значительными запасами природного газа. Парогазовые установки (ПГУ) утилизационного типа считаются наиболее совершенными установками для производства электроэнергии (ЭЭ) [1]. Наряду с наиболее эффективным, но и более затратным, вариантом сооружения современных энергоблоков ПГУ, имеет место переход на газотурбинные технологии с сохранением инфраструктуры существующей станции, что позволяет интегрировать газотурбинную установку (ГТУ) в тепловую схему паросилового блока (в том числе и на пылеугольных электростанциях, где природный газ используется как второе топливо) с меньшими инвестиционными расходами [2, 3].

Дополнительный эффект ГТ-надстройки могут дать в сочетании с переводом конденсационных энергоблоков в теплофикационный режим при необходимости вытеснения неэкономичных районных котельных. При этом наряду с увеличением отпуска теплоты внешнему потребителю в отопительный период увеличивается электрическая мощность станции. В результате снижается расход топлива по сравнению с отдельной выработкой теплоты и электроэнергии, а также уменьшаются удельные значения тепловых и вредных выбросов в атмосферу. Такая модернизация ведет к сокращению затрат на газо- и угледобычу.

Среди малозатратных вариантов интеграции газовой турбины (ГТ) в тепловую схему паротурбинных энергоблоков наибольшее распространение получили схемы с подогревом питательной воды (ПВ) и основного конденсата (ОК) в котле-утилизаторе (КУ) [4–6].

Недостатком такого варианта совершенствования ТЭС является существенное ухудшение показателей

тепловой экономичности паротурбинной установки (ПТУ): растет доля потерь теплоты в конденсаторе, снижается расход острого пара по сравнению с номинальным из-за ограничения пропуска пара через последние ступени паровой турбины (ПТ) с соответствующим падением электрической мощности.

Альтернативным способом вытеснению регенерации на блочных ТЭС может служить вариант использования тепловой мощности КУ для промежуточного перегрева отработавшего в ПТ рабочего тела с утилизацией оставшейся теплоты для нагрева ПВ и ОК. Преимущества в экономичности такого решения для конденсационных энергоблоков по сравнению с вытеснением регенерации показаны в работе [7]. Предложенный вариант уступает в тепловой экономичности схеме с параллельной генерацией пара в КУ, однако не требует испарительного контура, что упрощает проектирование котла-утилизатора. Это преимущество объединяет его со схемой с вытеснением регенерации, однако, в отличие от последней, рассмотренный вариант позволяет повысить тепловую экономичность [8, 9] паротурбинного контура.

Анализ энергетических характеристик ГТУ показал необходимость исследования схемы и параметров промежуточного перегрева (ПП) для теплофикационных блоков с учетом изменения режимов работы ПТ в зависимости от температуры наружного воздуха [5, 10]. При этом следует учитывать, что для теплофикационных энергоблоков вопрос об использовании ПП является дискуссионным [11], так как в конденсационном и теплофикационном режимах он имеет разную степень эффективности.

Известно, что для всех конденсационных турбин с начальным давлением пара 12,8 и 23,5 МПа принят промежуточный перегрев, который приводит к повышению тепловой экономичности и снижению влажности в последних ступенях. Для теплофикационных турбин эффективность ПП меньше, чем для конденсационных. Кроме того, на характерном для теплофикационных турбин режиме по тепловому графику с минимально необходимым для охлаждения последних ступеней турбины расходом пара в конденсаторе G_k^{\min} температура пара на выходе из турбины при ПП возрастает, что требует или увеличения G_k^{\min} , или применения специальной системы охлаждения, как это выполнено в турбине Т–250/300–240. При этом положительный эффект от увеличения удельной выработки ЭЭ на тепловом потреблении за счет ПП не всегда превышает потерю экономичности из-за роста потери теплоты в конденсаторе при работе с закрытой диафрагмой части низкого давления (ЧНД).

По этой причине теплофикационные турбины Уральского турбинного завода с давлением свежего пара 12,8 МПа типа Т–110–130, Т–175–130 и другие, в отличие от конденсационных энергоблоков на это давление (К–160–130, К–210–130), выполняются без ПП.

В связи с вышесказанным актуальным становится исследование показателей работы теплофикационного энергоблока при работе по тепловому графику при изменении температуры промежуточного перегрева, требующей изменения минимально необходимого для охлаждения последних ступеней турбины расхода пара в конденсаторе.

Постановка задачи

Работа посвящена выбору схемы и расчету оптимальных параметров [12–15] промежуточного перегрева пара применительно к паротурбинному энергоблоку Т–165/210–130 с ГТ-надстройкой (в дальнейшем упоминается в тексте как ПГУ). Турбоагрегат Т–165/210–130 принят в качестве прототипа, его схема и параметры определены на основе материалов по переводу конденсационной турбины К–210–130 в теплофикационный режим с регулируемым отопительным отбором традиционным способом на одной из станций Уральского федерального округа. Такая схема реконструкции подразумевает подогрев сетевой воды по одноступенчатой схеме в основном сетевом подогревателе, на который подается пар из регулируемого отбора. Регулируемый отбор пара осуществляется из камеры за цилиндром среднего давления (ЦСД), где имеется возможность отвода его необходимого количества. Отвод пара производится из переходного патрубка выхлопной части ЦСД. Изменение расхода пара в регулируемый отбор осуществляется главным образом изменением расхода пара в цилиндр низкого давления (ЧНД). Для этого перед ЧНД устанавливается клапан типа поворотной заслонки [16].

На рис. 1 представлена принципиальная тепловая схема разрабатываемой ПГУ. Надстроенная часть включает в себя газотурбинную установку, котел-утилизатор, состоящий из трех частей – пароперегреватель (ПЕ) для перегрева отработавшего в цилиндре высокого давления (ЦВД) пара, газоводяные подогреватели высокого (ГВПВД) и низкого (ГВПНД) давления для нагрева питательной воды и основного конденсата.

В основу расчетов положена зависимость минимально необходимого расхода пара G_k^{\min} для охлаждения последних ступеней турбины К–210–130 от энтальпии на входе в ЧНД, представленная графически на рис. 2. График получен с использованием аналитических зависимостей из [17] и практических результатов эксплуатационных испытаний турбины Т–178/210–130 [18]. Расход охлаждающего пара в ЧНД при значениях давления в конденсаторе 0,0035...0,005 МПа и номинальной температуре промежуточного перегрева составляет 140–207 т/ч, что значительно выше G_k^{\min} для теплофикационных турбин без промежуточного перегрева с такими же начальными параметрами пара. Увеличение G_k^{\min} при заданном расходе острого пара означает существенное ограничение отпуска теплоты внешнему потребителю при переводе конденсационной турбины в теплофикационный режим.

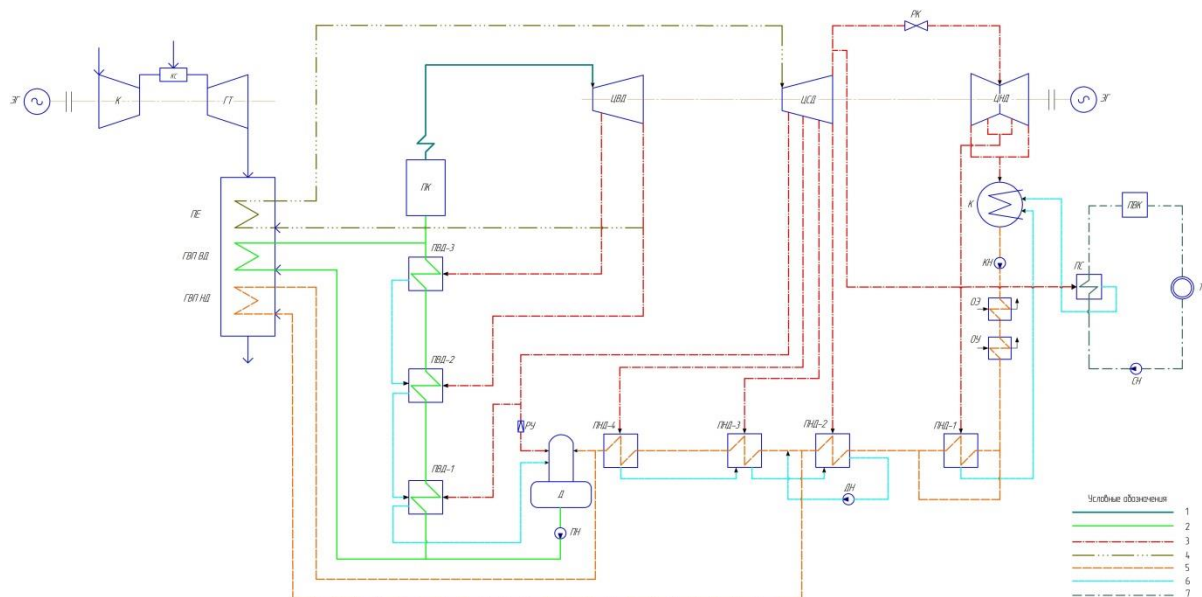


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема разрабатываемой ПГУ: 1 – острый пар; 2 – питательная вода; 3 – пар отборов; 4 – пар промежуточного перегрева; 5 – основной конденсат; 6 – дренаж; 7 – сетевая вода

Fig. 1. Principal thermal scheme of the developed combined cycle power plant (CCPP): 1 – main steam; 2 – feed water; 3 – extraction steam; 4 – reheated steam; 5 – main condensate; 6 – drainage water; 7 – delivery water

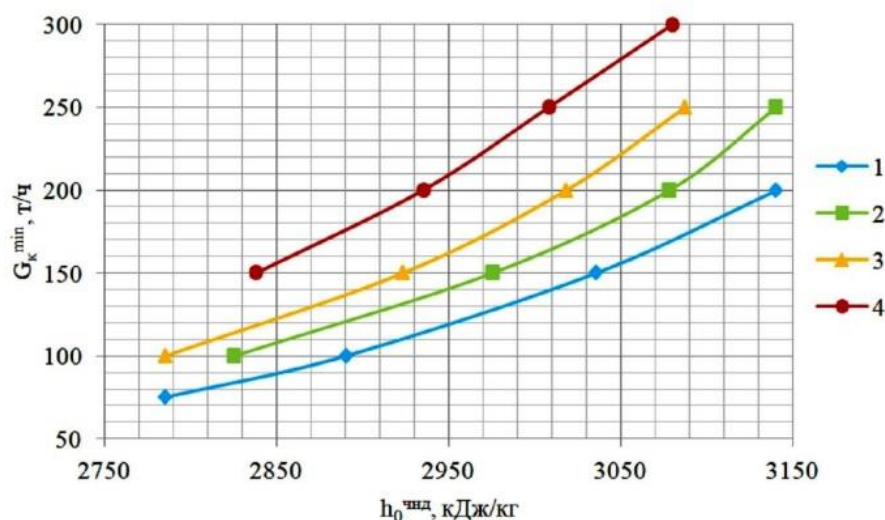


Рис. 2. Зависимость минимального расхода пара в конденсатор турбины К-210–130, необходимого для охлаждения последних ступеней, от энтальпии перед ЧНД при разных давлениях в конденсаторе P_k , МПа: 1) 0,0035; 2) 0,004; 3) 0,0045; 4) 0,006

Fig. 2. Dependence of the minimum steam consumption to the condenser of steam turbine K-210–130 required for cooling the last stages on the enthalpy before low-pressure section at different pressures in the condenser P_k , MPa: 1) 0,0035; 2) 0,004; 3) 0,0045; 4) 0,006

В качестве исходного для анализа режима принят конденсационный режим работы турбины К-210–130 с номинальной электрической мощностью ПТ $N_{э}^{пт}=210$ МВт, начальных параметрах пара – $P_0=12,8$ МПа, $t_0=540$ °С, температуре перегретого пара $t_{пг}=540$ °С, давлении в конденсаторе – $P_k=0,0039$ МПа и паспортных значениях давлений пара в регенеративных отборах. Для этого режима расход острого пара на турбоустановку (ТУ) $G_0=169,8$ кг/с, удельный расход условного топлива (УРУТ) по выработке электроэнергии $b_{э}^{ст\text{ }op}=315$ г у.т./кВт·ч. В дальнейших исследованиях теплофикационных режимов расход

острого пара на турбоустановку принимается постоянным – $G_0=169,8$ кг/с.

Для определения показателей работы прототипа при переводе К-210–130 в теплофикационный режим традиционным способом и схемы ПГУ в теплофикационном режиме принят температурный график теплосети – $t_{пг}/t_{oc}=150/70$ °С (для г. Томска), коэффициент теплофикации – $\alpha_{тзд}=0,55$. Расчеты выполняются для режимов максимального отпуска теплоты из регулируемого отбора при заданном в нем давлении $P_{отб}=0,12$ МПа (для выбранного климатического района соответствует температуре прямой сети при

включении пиковой водогрейной котельной (ПВК) ($t_{\text{нв}} = -15^\circ\text{C}$) с сохранением минимально необходимого для охлаждения последних ступеней турбины расхода пара в конденсатор.

Определение показателей тепловой экономичности прототипа при переводе К–210–130 в теплофикационный режим традиционным способом выполняется при $t_{\text{нп}} = 540^\circ\text{C}$ и $G_{\text{к}}^{\text{нп}} = 30 \text{ кг/с}$ (определен по рис. 2). Этому режиму соответствуют следующие показатели работы ПТУ: электрическая мощность ПТ $N_{\text{э}}^{\text{пт}} = 164,7 \text{ МВт}$; тепловая мощность отопительного отбора $Q_{\text{т}} = 208,6 \text{ МВт}$; УРУТ по выработке электроэнергии (здесь и далее определен по физическому методу) $b_{\text{э}}^{\text{пт}} = 230 \text{ г у.т.}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$.

Расчет тепловой схемы ПГУ выполняется при работе ПТУ по тепловому графику при температуре наружного воздуха $t_{\text{нв}} = -15^\circ\text{C}$ при разных значениях температуры промежуточного перегрева пара с целью определения наибольшей эффективности в зимний период. Максимальное значение температуры ПП принято равным номинальному значению – $t_{\text{нп}} = 540^\circ\text{C}$. Минимальная величина $t_{\text{нп}}$ ограничена температурой пара за ЦВД ПТ. Снижение температуры ПП приводит к уменьшению $G_{\text{к}}^{\text{нп}}$, что при неизменном расходе острого пара вызывает рост тепловой нагрузки.

Для рассматриваемой ГТ-надстройки в качестве прототипа ГТУ [19] принята Siemens SGT–1000F [20, 21]. Используя параметры и характеристики газотурбинного цикла этой установки, был выполнен расчет схемы ГТУ при температуре наружного воздуха на входе в компрессор $t_{\text{ок}} = +15^\circ\text{C}$, температуре газов на входе в газовую турбину $t_{\text{от}} = 1190^\circ\text{C}$ и степени повышения давления в компрессоре $\varepsilon = 15,6$ [21]. Расход газов $G_{\text{г}} = 281 \text{ кг/с}$ в этом режиме определен из совместного расчета ГТУ и ПТУ при работе паровой турбины в конденсационном режиме. Этот режим в дальнейшем принят за исходный для ГТУ: электрическая мощность ГТ $N_{\text{э}}^{\text{гт}} = 98,6 \text{ МВт}$, температура газов на выходе из ГТ $t_{\text{г}} = 589^\circ\text{C}$, электрический коэффициент полезного действия (КПД) ГТ $\eta_{\text{э}}^{\text{гт}} = 0,368$, удельный расход условного топлива по выработке ЭЭ ГТ $b_{\text{э}}^{\text{гт}} = 349 \text{ г у.т.}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$. Для данного режима показатели работы ПГУ: расход пара на турбоустановку $G_0 = 133,0 \text{ кг/с}$, электрическая мощность ПТ $N_{\text{э}}^{\text{пт}} = 189,4 \text{ МВт}$, электрическая мощность ПГУ $N_{\text{э}}^{\text{пгу}} = 288,0 \text{ МВт}$, УРУТ по выработке электроэнергии $b_{\text{э}}^{\text{пгу}} = 272 \text{ г у.т.}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$. Температура ПП равна номинальной $t_{\text{нп}} = 540^\circ\text{C}$. Расход пара в конденсатор соответствует номинальному конденсационному режиму ПТ $G_{\text{к}} = 115,5 \text{ кг/с}$.

Для определения показателей работы ГТУ при $t_{\text{нв}} = -15^\circ\text{C}$ использовались результаты расчетного режима ГТУ при $t_{\text{нв}} = +15^\circ\text{C}$ и универсальные зависимости изменения основных параметров стационарных энергетических ГТУ по отношению к их значениям по ISO от температуры наружного воздуха [20, рис. 6.25]. Расход газов и воздуха принят одинаковым. Влияние охлаждения учтено снижением электрического КПД ГТ на 2 %. С учетом вышесказанного для режима при $t_{\text{нв}} = -15^\circ\text{C}$ показатели работы ГТУ:

$G_{\text{г}} = 306 \text{ кг/с}$, $N_{\text{э}}^{\text{гт}} = 113,9 \text{ МВт}$, $t_{\text{г}} = 580^\circ\text{C}$, $\eta_{\text{э}}^{\text{гт}} = 0,376$, $b_{\text{э}}^{\text{гт}} = 328 \text{ г у.т.}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$.

Температура уходящих газов (на выходе из КУ) $t_{\text{ух}}$ изначально принимается равной 120°C . Параметры тепловой схемы в переменном режиме определяются по общеизвестным зависимостям Стодоль–Флюгеля для ПТ и поверочного расчета теплообменников. КПД проточной части ПТ для частей высокого и среднего давления принимались постоянными при неизменном расходе острого пара, КПД ЧНД оценивался в зависимости от объемного пропуска пара. Во всех режимах расход питательной воды пропускается через поверхности ГВП ВД, минуя подогреватели высокого давления (ПВД). Необходимый расход основного конденсата поступает в ГВП НД после второго подогревателя низкого давления (ПНД-2) с целью предотвращения низкотемпературной коррозии в котле-утилизаторе. Температура ПВ на входе в паровой котел (ПК) равна номинальному значению и не меняется в вариантных расчетах, температура ОК на входе в деаэрактор также постоянна и соответствует подогреву воды в деаэракторе для конденсационного режима работы ПТУ.

Выбор оптимальной температуры промежуточного перегрева пара при работе ПГУ в теплофикационном режиме

В качестве показателей тепловой экономичности ПГУ [1, 21] при анализе приняты удельный расход условного топлива по выработке электроэнергии (по физическому методу) (1) и коэффициент использования теплоты топлива (КИТТ) (2).

Удельный расход условного топлива по выработке электроэнергии

$$b_{\text{э}}^{\text{пгу}} = \frac{B_{\text{э}}^{\text{пгу}} \cdot 3600}{N_{\text{э}}^{\text{пгу}}}, \text{ г у.т.}/(\text{кВт}\cdot\text{ч}), \quad (1)$$

где $B_{\text{э}}^{\text{пгу}}$, кг у.т./с – расход условного топлива (УТ) по выработке электроэнергии ПГУ; $N_{\text{э}}^{\text{пгу}}$, МВт – электрическая мощность ПГУ.

Коэффициент использования теплоты топлива

$$\text{КИТТ} = \frac{N_{\text{э}}^{\text{пгу}} + Q_{\text{т}}}{Q_{\text{пк}}^0 + Q_{\text{к}}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{т}}$, МВт – тепловая мощность отопительного отбора; $Q_{\text{пк}}^0$, МВт – теплота, выделившаяся при сжигании УТ в ПК; $Q_{\text{к}}$, МВт – теплота, подведенная в камеру сгорания ГТУ.

Результаты расчета представлены в табл. 1.

Оптимальная температура промежуточного перегрева пара в котле-утилизаторе ПГУ в теплофикационном режиме составляет 510°C , что соответствует наименьшему значению УРУТ по выработке электроэнергии $b_{\text{э}}^{\text{пгу}} = 185 \text{ г у.т.}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$. Снижение значения этого показателя достигает 19,5 % по сравнению с энергоблоком Т–165/210–130 при работе в теплофикационном режиме (рис. 3). Оптимальное значение $t_{\text{нп}}$ подтверждается максимальным КИТТ – 0,775. Для энергоблока Т–165/210–130 КИТТ ниже на 11,5 % и составляет 0,695 (рис. 3).

Таблица 1. Результаты расчета тепловой схемы ПГУ при разных значениях температуры промежуточного перегрева пара в КУ при работе в теплофикационном режиме

Table 1. Calculation results of CCPP thermal scheme at different values of steam reheating temperature in heat recovery steam generator (HRS) at operation in heat-extraction mode

Исходные данные/Source data							
$t_{\text{пр}}, ^\circ\text{C}/t_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	540	520	510	500	490	480	460
$G_{\text{к}}^{\text{мин}}, \text{кг/с}/G_{\text{к}}^{\text{мин}}, \text{kg/s}$	27,0	24,0	22,9	21,2	20,3	19,2	18,0
$t_{\text{вх}}, ^\circ\text{C}/t_{\text{вх}}, ^\circ\text{C}$	120,0	120,0	120,0	—	—	—	—
Результаты расчета/Calculation results							
$t_{\text{вх}}, ^\circ\text{C}/t_{\text{вх}}, ^\circ\text{C}$	—	—	—	130,4	140,9	151,5	172,4
$Q_{\text{т}}, \text{МВт}/Q_{\text{т}}, \text{MW}$	286,9	296,6	300,3	302,5	302,7	303,3	302,1
$Q_{\text{к}}, \text{МВт}/Q_{\text{к}}, \text{MW}$	67,3	60,2	57,4	53,4	51,1	48,7	45,5
$N_{\text{э}}^{\text{пр}}, \text{МВт}/N_{\text{э}}^{\text{ст}}, \text{MW}$	180,7	176,9	175,3	172,9	171,0	168,7	165,2
$N_{\text{э}}^{\text{пр}}, \text{МВт}/N_{\text{э}}^{\text{ст}}, \text{MW}$	294,7	290,8	289,2	286,8	284,9	282,6	279,1
КИТТ/FHUF	0,766	0,773	0,775	0,774	0,772	0,769	0,764
$b_{\text{э}}^{\text{пр}}, \text{г у.т.}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$	188	186	185	186	187	188	191
$b_{\text{э}}^{\text{срр}}, \text{г у.т.}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$	188	186	185	186	187	188	191

*При низких температурах перегретого пара $t_{\text{вх}}$ не может быть выдержана на уровне 120 °C и определяется расчетом.

*At low temperatures of reheated steam $t_{\text{вх}}$ cannot be maintained at 120 °C level and is determined by calculation.

Электрическая мощность ТЭС $N_{\text{э}}^{\text{пр}}$ за счет ГТ-надстройки составляет 279–295 МВт во всем диапазоне температур ПП (рис. 4). При уменьшении $t_{\text{пр}}$ падает электрическая мощность паровой турбины $N_{\text{э}}^{\text{пр}}$ и потери тепла в конденсаторе $Q_{\text{к}}$. $N_{\text{э}}^{\text{пр}}$ меняется от 180 до 165 МВт при изменении $t_{\text{пр}}$ от 540 до 460 °C, а $Q_{\text{к}}$ – от 67 до 45 МВт. При оптимальной температуре ПП электрическая мощность ПТ составляет 175 МВт. Этот результат представляет особенный интерес, так как электрическая мощность паровой турбины в новых условиях работы при значении температуры промежуточного перегрева существенно ниже номинального значения, превышает мощность исходного энергоблока Т–165/210–130 на 10 МВт.

Следует отметить, что на значение $N_{\text{э}}^{\text{пр}}$, наряду со снижением $G_{\text{к}}^{\text{мин}}$ при уменьшении $t_{\text{пр}}$, также оказывает влияние на изменение относительного расхода воды через группу регенеративных подогревателей, вызывающее изменение расхода пара в регенеративные отборы паровой турбины $\Sigma G_{\text{рег}}$.

Зависимость $\Sigma G_{\text{рег}}$ от $t_{\text{пр}}$ носит неоднозначный характер из-за необходимости во всех режимах поддерживать заданную температуру ОК на входе в деаэратор. При заданном расходе острого пара G_0 при понижении $t_{\text{пр}}$ до 510 °C сокращается расход пара в отборы на ПНД ПТ из-за увеличения тепловой мощности поверхности ГВП НД в связи с повышением температуры газов после ПП КУ. Падение расхода пара на ПНД одновременно со снижением $G_{\text{к}}^{\text{мин}}$ ведет к дополнительному росту расхода пара в отопительный отбор $G_{\text{т}}$ (рис. 5), что усиливает эффект использования ГТ-надстройки в теплофикационном режиме.

При $t_{\text{пр}}=510$ °C прирост $Q_{\text{т}}$ составляет около 45 % (рис. 4) по сравнению с энергоблоком Т–165/210–130. В этом режиме происходит полное вытеснение ПНД-3 и ПНД-4 рассматриваемой ТУ.

Дальнейшее уменьшение $t_{\text{пр}}$ приводит к неполному использованию теплоты уходящих газов в КУ, соответственно, растут потери с уходящими газами из-за повышения их температуры (рис. 4). Для поддержания заданной температуры ОК перед деаэратором (как было сказано раньше) приходится прибегать к снижению расхода ОК через ГВП НД, что влечет незначительное увеличение значения $\Sigma G_{\text{рег}}$. Таким образом, при температуре ПП ниже 510 °C прирост тепловой мощности отопительного отбора ТУ замедляется.

С понижением температуры перегретого пара происходит все большее вытеснение регенерации низкого давления, вплоть до того, что при значениях $t_{\text{пр}}$ ниже 510 °C происходит неполное использование тепла в котле-утилизаторе, растет температура уходящих газов, соответственно, растут потери с уходящими газами (рис. 4).

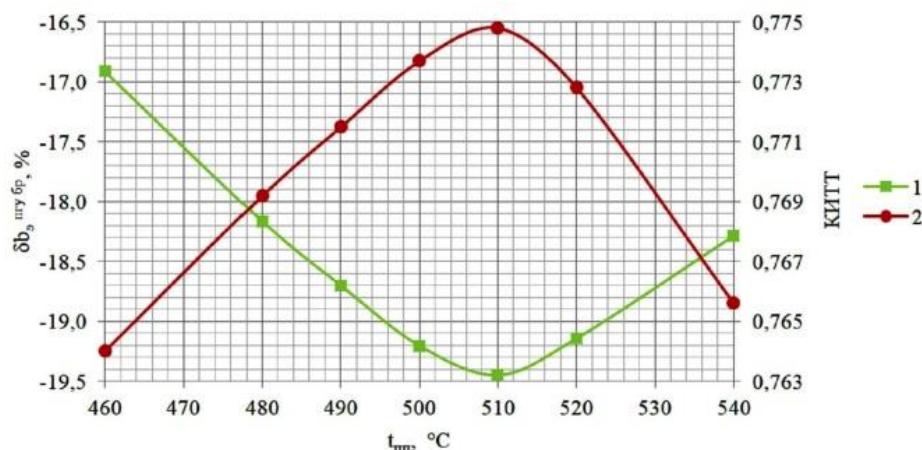


Рис. 3. Снижение УРУТ по выработке электроэнергии по сравнению с энергоблоком Т–165/210–130 и изменение КИТТ в зависимости от температуры промежуточного перегрева пара при работе ПГУ в теплофикационном режиме: 1 – $\delta b_{\text{э}}^{\text{срр}}$; 2 – КИТТ

Fig. 3. Decrease in specific reference fuel consumption for electricity generation in comparison with T–165/210–130 energy unit and dependence of fuel heat utilization factor on steam reheating temperature at operation of CCPP in heat-extraction mode: 1 – $\delta b_{\text{э}}^{\text{срр}}$; 2 – fuel heat utilization factor (FHUF)

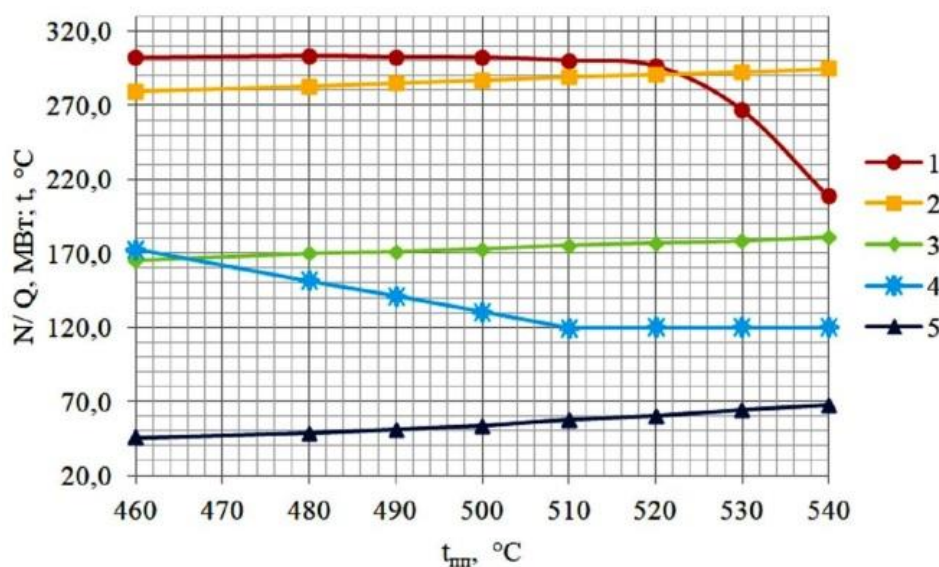


Рис. 4. Зависимость показателей работы ПГУ в теплофикационном режиме от температуры промежуточного перегрева пара: 1 – Q_m ; 2 – N_e^{npy} ; 3 – N_e^{nm} ; 4 – t_{yx} ; 5 – Q_k

Fig. 4. Dependence of CCPP performance at operation in heat-extraction mode on steam reheating temperature: 1 – Q_m ; 2 – N_e^{ccpp} ; 3 – N_e^{st} ; 4 – t_{wg} ; 5 – Q_c

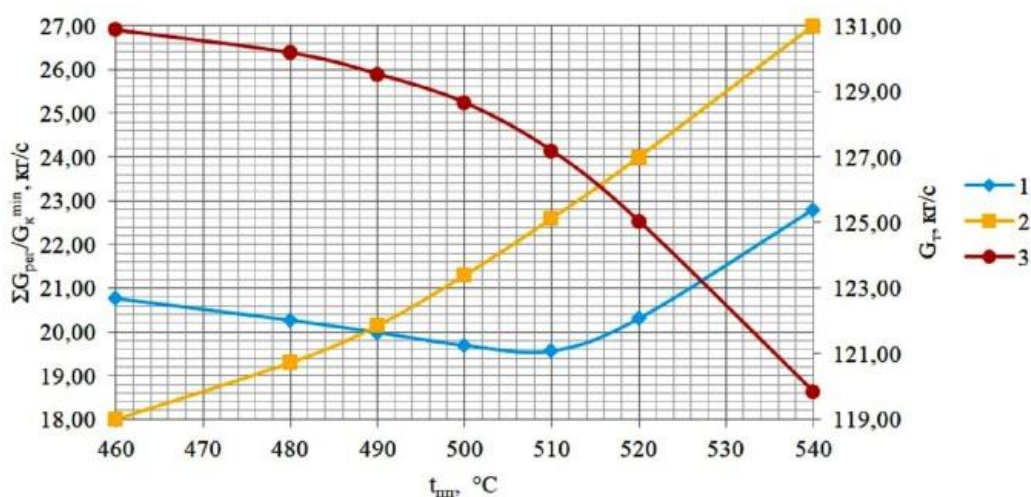


Рис. 5. Зависимость суммарного расхода пара на регенерацию, минимально необходимого для охлаждения последних ступеней турбины расхода пара в конденсатор и расхода пара в отопительный отбор, от температуры промежуточного перегрева пара при работе ПГУ в теплофикационном режиме: 1 – ΣG_{pe} ; 2 – G_k^{min} ; 3 – G_m

Fig. 5. Dependence of the total steam consumption for regeneration, minimum steam consumption to the condenser required for cooling the last stages of steam turbine and the steam consumption to heating extraction on steam reheating temperature at operation of CCPP in heat-extraction mode: 1 – ΣG_{reg} ; 2 – G_c^{min} ; 3 – G_t

Сравнение результатов расчета схемы ПГУ с энергоблоком Т-165/210–130 в характерных режимах работы

В теплофикационном режиме при оптимальной температуре ПП $t_{pm}=510$ °С благодаря ГТ-надстройке электрическая мощность повышается не только за счет ГТУ, но и из-за увеличения мощности самой ПТ (на 6 % по сравнению с исходным вариантом при работе в теплофикационном режиме при $t_{pm}=540$ °С).

Прирост N_e^{npy} относительно исходной схемы ПТУ в конденсационном режиме при номинальной температуре ПП – 37 %, в теплофикационном режиме при оптимальной температуре ПП – 76 % (рис. 6).

Эффективность использования ГТ-надстройки, помимо роста электрической мощности станции на величину мощности газовой турбины, заключается в повышении выработки электроэнергии на тепловом потреблении паровой турбины по сравнению с исходной схемой парового энергоблока за счет возрастания тепловой мощности регулируемого отбора из-за сокращения расхода пара в конденсатор и на регенеративные подогреватели турбины.

Для ПГУ в конденсационном режиме с номинальной температурой ПП $b_3^{npy \text{ бр}}$ снижается на 13 %, в теплофикационном с оптимальной температурой ПП – на 19 % по сравнению с энергоблоком Т-165/210–130.

Тепловая мощность отопительного отбора турбоустановки в составе ПГУ выше, чем исходной схемы ПТУ в теплофикационном режиме, на 90 МВт (за счет снижения минимально необходимого для охлаждения последних ступеней турбины расхода пара в конденсатор из-за понижения температуры ПП и вытеснения регенерации в КУ при сохранении расхода пара на турбину).

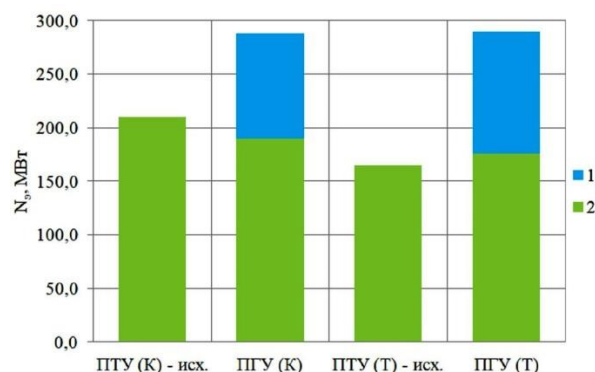


Рис. 6. Прирост электрической мощности ТЭС за счет ГТ-надстройки в конденсационном и теплофикационном режимах по сравнению с энергоблоком Т-165/210–130: 1 – N_e^{zm} ; 2 – N_e^{nm}

Fig. 6. Increase in electric power of thermal power plant due to the GT-topping in condensing and heat-extraction modes compared with T-165/210–130 energy unit: 1 – N_e^{gt} ; 2 – N_e^{st}

Анализ ключевых вопросов, связанных с организацией промежуточного перегрева в КУ ГТ-надстройки

Вытеснение ПП в КУ требует решения вопроса об использовании поверхности промежуточного пароперегревателя парового котла для других целей. Одним из возможных является вариант применения данной поверхности для нагрева циклового воздуха ГТУ. Вопросы реконструкции парового котла в данной работе не рассматриваются, однако предполагается ее возможность [22], поэтому КПД котла сохраняется без изменений.

Вытеснение паровой регенерации может привести к перегрузке отдельных ступеней и отсеков в отдельных режимах при сохранении расхода пара на турбину, равным номинальному значению. В расчетах конденсационного режима расход пара через последнюю ступень турбины не превышал максимально допустимого значения с соответствующим понижением G_0 . В теплофикационном режиме расчет схемы выполнялся при номинальном значении расхода острого пара. Результаты расчета этого режима показывают, что рост паровой нагрузки на отдельные отсеки не приводит к повышению давления в камере регулирующей ступени выше максимально допустимого для прототипа. Вопросы надежности работы ступеней ЦВД наиболее просто решаются для турбин, проектируемых с запасом прочности с целью работы при отключенных ПВД, в противном случае для подтверждения надежности работы отдельных ступеней тре-

буются расчеты на прочность и при необходимости должна выполняться реконструкция проточной части либо рекомендации по снижению расхода острого пара. В последнем случае энергетический эффект снижается и требует пересчета.

Недостатком предложенного схемного решения можно считать проблему, возникающую с промежуточным перегревом пара при отключениях ГТУ в надстроенном энергоблоке, что будет приводить его к останову. Требуется решение вопроса резервирования оборудования.

Выводы

1. Эффективность работы теплофикационного парового энергоблока с промежуточным перегревом может быть повышена путем осуществления промежуточного перегрева в котле-утилизаторе ГТ-надстройки.
2. Вариант ГТ-надстройки с вытеснением промежуточного перегрева пара из парового котла и частичной регенерации турбоустановки Т-165/210–130 в котел-утилизатор позволяет увеличить в конденсационном режиме электрическую мощность на 37 % по сравнению с исходным паротурбинным энергоблоком. Температура ПП сохраняется равной номинальному значению.
3. Наивысшая экономичность ПГУ с вытеснением промежуточного перегрева пара в КУ при работе по тепловому графику с максимальным отпуском теплоты из регулируемого отбора при номинальном давлении пара в отопительном отборе 0,12 МПа с сохранением минимально необходимого для охлаждения последних ступеней турбины расхода пара в конденсатор соответствует $t_{\text{пп}}=510$ °С, что значительно ниже номинального значения (540 °С). Показатели работы ПГУ:
 - электрическая мощность ПГУ – 289 МВт;
 - электрическая мощность ПТ – 175 МВт (выросла на 6 % по сравнению с работой ПТУ в теплофикационном режиме без ГТ-надстройки);
 - отпуск тепла из отопительного отбора порядка 300 МВт;
 - УРУТ по выработке ЭЭ – 185 г у.т./кВт·ч;
 - коэффициент использования теплоты топлива – 0,775.
4. Модернизация ТЭС с использованием ГТ-надстройки с котлом-утилизатором для промежуточного перегрева пара и частичного вытеснения регенерации позволит в отопительный период по сравнению с исходной схемой энергоблока повысить:
 - электрическую мощность станции на 76 %;
 - отпуск теплоты из отопительного отбора внешнему потребителю на 45 %;
 - КИТТ на 11,5 %.
5. Предложенный вариант модернизации позволит снизить УРУТ по выработке электроэнергии в летнем режиме на 13 %, в зимнем – на 19 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Combined Cycle Gas and Steam Turbine Power Plants / R. Kehlhofer, F. Hannemann, F. Stirnimann, B. Rukes. – Tulsa, Oklahoma, USA: PennWell Corporation, 2009. – 434 p.
2. Бурмистров Н.А., Осипов Р.А. Перспективные направления перевооружения действующих ТЭС (тепловых электростанций) на базе газовых надстроек // Электроэнергетика глазами молодежи: Материалы VIII Международной научно-технической конференции. – Самара, 2017. – С. 112–113.
3. Scherer V., Scherer D. The Gas turbine GT26 in combined cycle application: conversion of a coal power plant into a modern combined cycle firing natural gas and oil. – Birmingham: International Gas Turbine Institute/American Society of Mechanical Engineers, 1996. – 10 p.
4. Березинец П.А. Газотурбинная надстройка блока 300 МВт Костромской ГРЭС (государственной районной электростанции) // Электрические станции. – 1999. – № 7. – С. 64–72.
5. Economic efficiency of a gas-turbine topping for steam reheating at heating turbo-installations / O.Yu. Romashova, L.A. Belyaev, A.A. Tubolev, E.A. Skrebatur // MATEC (Materials science, Engineering and Chemistry) Web of Conferences. – 2017. – V. 91. – 5 p.
6. Заугольников Я.А., Ромашова О.Ю., Скребатун Е.А. Экономичность использования газотурбинной надстройки на энергоблоках тепловых электростанций // Интеллектуальные энергосистемы: Труды III Международного молодежного форума. – Томск, 2015. – Т. 2. – С. 107–110.
7. Efficiency of steam reheating in heat recovery steam generator at thermal power plant with gas turbine topping / O.Yu. Romashova, A.A. Minor, V.N. Martyshev, A.A. Tubolev // MATEC (Materials science, Engineering and Chemistry) Web of Conferences. – 2017. – V. 110. – 8 p.
8. Development of natural gas fired combined cycle plant for tri-generation of power, cooling and clean water using waste heat recovery: techno-economic analysis / G. Mohan, S. Dahal, U. Kumar, A. Martin, H. Kayal // Energies. – 2014. – № 7. – P. 6358–6381.
9. Karaagac M.O., Kabul A., Yigit F. Performance analysis of Natural Gas Combined Cycle Power Plant // Journal of Polytechnic – Politeknik Dergisi. – 2019. – V. 22. – P. 319–325.
10. Selection of optimal reheat temperature in heat recovery boiler at combined heat and power plant with gas turbine topping / O.Yu. Romashova, A.A. Tubolev, A.A. Matveeva, A.V. Zenkov // MATEC (Materials science, Engineering and Chemistry) Web of Conferences. – 2017. – V. 141. – 4 p.
11. Особенности схемных решений паротурбинных установок ЗАО (закрытого акционерного общества) «Уральский турбинный завод», входящих в состав ПГУ (парогазовых установок) / А.А. Гольдберг, Т.Л. Шибаев, Х.К. Панэке Агилера, М.Ю. Степанов // Теплоэнергетика. – 2013. – № 8. – С. 27–31.
12. Khan M.N., Tlili I. New advancement of high performance for a combined cycle power plant: thermodynamic analysis // Case Studies in Thermal Engineering. – 2018. – № 12. – P. 166–175.
13. The optimum performance of the combined cycle power plant: a comprehensive review / T.K. Ibrahim, M.K. Mohammed, O.I. Awad, M. Rahman, G. Najafi, F. Basrawi, A.N.A. Alla, R. Mamat // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – V. 79. – P. 459–474.
14. Javadi M.A., Ghomashi H. Thermodynamics analysis and optimization of Abadan combined cycle power plant // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – V. 9. – № 7. – 12 p.
15. Thermodynamic evaluation of combined cycle plants / N. Woudstra, T. Woudstra, A. Pirone, T. van der Stelt // Energy Conversion and Management. – 2010. – V. 51. – № 5. – P. 1099–1110.
16. Соболев С.П. Паровая турбина К–160–130 ХТГЗ (Харьковского турбогенераторного завода). – М.: Энергия, 1980. – 192 с.
17. Балабанович В.К. Охлаждение проточной части паровых турбин на режимах с минимально-вентиляционными пропусками пара // Известия вузов. Энергетика. – 1981. – № 11. – С. 105–107.
18. Проведение эксплуатационных испытаний турбины Т–178/210–130 ст. № 12 с целью определения фактической экономичности и корректировки диаграммы режимов ОАО (открытое акционерное общество) «Сургутская ГРЭС-1» (государственная районная электростанция): технический отчет / ОАО (открытое акционерное общество) «Инженерный центр энергетики Урала» – предприятие «УралОРГРЭС» (организация и рационализация государственных районных электростанций и сетей). – Екатеринбург, 2008. – 97 с.
19. Ibrahim T.K., Rahman M.M., Abdalla A.N. Gas turbine configuration for improving the performance of combined cycle power plant // Procedia Engineering. – 2011. – V. 15. – P. 4216–4223.
20. Газотурбинные энергетические установки / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.С. Земцов, А.С. Осыка. – М.: ИД Московского энергетического института, 2011. – 428 с.
21. Трухний А.Д. Парогазовые установки электростанций. – М.: ИД Московского энергетического института, 2013. – 648 с.
22. Ольховский Г.Г., Чернецкий Н.С., Березинец П.А. Модернизация энергетических блоков путем их надстройки газовыми турбинами // Электрические станции. – 1997. – № 4. – С. 9–18.

Поступила 12.09.2019 г.

Информация об авторах

Минор А.А., аспирант НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ромашова О.Ю., кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.311.22.002.5:621.181.27.013.3:621.438

EFFICIENCY ANALYSIS OF STEAM REHEATING IN HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR OF HEAT-EXTRACTION ENERGY UNIT GT-TOPPING

Alexander A. Minor¹,
aam45@tpu.ru

Olga Yu. Romashova¹,
roma@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. Redeveloping of the existing heat-power equipments is one of the priority areas of power generation development. Adoption of gas turbine unit to the thermal scheme of steam-power energy unit with the preservation of power plant infrastructure is a less costly variant comparing with the construction of new combined cycle power plants energy units. One of the low-cost variant for the integration of gas turbine units into the thermal scheme of steam-turbine energy units is to use the heat recovery steam generator thermal capacity for reheating the working fluid spent in the steam turbine with utilization of the remaining heat for feed water and main condensate heating. Compared with the most common schemes with displacement of regenerative heating to heat recovery steam generator, the proposed alternative variant allows increasing the thermal efficiency of the steam-turbine circuit. The analysis of gas turbine units energy characteristics showed the need to research the scheme and parameters of the steam reheating for heat-extraction energy units taking into account the operating modes of steam turbine.

Object: steam-turbine energy unit T–165/210–130 with gas turbine topping (GT-topping) for reheating of the working fluid spent in the steam turbine with utilization of the remaining heat for feed water and main condensate heating.

The aim of the research is to select scheme and calculate the optimal parameters of steam reheating as applied to the steam-turbine energy unit T–165/210–130 with GT-topping, analyze its main performances during the work on the heat schedule when steam reheating temperature changes in heat recovery steam generator.

Methods: system analysis and mathematical modeling.

Results. The authors have developed the mathematical model and program for calculating the proposed scheme and performed the features analysis associated with the organization of steam reheating in GT-topping heat recovery steam generator. Furthermore, we showed that the efficiency of heat-extraction energy unit with steam reheating can be increased by organizing steam reheating in GT-topping heat recovery steam generator. In addition, we determined that in this case, the highest efficiency of a steam-turbine energy unit with GT-topping during operation in the design heat-extraction mode is achieved, when steam reheating temperature is below the nominal value.

Key words:

Steam reheating, combined cycle power plant, gas turbine topping, heat recovery steam generator, heat-extraction mode, specific fuel consumption, fuel heat utilization factor, steam consumption, electrical power, thermal load.

REFERENCES

- Kehlhofer R., Hannemann F., Stirnimann F., Rukes B. *Combined Cycle Gas and Steam Turbine Power Plants*. Tulsa, Oklahoma, USA, PennWell Corporation, 2009. 434 p.
- Burmistrov N.A., Osipov R.A. Perspektivnye napravleniya perevooruzheniya deystvuyushchikh TES (teplovyykh elektrostantsiy) na baze gazovyykh nadstroek [Promising directions of re-equipment of operating thermal power plants based on gas turbine toppings]. *Elektroenergetika glazami molodezhi. Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Youth visioning for Electric Power Engineering. Proceedings of the eighth International science and technology conference]. Samara, 2017, pp. 112–113.
- Scherer V., Scherer D. The Gas Turbine GT26 in Combined Cycle application: conversion of a Coal Power Plant into a modern combined cycle firing natural gas and oil. *International Gas Turbine Institute/American Society of Mechanical Engineers*. Birmingham, 1996. 10 p.
- Berezinec P.A. Gazoturbinnaya nadstroyka bloka 300 MVt Kostromskoy GRES (gosudarstvennoy rayonnoy elektrostantsii) [Gas turbine topping of 300 MW energy unit of Kostromskaya regional electric power plant]. *Elektricheskie stantsii*, 1999, no. 7, pp. 64–72.
- Romashova O.Yu., Belyaev L.A., Tubolev A.A., Skrebatun E.A. Economic efficiency of a gas-turbine topping for steam reheating at heating turbo-installations. *MATEC (Materials science, Engineering and Chemistry) Web of Conferences*, 2017, vol. 91, 5 p.
- Zaugolnikova Ya.A., Romashova O.Yu., Skrebatun E.A. Ekonomichnost ispolzovaniya gazoturbinnoy nadstroyki na energoblokakh teplovyykh elektrostantsiy [Economy of gas turbine topping use at thermal power plant energy units]. *Intellektualnye energosistemy. Trudy III Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma* [Smart Grids. Proc. of the third International youth forum]. Tomsk, 2015. Vol. 2, pp. 107–110.
- Romashova O.Yu., Minor A.A., Martyshev V.N., Tubolev A.A. Efficiency of steam reheating in heat recovery steam generator at thermal power plant with gas turbine topping. *MATEC (Materials science, Engineering and Chemistry) Web of Conferences*, 2017, vol. 110, 8 p.
- Mohan G., Dahal S., Kumar U., Martin A., Kayal H. Development of natural gas fired combined cycle plant for tri-generation of power, cooling and clean water using waste heat recovery: Techno-economic analysis. *Energies*, 2014, no. 7, pp. 6358–6381.
- Karaagac M.O., Kabul A., Yigit F. Performance Analysis of Natural Gas Combined Cycle Power Plant. *Journal of Polytechnic – Politeknik Dergisi*, 2019, vol. 22, pp. 319–325.
- Romashova O.Yu., Tubolev A.A., Matveeva A.A., Zenkov A.V. Selection of optimal reheat temperature in heat recovery boiler at combined heat and power plant with gas turbine topping. *MATEC (Materials science, Engineering and Chemistry) Web of Conferences*, 2017, vol. 141, 4 p.
- Goldberg A.A., Shibaev T.L., Paneke Agilera H.K., Stepanov M.Yu. Features of scheme solutions for steam turbine plants of ZAO «Ural Turbine Works», which are part of the CCPs (combined cycle power plants). *Teploenergetika*, 2013, no. 8, pp. 27–31. In Rus.

12. Khan M.N., Tlili I. New advancement of high performance for a combined cycle power plant: thermodynamic analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2018, no. 12, pp. 166–175.
13. Ibrahim T.K., Mohammed M.K., Awad O.I., Rahman M., Najafi G., Basrawi F., Alla A.N.A., Mamat R. The optimum performance of the combined cycle power plant: a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 79, pp. 459–474.
14. Javadi M.A., Ghomashi H. Thermodynamics analysis and optimization of Abadan combined cycle power plant. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, vol. 9, no. 7, 12 p.
15. Woudstra N., Woudstra T., Pirone A., Van der Stelt T. Thermodynamic evaluation of combined cycle plants. *Energy Conversion and Management*, 2010, vol. 51, no. 5, pp. 1099–1110.
16. Sobolev S.P. *Parovaya turbina K-160-130 HTGZ (Kharkovskogo turbogeneratornogo zavoda)* [Steam turbine K-160-130 HTGZ (Kharkov turbine generator plant)]. Moscow, Energiya Publ., 1980. 192 p.
17. Balabanovich V.K. Ohlazhdenie protochnoy chasti parovykh turbin na rezhimakh s minimalno-ventilyatsionnymi propuskami para [Cooling of steam turbines flow path on modes with minimum ventilation consumptions of steam]. *Izvestiya vuzov. Energetika*, 1981, no. 11, pp. 105–107.
18. *Provedenie ekspluatatsionnykh ispytaniy turbiny T-178/210-130 st. № 12 s tselyu opredeleniya fakticheskoy ekonomichnosti i korrektirovki diagrammy rezhimov OAO «Surgutskaya GRES-1» (gosudarstvennaya rayonnaya elektrostantsiya): tekhnicheskiy otchet* [Performance tests of turbines T-178/210-130 st. no. 12 for defining actual efficiency and adjusting steam-consumption diagram of OAO «Surgut regional electric power plant-1»: technical report]. Ekaterinburg, 2008. 97 p.
19. Ibrahim T.K., Rahman M.M., Abdalla A.N. Gas turbine configuration for improving the performance of combined cycle power plant. *Procedia Engineering*, 2011, vol. 15, pp. 4216–4223.
20. Canev S.V., Burov V.D., Zemtsov A.S., Osyka A.S. *Gazoturbinnyye energeticheskiye ustanovki* [Gas turbine power plants]. Moscow, Moscow Power Engineering Institute Publ. house, 2011. 428 p.
21. Trukhnii A.D. *Parogazovyye ustanovki elektrostantsiy* [Steam-gas installations of power plants]. Moscow, Moscow Power Engineering Institute Publ. house, 2013. 648 p.
22. Olkhovskiy G.G., Chernetskiy N.S., Berezinets P.A. Modernizatsiya energeticheskikh blokov putem ikh nadstroyki gazovymi turbinami [Redeveloping of energy units by their topping with gas turbines]. *Elektricheskiye stantsii*, 1997, no. 4, pp. 9–18.

Received: 12 September 2019.

Information about the authors

Alexander A. Minor, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Olga Yu. Romashova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 624.131

ТИПИЗАЦИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ТЕРРИТОРИИ ТРАССЫ ПРОЕКТИРУЕМОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ЭЛЕГЕСТ–КЫЗЫЛ–КУРАГИНО

Строкова Людмила Александровна¹,
sla@tpu.ru

Надеждина Юлия Юрьевна¹,
levak.yuliya@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена разработкой проекта первой железной дороги в Тыве, которая должна связать Тыву с Красноярским краем. Трасса планируется в сложных инженерно-геологических условиях. В статье представлена типизация инженерно-геологических условий территории трассы. Инженерно-геологическая оценка территории необходима для того, чтобы поддержать процесс принятия решений по размещению сооружений, а также чтобы строительство объектов осуществлялось с меньшим отрицательным воздействием на окружающую среду, сопровождалось снижением опасности и ущерба как для строительства, так и в целом для общества и экономики.

Целью данного исследования является типологическое и региональное инженерно-геологическое районирование территории с учетом последних работ по изучению инженерно-геологических условий трассы.

Объектом исследования является геологическая среда района проектируемой трассы Кызыл–Курагино. Рассмотрены основные природные компоненты, влияющие на формирование инженерно-геологических условий: геоморфологические и тектонические условия; литологический состав; физико-механические свойства пород, гидрологические, гидрогеологические и мерзлотные условия района, экзогенные и эндогенные геологические процессы.

Методы: краткий обзор литературных источников и анализ информации, полученной из фондов изыскательских организаций, определение признаков и методики районирования. Все информационные слои о природной среде обрабатывались, затем объединялись для получения единой инженерно-геологической карты с характеристикой районов.

Результаты. Выбраны классификационные признаки геологической среды, и составлена карта районирования инженерно-геологических условий участка трассы, дана характеристика выделенных таксонов.

Выводы. Дана характеристика основных факторов региональной инженерно-геологической обстановки, и приведены результаты районирования на основе принципа формационного анализа и типизации инженерно-геологических условий территории.

Ключевые слова:

Инженерно-геологические условия, региональные факторы, железная дорога, районирование, геологические процессы.

Введение

Строительство железной дороги Курагино–Кызыл–Элегест будет способствовать развитию производственного комплекса и экономики Тывы. На пути железной дороги (длиной в 412 км: 124 км по Тыве и 288 км по Красноярскому краю) – хребты Западного Саяна, через которые необходимо пройти восемь тоннелей и соорудить 127 мостов (в отдельных местах высота опор будет достигать 90 м). Дорога потребует сооружения 1087 водопропускных труб, протяженностью более 25 км и строительства более 600 км автодорожных подъездов и временных автодорог. Строительство будет осуществляться в крайне сложных инженерно-геологических условиях.

Слабая изученность инженерно-геологических условий (ИГУ) региона из-за труднодоступности местности, суровости климата повышает значимость инженерно-геологического типологического районирования этой территории. Технология его выполнения, включающая следующий ряд «последовательных операций: определение границы территории (объекта); изучение объекта; выбор классификационных признаков типизации; их ранжирование по степени значимости; разделение рассматриваемой территории (объекта) по принятым признакам; построение итоговой карты районирования территории», подробно

изложена в работах [1–9]. Этот метод позволяет упорядочить имеющиеся знания об инженерно-геологических особенностях территории, поэтому давно и широко используется в мире [10–18].

Изучение основных закономерностей формирования, пространственного распределения и изменения самих инженерно-геологических условий тесно связано с изучением инженерно-геологических структур, под которыми понимаются «объемные природные образования, различающиеся по признакам, наиболее значимым с точки зрения инженерно-строительной деятельности» [19, 20].

Краткая характеристика инженерно-геологических структур России и, в частности, Алтае-Саянской горной области приведена в монографии [21]. В соответствии с последней классификацией инженерно-геологических структур Земли [22], по *регионально-геологическому* ряду Алтае-Саянская область относится к континентальному древнему орогену. По *зонально-климатическому* ряду область относится к субэкральной структуре 1-го порядка, внутри которой выделяются структуры 2-го порядка по зонам сплошного, прерывистого, островного распространения вечной мерзлоты и ее отсутствия.

Освоение территории требует более детальной инженерно-геологической характеристики района.

Выполнение типизации ИГУ поможет обоснованно выбрать наиболее оптимальный вариант трассы. Для этого необходимо рассмотреть основные особенности геологической среды, влияющие на планирование и развитие землепользования: сейсмотектонику; литологию; топографию; гидрологию, гидрогеологию и вечную мерзлоту.

Целью данного исследования является типизация инженерно-геологических особенностей района с учетом последних работ по изучению ИГУ трассы.

Исследование проведено весной 2019 г. в отделении геологии ТПУ. Оно включало анализ литературных и фондовых материалов, полученных при инженерно-геологических изысканиях отдельных участков трассы, выполненных различными проектными организациями в 2009–2019 гг.; их обобщение и районирование.

Характеристика инженерно-геологических условий

Основные особенности любой территории обусловлены совокупностью геологических процессов, реализованных в ходе истории геологического развития территории, поэтому одним из основных признаков типизации является тектоническое строение территории.

В *тектоническом* отношении зона предполагаемой трассы находится в центральной части Алтае-Саянской области, относится к типу мозаично-блоковых и представляет из себя коллаж разновозрастных и разнотипных сооружений [23, 24]:

- палеомикроконтинентов – *добайкальских* массивов на юго-востоке (Сангиленская глыба) и островодужно-офиолитовых поясов (Куртушибинский, Борусский, Западно-Тывинский, Северо-Саянский);
- пассивных континентальных окраин палеокеанов: *салаирских* складчатых систем – на северо-востоке (Восточносаянская), востоке (Восточно-Тывинская), на юго-востоке (Верхне-Енисейская); *каледонских* – на западе и юго-западе (Западносаянская-Тывинская система);
- ареалов проявления коллизионного интрузивного магматизма;
- наложенные структуры позднепалеозойской, мезозойской активизации и кайнозойского рифтогенеза, выраженные морфологически в виде впадин, прогибов и линейных зон деформаций, линейных ареалов малых интрузий, роев даек и излияний базальтов.

Из *Восточносаянской* системы в северной части площади находится Казым-Кизирский синклиниорий Сисимо-Казырской салаирской складчатой зоны. В ее строении принимают участие отложения позднего рифея, венда и кембрия, нарушенные многочисленными разломами и интрузиями разного возраста. Широко развита орогенная моласса, представленная конгломератами, гравелитами, песчаниками с редким присутствием вулканогенных пород, в основном туфов, от основного до кислого состава. Мощность комплекса более 3000 м.

Восточно-Тывинская салаирская система располагается в восточной части площади, представлена Систигхемским синклиниорием – орогенной структурой длительного развития (Є2-С). Северный борт синклинория срезается Кандатским разломом, а южный – Хемчикско-Азасским. Западная граница почти нацело перекрывается зоной Куртушибинского разлома. На завершающей стадии каледонской складчатости здесь образовался крупный Хемчикско-Систигхемский прогиб. Ширина прогиба меняется от 60 км в юго-западной части до 30 км в северо-восточной. Прогиб выполнен терригенно-карбонатной флишовой и карбонатно-терригенной молассовой формациями ордовика и силура. Мощность флишовой комплекса непостоянна от 5500 м на северо-востоке до 8000 м на юго-западе [23, 24].

Верхне-Енисейская салаирская складчатая система включает в себя Восточно-Таннуольский антиклинорий и Ондумский синклиниорий.

Каледонская структура *Западного Саяна* имеет покровно-складчатое строение с элементами складчатого-глыбовой. Основные тектонические элементы отделены друг от друга разломами как глубинного, так и регионального характера. Как складчатое сооружение Западный Саян ограничен зонами глубинных разломов: с севера – Саяно-Минусинским и Кандатским, с юго-востока – Куртушибинским. В этих зонах развиты гипербазиты и зеленокаменноизмененные осадочно-вулканогенные породы верхнего рифея, венда, нижнего и среднего кембрия и силура. В совокупности они образуют крупные офиолитовые аллохтоны: Северо-Саянский, Борусский и Куртушибинский. Офиолитовые аллохтоны представляют собой ассоциацию альпинотипных гипербазитов и интенсивно деформированных вулканитов, мощность их более 6–7 км, возраст не выходит за пределы позднего рифея и самого начала раннего кембрия.

В Западносаянских каледонидах выделяются две зоны: Северо-Саянская и Центрально-Западносаянская. Северо-Саянская зона сложена породами от нижнего до среднего кембрия. Границы зоны тектонические. Морфологически это крупный по размерам прогиб. Как горная система Северо-Саянская зона продолжает испытывать поднятие и в настоящее время, находясь в зоне сейсмически активного Саяно-Минусинского разлома. Центрально-Западносаянская зона составляет основную, большую, часть Западного Саяна. Она ограничена разломами: с севера – Саяно-Минусинским, с юго-востока – Куртушибинским. В северо-западной части Центрально-Западносаянская зона разделяется Борусским офиолитовым аллохтоном на две неравные части: меньшая соответствует Джебашскому антиклинорию, большая – Центрально-Западносаянскому синклинирию. В их строении участвуют вулканогенно-осадочные отложения мощностью до 30 км, по возрасту от венда до позднего силура, разбитые на блоки. Центральная часть Западного Саяна насыщена многочисленными разновеликими массивами гранитоидов не древнее раннего девона [24].

Одними из главных структур Алтае-Саянской складчатой области являются *посторогенные структуры*, сформированные в режиме континентального рифтогенеза, которые представлены в пределах Красноярского края палеозойскими впадинами: Южно-Минусинской и Усинской. Мощность рыхлых отложений более 4000 м. В пределах Тывы структуры палеозойской активизации включают Центрально-Тывинский рифтогенный прогиб, Хемчикский, Тоджинский, Турано-Уюкский грабены, Кызыльскую, Элегетскую и Онкажинскую наложенные мульды. К наложенным структурам мезозойской активизации относят Улуг-Хемскую и Шагонарскую угленосные впадины с мощностью рыхлых отложений более 2500 м, к структурам кайнозойской активизации – Хемчикскую, Чаданскую и Буренскую впадины с мощностью рыхлых отложений от 150 до 400 м [23].

Большую роль в разграничении структур играют глубинные (мантийные) и региональные разломы.

В *геоморфологическом* отношении территория трассы характеризуется большим разнообразием. Здесь распространены высокогорные (более 2000 м), среднегорные хребты с абсолютными отметками 1000...2000 м, низкогорные – до 1000 м, а также аккумулятивные и денудационные равнины меж- и внутригорных впадин с высотами поверхности 300...700 м.

Геокриологические условия. Формирование криолитозоны связано с образованием высокоподнятых гор. Характерные для настоящего времени природные условия начали складываться в палеогене и окончательно сформировались в четвертичный период.

В Саянах общая площадь оледенения составляет около 33 км², преобладают каровые ледники небольшого размера. На Западном Саяне обнаружено 52 маленьких ледника общей площадью чуть больше 2 км², а в пределах Восточного Саяна – 107 ледников (30 км²). Большое значение в существовании ледников имеет метелевый перенос снега. Ледники Саян мало изучены. Заключение об уменьшении размеров ледников ученые делают, принимая во внимание положение конечных морен, зафиксированных экспедициями 1960-х гг. [21].

Важной особенностью этой территории является широкое и чрезвычайно пестрое *распространение сезонной мерзлоты и многолетнемерзлых пород (ММП)*.

Пояс *сплошного* распространения ММП представлен в наиболее приподнятых горных массивах либо отдельных вершинах хребтов на высотах 2000 м и выше. На участках сплошного распространения ММП занимают 90 % площади и фиксируются на большинстве склонов, в том числе и южной экспозиции. Данных о температуре и мощности мерзлых толщ для наибольших высот Саяно-Алтайской области нет [21]. Однако по аналогии с Горным Алтаем предполагаемая мощность мерзлой толщи горных пород высокогорий Тывы может быть 400 м и достигать 1 км. На карте геокриологического районирования СССР показана мощность ММП 200–400 м со среднегодовой температурой от –3 до –5 °С [25].

Пояс *прерывистого* распространения ММП представлен в интервале высот 1500–2000 м. В этом же геокриологическом поясе находятся хребты Западный и Восточный Танну-Ола, что объясняется их расположением в окружении степей и связанным с этим недостаточным увлажнением грунтов. Встречаются участки прерывистой мерзлоты в Тоджинской котловине. В этом поясе ММП развиты не только на дне депрессий и в привершинных частях склонов северной экспозиции, но и у их подножий. Мощность мерзлой толщи горных пород изменяется до 100 м, реже до 300 м со среднегодовой температурой от 0 до –2 °С. Глубина сезонного протаивания грунтов составляет 0,4...0,5 м в торфяниках, 0,3...2,5 м в суглинках, и 1...3,2 м в супесях.

Островное распространение ММП представлено широкой полосой в нижней части хребтов Восточного Танну-Ола, хребта Обручева, почти полностью охватывает Тоджинскую и Туран-Уюкскую впадины и в незначительной мере – Тывинскую депрессию. В горах островная мерзлота развита в интервале высот 1000...1500 м в зависимости от экспозиции склонов, литологического состава грунтов, их влажности, почвенно-растительного покрова. В котловинах мерзлота обнаруживается на высоте 500...900 м. Мощность ММП незначительная, в горах – 10...30 м, на дне котловин – 5...15 м, редко 30 м. Средняя многолетняя температура колеблется от 0 до –1,5 °С.

Пояс редкоостровной многолетней мерзлоты представлен в степных и полупустынных ландшафтах Тывинской котловины, на склонах окружающих их хребтов в интервале высот 600...1200 м. Среди талых пород в пониженных частях котловин встречаются редкие острова многолетнемерзлых пород и перелетки.

Пояс *сезонного промерзания пород* представлен в ландшафтах Южно-Минусинской котловины.

Характер ММП и сезонной мерзлоты в разных ландшафтно-геоморфологических условиях региона определяет развитие криогенных процессов. На плоских водораздельных поверхностях и склонах высокогорий мерзлотные процессы представлены нагорными террасами, курумами, криоструктурными и солифлюкционными образованиями [25]. В днищах межгорных котловин широко развиты морозобойные трещины, бугры пучения, наледи и термокарстовые просадки и наледеобразование. В условиях альпийского рельефа активно проявляются нивальные и эрозионно-денудационные процессы, обуславливающие широкое распространение обвалов, осыпей, подвижных курумов, донной эрозии, селей, снежных лавин (рис. 1).

В *гидрогеологическом* отношении территория трассы располагается в границах единой гидрогеологической Алтае-Саянской складчатой области, представляющей собой сложную систему гидрогеологических массивов (Восточно-Саянский, Западно-Саянский и Восточно-Тывинский) и межгорных бассейнов. В пределах последних выделены Южно-Минусинский, Усинский, Улуг-Хемский адартезианские бассейны с различной обводненностью, минерализацией [23, 24].



a/a



b/b

Рис. 1. а) нарушение лишайникового покрова, свидетельствующее о подвижности курума (хр. Чатырба-Тайга); б) осыпь на р. Ус (фото В. Сергеева)

Fig. 1. a) violation of the lichen cover, indicating the mobility of stone run (ridge Chatyrba-Tayga); b) scree on the river Us (photo by V. Sergeev)

Гидрогеологические массивы, сложенные осадочными и метаморфическими породами докайнозойского возраста и интрузивными породами, содержат трещинно-поровые воды зоны трещиноватости скальных пород, трещинно-карстовые воды в районах развития карбонатных разностей и трещинно-жильные воды зон тектонических нарушений.

Наиболее развиты по площади воды зоны приповерхностной трещиноватости, часто имеющей мощность не более 100 м, редко 150 м и более. Глубина залегания трещинных вод до 50...60 м. В связи с различной степенью трещиноватости пород воды распределены неравномерно как по площади, так и в разрезе. Преобладающая водообильность пород невелика: дебиты родников 0,1...3 л/с, лишь иногда достигают 10 л/с.

Трещинно-жильные воды, приуроченные к зонам тектонических нарушений, часто выходят на поверхность в виде восходящих родников с дебитом до 5...10 л/с, а дебиты скважин достигает 50 л/с. От других типов вод отличаются минерализацией и солевым составом: встречаются гидрокарбонатные натриево-кальциевые и гидрокарбонатные натриевые, сульфатные натриевые, азотные кремнистые, сероводородные

воды. Обычно это холодные, иногда термальные воды, пресные, солоноватые с минерализацией до 3 г/л, реже соленые. В них чаще, чем в других типах вод, встречаются агрессивные по отношению к бетону и металлу.

Криогидрогеологические массивы характеризуются широким, практически сплошным, развитием многолетнемерзлых пород, мощность которых, как правило, превышает мощность зоны трещиноватости. На территориях с прерывистым развитием многолетнемерзлых горных пород могут присутствовать участки как гидрогеологических, так и криогидрогеологических массивов со всеми присущими им особенностями.

Артезианские бассейны приурочены к межгорным впадинам, выполненным рыхлыми кайнозойскими отложениями, в меньшей мере формациями мезозоя. Подземные воды развиты в породах всего чехла каждого из бассейнов. Основные запасы подземных вод сосредоточены в наиболее древних водоносных комплексах, выполняющих впадину. В строении артезианских бассейнов участвуют также воды зон разломов, а в бассейнах со сплошным развитием – многолетнемерзлых пород.

В долинах крупных рек водоносные горизонты мощностью 2...7 м приурочены к аллювиальным пескам и галечникам, глубина их залегания изменяется от 0,5...8 м на поймах до 5...12 м на низких террасах и до 15 м на средних и высоких террасах. Годовая амплитуда уровня грунтовых вод достигает 1...2,5 м, наиболее высокое его положение отмечается в конце мая – начале июня. Удельные дебиты скважин в песчано-гравийно-галечниковых отложениях пойм и низких террас близки к 1,5 л/с.

Подземные воды озёрно-аллювиальных отложений приурочены к песчано-гравийно-галечниковым пачкам, залегающим на глубине 10...25 м, или к прослойкам и линзам песков, залегающим среди водупорных пород на различной глубине. Часто они имеют спорадический характер, во многих случаях обводнены незначительно. Дебиты скважин не превышают долей литра в секунду.

Подземные воды аллювиально-пролювиальных образований, слагающих предгорные шлейфы и конусы выноса, встречаются на глубине 5...50 м. Водоносность пород крайне неравномерна – преобладают слабодоносные породы, но в отдельных случаях отмечаются выходы родников с дебитами до 5 л/с [23, 24].

Важные особенности подземных вод региона изучены недостаточно и неравномерно. Особенно плохо изучена агрессивность подземных вод. Имеются указания на изменения агрессивности грунтовых вод и верховодки в зависимости от сезона. Подземные воды могут значительно осложнять проходку горных выработок и устройство выемок.

Методика и результаты исследований

Наше исследование включало анализ литературных и фондовых материалов, установление принципов и методики районирования, картографирование. Методические основы выполненного районирования

основываются на схемах, разработанных И.В. Поповым, Г.А. Голодковской, В.Т. Трофимовым [22], Сулакшиной Г.А., Емельяновой Т.Я., Строковой Л.А. [23–29], в которых учитываются как региональные-

геологические, так и зонально-климатические особенности инженерно-геологических условий. Создание карты проводилось в следующей последовательности (рис. 2.)

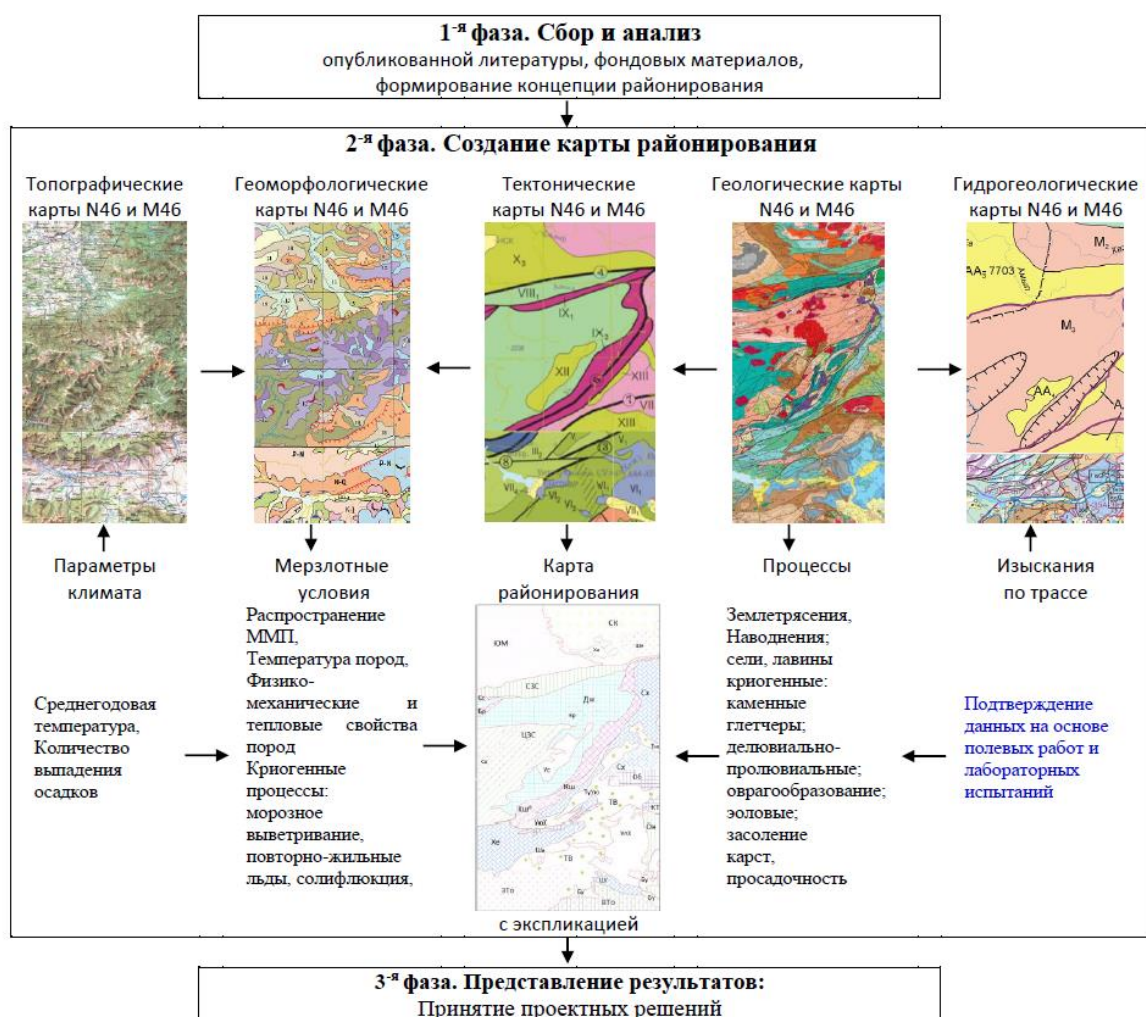


Рис. 2. Схема разработки карты

Fig. 2. Flowchart of mapping

Вначале были собраны и проанализированы имеющиеся опубликованные и фондовые материалы и разработана концепция районирования. В качестве источников информации для составления карты отобраны данные: региональных геологических исследований района масштаба, результатов бурения и опробования 2418 инженерно-геологических скважин в 2012–2017 гг. Состав и физико-механические свойства изучены по 5965 пробам грунтов и 1027 образцов скальных пород, в их определении непосредственно участвовала Ю.Ю. Надеждина. При разработке карты районирования в AutoCAD были созданы следующие информационные слои: «Рельеф» с горизонталями 1000, 1500, 2000, 2500 м; «Мерзлотные границы» с зонами сплошного, перерывистого, островного распространения мерзлоты; «Реки и водоемы», «Геология» и «Тектоника» – растры из [30, 31]; «Процессы гравитационные» – места курумов, оврагов; «Заболачивание» – оцифрованы с топоосновы;

«Селевая активность», «Лавинная опасность», «Интенсивность землетрясений», «Карст», «Оползневая опасность», «Интенсивность неотектонических движений», «Просадочность», последние слои – растры из [32].

Выделение единиц настоящего районирования проводилось по генетико-морфологическому типу, смешанному (типологическому и региональному) виду районирования (по систематике В.Т. Трофимова, 1979). Вначале при типологическом районировании выделены структуры I-го порядка (мегаструктуры) по площади распространения ММП и структуры II-го порядка – мезоструктуры (по геоструктурному признаку – складчатые системы/впадины). Далее районирование осуществлялось по региональному (индивидуальному) виду с учетом основных регионально-геологических и зонально-климатических условий. В пределах структур II-го порядка выделены 26 структур III-го порядка (микроструктуры).

Главным фактором, контролирующим сложность строительного освоения, распространение геологических процессов, являются тектоническое строение территории и неотектоническая активность, именно они служат тем фокусом, в котором отражаются инженерно-геологические особенности территории, возникающие в процессе «геологической» жизни, в частности рельеф, литологический состав пород, гидрогеологические и мерзлотные условия. Именно

по этому признаку проведены границы структур III-го порядка.

Все информационные слои обрабатывались в AutoCAD для получения единой карты инженерно-геологического районирования (рис. 3).

Конечные таксоны по регионально-геологическим и зонально-климатическим условиям были обособлены путем наложения друг на друга перечисленных информационных слоев. Характеристика таксонов приведена в табл. 1.

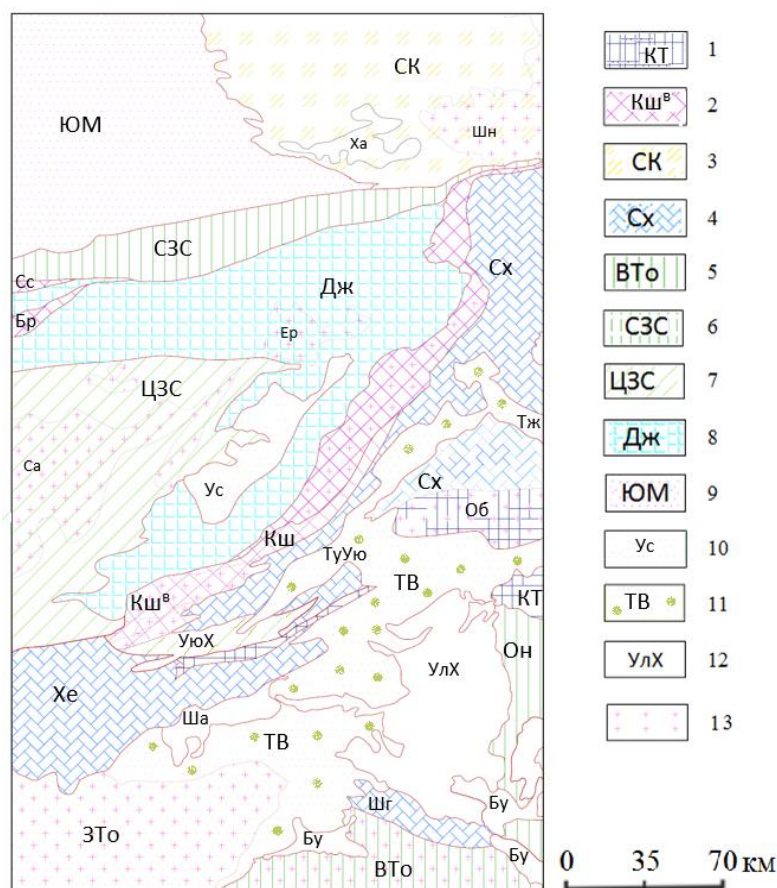


Рис. 3. Карта типологического инженерно-геологического районирования по регионально-геологическим и зонально-климатическим факторам: 1 – добайкальские массивы (V-Є1 фундамент Хемчикско-Сыстыгхемского прогиба – КТ); 2 – V-Є1 островодужно-офиолитовые пояса (Куртушибинский – Кш, Северосаянский – Сс, Борусский – Бр); 3–8 складчатые системы салаирид: 3 – Сисимо-Казырская – СК, 4 – Хемчикско-Сыстыгхемская – Хе-Сх, 5 – Таннуольско-Хамсаринская, в т. ч. подзоны Восточно-Таннуольская – ВТо, Ондумская – Он; и каледонид: 6 – Северо-Западносаянская – СЗС, 7 – Центрально-Западносаянская – ЦЗС, 8 – Джебаишская – Дж; 9–12 – наложенные структуры эпох активизации: позднепалеозойские (9 – Южно-Минусинская – ЮМ, 10 – Усинская – Ус, 11 – Тывинская, в т. ч. Хемчикская – Хе, Тоджинская – Тж, Турано-Уюкская – ТуУю, Шугурская – Шг); 12 – мезозойские (Улугхемская – УлХ, Шагонарская – Ша) и кайнозойские (Буренская – Бу) зоны. 13 – высокогорные районы (более 2000 м). Остальные сокращения названий приведены в табл. 1

Fig. 3. Map of typological engineering-geological zoning by regional-geological and zonal-climatic factors: 1 – V-Є1 foundation Khemchik-Systygkhem forearc trough; 2 – V-Є1 ophiolite Kurtushiba – Ksh, North-Sayan – Cc, Boruski – Br; 3–8 – fold system salaire sediments: 3 – Sisimo-Kozyrska – SK, 4 – Khemchik-Systygkhem – Xe-Cx, 5 – Tannuola-Khamsara island arc zone, subzone: VTo – Tannuola, On – Ondum; and caledonides: 6 – North western Sayan – SZS, 7 – Central Western Sayan area – CZS, 8 – Dzhebashskaya – Dj; 9–12 – imposed structure of epochs of activation: the late paleozoic (9 – South-Minusinski, 10 – Usinski – Uc, 11 – Tyvinian, including Khemchikskaya, Todzhinskaya, Turano-Uyukskaya – TyUy, Shugurskaya – Shg); 12 – mesozoic (Ulughemsky – UlX, Shagonarskaya – Sha) and Cenozoic (Burenskaya – Bu) zones. 13 – high-altitude areas (more than 2000 m). The remaining abbreviations are given in table 1

Таблица 1. Экспликация к карте районирования

Table 1. Explication to the zoning map

Типологические инженерно-геологические структуры Typological engineering-geological structures		Региональные инженерно-геологические структуры Regional engineering-geological structures		Характеристика таксонов Characteristics of taxa			
Мегаструктуры Megastructures	Мезоструктуры Mesostructures	Мезоструктуры Mesostructures	Микроструктуры Microstructures	Абсолютные отметки, м Altitude, m	Количество осадков, мм/год Precipitation, mm/year	Возраст и состав горных пород Rock age and structure	Геологические процессы Geological processes
Орогены с практически сплошным распро- странением ММП, мощностью 200–400 м $t^* = -3/-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ Orogen with continuous permafrost (90–100 %), thickness 200–400 m	Складчатые систе- мы с сезонным протаиванием пород Fold systems with seasonal thawing rocks	Высокогорная Восточно- Саянская High mountains of West Sayan	Хр. Шайдын -Ша, Shayjdyn	2100–2600	1000–1200	Рифей-венд-среднекембрийские образования. Моласса, про- рванная многочисленными интрузиями Riphean–Vendian–Cambrian formation. Molasses, broken by numerous intrusions	Землетрясения, ледниковая эрозия, лавины, сели, об- вально-осыпные, криоген- ные, заболачивание плоских водоразделов Earthquakes, glacial erosion, avalanches, mudslides, landslide, cryogenic, swamping of flat watersheds
		Высокогорная Западно-Саянская High mountains of West Sayan	Хр. Ергаки – Ер/Ergaki, Хр. Ойский/Oyskiy Хр. Саянский – Са Sayanskiy Хр. Куртушибин- ский – Кш [®] /Kurtushiba	2000–2460 2300–2825 2200–2400	1000–1200	Венд-кембрийские метаморфические сланцы и граниты Vendian-Cambrian metamorphic schists and granites	
		Высокогорная Восточно- Тывинская High mountains of East Tuva	Хр. ак. Обручева – Об, Obrucheva	2500–2700	480–600	Докембрийские кристаллические сланцы и гнейсы в основании, выше – метаморфические сланцы, мраморы, песчаники, из- вестняки, изверженные породы Precambrian crystalline schists and gneiss at the base, metamorphic schists, marbles, sandstones, limestones, igneous rocks – above	
Ороген с прерывистым распространением ММП мощностью 100–200 м $t=0/-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ Orogen with discontinuous permafrost (50–90 %), thickness 120–200 m	Складчатые систе- мы с сезонным протаиванием пород Fold systems with seasonal thawing rocks	Сисимо- Казыр- ская Sisimo- Kazyrskaya	хр. Хайдым – Ха, Haydym Казым-Кизирская Kazym-Kizirskaya	1500–2000 600–1500	400 800–1000	Отложения позднего рифея, венда и кембрия, нарушенные многочисленными разломами и интрузиями разного возраста. Преобладает орогенная моласса среднего кембрия (осиновская, котельская свиты), представленная мусорными конгломерата- ми, гравелитами, песчаниками с редким присутствием туфов разного состава Late Riphean, Vendian and Cambrian sediments disturbed by numerous faults and intrusions of different ages. The middle Cambrian orogenic molasse (Osinovskaya and Kotel'skaya formations) dominates. It is presented by garbage conglomerates, gravellites, sandstones with rare presence of tuffs of different composition	Землетрясения, лавины, сели, криогенные: морозное выветривание, термокарст, солифлюкция, наледи; курумы, обвалы и осыпи, карст Earthquakes, avalanches, mudflow, cryogenic: frost weathering, thermokarst, solifluction, icings-aufeis; stone runs, landslides and screes, karst
		Северо-Саянская Northern-Sayan	Северо-Саянская Northern-Sayan	600–1000	400–500	Породы от нижнего кембрия (нижне-монокская свита: базаль- ты, андезиты, плагиориты) до среднего кембрия (арбатская свита: песчаники, конгломераты, линзы известняков) Rocks from the lower Cambrian (lower-Monokskaya formation: basalts, andesites, plagioclite) to middle Cambrian (Arbatskaya formation: sandstones, conglomerates, lenses of limestone)	

		Центрально-Западно-Саянская Central Western Sayan	Джебашская Dzhebash	1000–2000	800–1200	Протерозойские кристаллические сланцы, кембрийские эффузивы, метаморфические сланцы, алевролиты и карбонаты Proterozoic crystalline schists, Cambrian effusive rocks, metamorphic shales, siltstones and carbonates	
			Центрально-Западно-Саянская Central Western Sayan	900–1500	800–1200	Протерозойские кристаллические сланцы, кембрийские эффузивы, метаморфические сланцы, алевролиты и карбонаты перекрыты песчаниками и сланцами ордовика и силура Proterozoic crystalline schists, Cambrian effusive rocks, metamorphic shales, siltstones and carbonates are covered with sandstones and shales of Ordovician and Silurian	
			Куртушибинская – Кш Kurtushiba	1300–1800	C-800–1200 Ю-400	Офиолитовые венд-кембрийские метатерригенные комплексы альпинотипных гипербазитов и вулканитов; нижнепалеозойские сланцы, песчаники и известняки, прорванные массивами гранитоидов раннего девона Ophiolitic Vendian–Cambrian metaterrigenous complexes of the Alpine-type ultrabasites and volcanic rocks; lower Paleozoic schists, sandstones, and limestones, broken massifs of granitoids of the early Devonian	
		Западно-Саянская Western Sayan	Уюкский хр – УюX. Uyukskiy	1200–1800	330	Кембрийские сланцы, песчаники, конгломераты, эффузивы Cambrian slates, sandstones, conglomerates and volcanites	
		Таннуольско-Хамсаринская Tannuola-Khamsarinskaya	Восточно-Таннуольская – ВТо East Tannuola Ондумская – Он Ondum	1500–2000 600–1500	C-600–800 Ю 200–250	Нижнекембрийские вулканогенно-карбонатно-терригенные породы Lower Cambrian volcanogenic-carbonate-terrigenous rocks	
		Хемчик-Систигхемская Khemchik-Systygkhem	Западно-Таннуольская – ЗТо Tannuola	2500–2700	380–450	Силурские и девонские песчаники, сланцы, конгломераты Silurian and Devonian sandstones, shales, conglomerates	
Ороген с островным распространением ММП, мощностью 10–30 м $t=0/-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ Orogen with sporadic permafrost (<50 %), thickness 10–30 m	Впадины с сезонным протаиванием пород Depressions with seasonal thawing of rocks	Хемчик-Систигхемская Khemchik-Systygkhem	PZ: Хемчикская – Хе Khemchik Систигхемская – Сх Systygkhem	600–1500 650–900	500–900	Среднекембрийские-позднекаменноугольные породы, преобладает ордовик-силурийская моласса Middle Cambrian – late Carbon rocks, Ordovician-Silurian molasses dominate	Наводнения; криогенные: морозное выветривание, повторно-жильные льды, солифлюкция, каменные глетчеры; делювиально-пролювиальные; оврагообразование; эоловые; засоление Floods; cryogenic: frost weathering, ice wedge, solifluction, rock glaciers; deluvial-proluvial; gullies; eolian; salinization
		Восточно-Тывинская East Tuva	PZ: Тоджинская – Тж Todzhinskaya	700–800	200–300	Протерозойские и палеозойские породы: песчаники, конгломераты, известняки, кристаллические сланцы, гнейсы, порфириды, интрузии гранитов и гранодиоритов, перекрыты чехлом моренных и флювиогляциальных четвертичных отложений Proterozoic and Paleozoic rocks: sandstones, conglomerates, limestones, crystalline schists, gneiss, porphyrite, intrusions of granites and granodiorites, covered with a cover of moraine and fluvioglacial Quaternary sediments.	
			PZ: Турано-Уюкская – ТуУю	800–1200	643–604	Терригенные породы ордовика-силура перекрыты нижнедевонскими вулканитами кендейской свиты и чехлом моренных и	

			Turan-Uyukskaya			флювиогляциальных четвертичных отложений Clastic rocks of the Ordovician–Silurian period covered by lower Devonian volcanics Kendeyskaya formation, moraine and fluvioglacial Quaternary deposits	
	Впадины с сезонным промерзанием и протаиванием пород Depressions with seasonal freezing and thawing of rocks	Западно-Саянские Western Sayan	PZ: Усинская – Ус Usinskaya	700–750	200–330	Силурийские отложения сосновской и федоровской свиты в основании, сменяются вверх по разрезу вулканитами нижнего девона-нижнего карбоном, перекрытые чехлом четвертичных отложений Silurian deposits of the Sosnovskaya and Fedorovskaya formations are overlapped by volcanic rocks of lower Devonian to lower Carboniferous, Quaternary sediments	
		Центрально-Тывинская котловина Central Tuva depression	PZ: Кызыльская, Элегетская, Шугурская Kyzylskaya, Elegetskaaya, Shugurskaya	500–1100	180–300	Нижний структурный этаж: трахиандезиты, базальты кендейской и саглинской свит девона; верхний структурный этаж: терригенно-карбонатная формация карбона и перми Lower structural level: andesite, basalt, trachyte of Devonian Kendeyskaya and Saglinskaya formations; upper structural level: terrigenous-carbonate formation of Carboniferous and Permian	
			MZ: Шагонарская, Улуг-Хемская, Онканжинская Shagonarskaya, Ulug-Khemskaaya, Onkanzhinskaya	500–1100	200–400	Унаследованный структурный план. Впадины выполнены терригенной озерно-лимнической формацией юры – раннего мела, с продуктивной угленосностью, перекрытые чехлом четвертичных отложений: элювиальных и элювиально-делювиальных (на абс отн 900–1500 м) и делювиально-пролювиальных, пролювиальных, аллювиально-пролювиальных (на абс отн 700–1000 м) Inherited structural plan. Depression are made by terrigenous lacustrine-boggy formation of the Jurassic – early Cretaceous, with productive coal-bearing, overlain by a cover of Quaternary deposits: eluvial and eluvial-deluvial (for Altitude 900–1500 m) and the deluvial-proluvial, proluvial, alluvial-proluvial (for Altitude 700–1000 m)	
			KZ: Буренская, Буренская Burenskaya	700–1000	330	Неогеновые буроватые грубые галечники и щебнистые суглинки, пески. Мощность до 400 м Neogene brown coarse gravel and gravelly loams, sands. Thickness to 400 m	
Орогены с распространением талых и немерзлых пород Orogen with the spread melt and unfrozen rocks and soils	Впадины с сезонным промерзанием пород Depressions with seasonal freezing of rocks and soils	Минусинские Minusinskie	PZ: Южно-Минусинская South-Minusinskaya	300–500	230–500	Нижний этаж вулканогенный: средний – поздний ордовик – ранний девон; верхний – осадочный: с конца раннего девона до перми. Конгломераты, песчаники, сланцы, мергели и известняки, пласты углей Lower floor is volcanic: middle – late Ordovician – early Devonian; upper – sedimentary: from the end of the early Devonian to Permian. Conglomerates, sandstones, shales, marls and limestones, layers of coal	Просадки, карст, эоловые, овраго-образование, засоление Subsidence, karst, aeolian, gully, salinization

* t – среднегодовая температура ММП на глубине годовых теплооборотов. С – север, Ю – юг, В – восток, З – запад.

* t – permafrost temperature – the mean annual ground temperature at the depth of zero annual amplitude (10 to 20 m). С – North, Ю – South, В – East, З – West.

Следующим этапом работ стала оценка развития геологических процессов и их интенсивности с точки зрения влияния на строительство трассы, с учетом данных [30–35]. Нами разработана классификационная

схема опасных геологических процессов с оценкой значимости по шкале баллов, присвоенных экспертно каждому процессу с разбивкой на 2–4 градации (табл. 2).

Таблица 2. Оценки развития геологических процессов

Table 2. Assessment of engineering-geological conditions development

Критерий оценки Evaluation criterion	Характеристика Description	Вес критерия в баллах Criterion weight in points
Интенсивность неотектонических движений Intensity of neotectonic movements	Слабые/Weak	0
	Умеренные/Moderate	1
	Интенсивные/Intensive	2
Сейсмичность по карте ОСР-2015А, балл Seismicity by the map OSR-2015A, score	6	0
	7	1
	8	2
Распространение просадочных грунтов Distribution of collapsible soils	Не распространены/Not occur	0
	Распространены/Occur	1
Распространение карста Distribution of karst	Не распространены/Not occur	0
	Распространен карбонатный Carbonate one is widespread	1
	Соляной, сульфатно-карбонатный карст Salt, sulphate-carbonate karst	2
Распространение оползней Distribution of landslides	Незначительно-опасные Slightly dangerous	0
	Малоопасные/Low-risk	1
	Умеренно-опасные Moderately hazardous	2
Распространение селевых явлений Distribution of mudslides	Потенциальная/Potential	0
	Низкая/Low	1
	Средняя/Average	2
Лавиноопасность Avalanche hazard	Низкая/Low	0
	Средняя/Average	1
	Высокая/High	2
Наличие многолетнемерзлых пород Presence of permafrost	Отсутствует/Absent	0
	Островное/Sporadic	0,5
	Прерывистое/Discontinuous	1
	Сплошное/Continuous	2

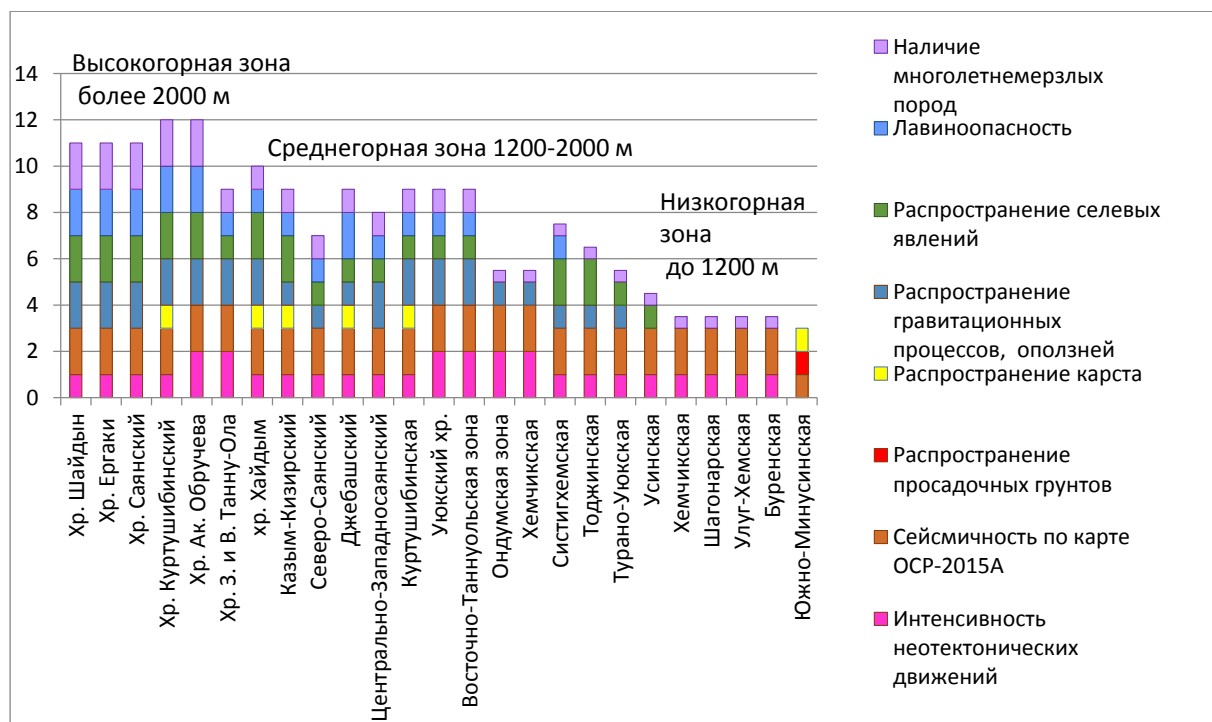


Рис. 4. Балльная оценка инженерно-геологических районов территории

Fig. 4. Scheme of zoning and site assessment

Обобщенная оценка развития геологических процессов (в баллах) по каждому инженерно-геологическому району (структуре III-го порядка), выделенному по регионально-геологическим и зонально-климатическим факторам, приведена на рис. 4.

Обсуждение результатов исследований

Проведенный анализ литературных и фондовых материалов позволил выбрать классификационные критерии для инженерно-геологического районирования территории трассы. По развитию ММП выделены региональные таксоны I порядка. В пределах структур I порядка по геоструктурным особенностям выделены инженерно-геологические структуры II порядка (мезоструктуры). В пределах последних обособлены и охарактеризованы инженерно-геологические структуры III порядка (микроструктуры) по составу горных пород и распространению геологических процессов. Детальная характеристика таксонов III-го порядка приводится впервые для этой территории.

Выводы

1. Рассмотрение основных природных компонентов территории трассы: сейсмотектоники; литологии; топографии; гидрологии, гидрогеологии и мерзлоты

показало, что в целом инженерно-геологические условия трассы являются достаточно сложными в связи с высокой сейсмической активностью района, наличием многолетней мерзлоты и таких геологических процессов, как карст, сели, лавины, поверхностное заболачивание.

2. Наложение информационных слоев о природной среде позволило разработать карту типологического инженерно-геологического районирования. Дана характеристика выделенных таксонов. Карта районирования послужит основой для принятия обоснованных решений при проектировании инженерных сооружений, базой для организации мониторинга, экспертизы.
3. При проектировании трассы следует учесть опыт строительства линии Абакан–Тайшет, а также разработки китайских специалистов по подготовке и осуществлению строительства Цинхай-Тибетской железной дороги, самой высокогорной в мире, проходящей по территории с многолетне-мерзлыми грунтами.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Andriamamonjisoa S.N., Hubert-Ferrari A. Combining geology, geomorphology and geotechnical data for a safer urban extension: application to the Antananarivo capital city (Madagascar) // *Journal of African Earth Sciences*. – 2019. – V. 151. – P. 417–437.
2. Baynes F.J., Fookes P.G., Kennedy J.F. The total engineering geology approach applied to railways in the Pilbara, Western Australia // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2005. – V. 64. – № 1. – P. 67–94.
3. The interplay of structural pathway and weathering intensity in forming mass-wasting processes in deeply weathered gneissic rocks (Sila Massif, Calabria, Italy) / D. Biondino, L. Borrelli, S. Critelli, F. Muto, G. Gullà // *Journal of Maps*. – 2018. – V. 14. – № 2. – P. 242–256.
4. Cheskidov V.V., Manevich A.I. Engineering and geological support for slope stability monitoring as a part of transport infrastructure construction projects // *Mining science and technology*. – 2016. – № 1. – P. 50–57.
5. Failache M.F., Zuquette L.V. Geological and geotechnical land zoning for potential Hortonian overland flow in a basin in southern Brazil // *Engineering Geology*. – 2018. – V. 246. – P. 107–122.
6. Engineering geological mapping of earthquake-induced landslides in South Lefkada Island, Greece: evaluation of the type and characteristics of the slope failures / N. Grendas, V. Marinos, G. Papathanassiou, A. Ganas, S. Valkaniotis // *Environmental Earth Sciences*. – 2018. – V. 77. – № 12. – P. 425. URL: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7598-9> (дата обращения 11.09.2019).
7. Hassanpour J., Firouzei Y., Hajipour G. A regional-scale engineering geological study for selecting suitable rock masses for constructing unlined oil storage caverns in Southern Zagros, Iran // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2019. – V. 78. – № 1. – P. 267–280.
8. Hearn G.J. Geomorphology in engineering geological mapping and modelling // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2019. – V. 78. – № 2. – P. 723–742.
9. Landslide mapping from aerial photographs using change detection-based Markov random field / Z. Li, W. Shi, P. Lu, Q. Wang, Z. Miao // *Journal Remote Sensing of Environment*. – 2016. – V. 187. – P. 76–90.
10. Martínez-Graña A.M., Goy J.L., Zazo C. Engineering geology maps for planning and management of natural parks: «Las Batuecas-Sierra de Francia» and «Quilamas» (Central Spanish System, Salamanca, Spain) // *Geosciences*. – 2013. – V. 1. – P. 46–62.
11. E-Value of Data – the Qatar geologic mapping project / C.L. Meehan, S. Kumar, M.A. Pando, A.G. Mouradian, A.F. Saleh // *Geotechnical Special Publication*. – 2019. – V. 3. – № 14. – P. 12–23.
12. Development of a 3D structural model of a mine by consolidating different data sources / M. Morales, K.K. Panthi, K. Botsialas, K.H. Holmøy // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2019. – V. 78. – № 1. – P. 35–53.
13. Privett K.D. The lines of evidence approach to challenges faced in engineering geological practice // *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. – 2019. – V. 52. – № 2. – P. 141–172.
14. Ullah K.M., Mansourian A. Evaluation of land suitability for urban land-use planning: Case study Dhaka city // *Transactions in GIS*. – 2016. – V. 20. – № 1. – P. 20–37.
15. Hazards posed by active major faults along the Golmud-Lhasa railway route, Tibetan Plateau, China / Z. Wu, P.J. Barosh, D. Hu, P. Ye, W. Jiang // *Engineering Geology*. – 2004. – V. 74. – № 3–4. – P. 163–182.
16. Yang J. Research on the New railway field geological survey system based on mobile GIS // *Journal of Railway Engineering Society*. – 2019. – V. 36. – № 2. – P. 15–20.
17. Youssef A.M. Landslide susceptibility delineation in the Ar-Rayth area, Jizan, Kingdom of Saudi Arabia, using analytical hierarchy process, frequency ratio, and logistic regression models // *Environmental Earth Sciences*. – 2015. – V. 73. – № 12. – P. 8499–8518.
18. Zuquette L.V., Failache M. Mapping groundwater pollution vulnerability with application in a basin in southern Brazil // *Environmental Earth Sciences*. – 2018. – V. 77. – № 19. – P. 689. URL: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7862-z> (дата обращения 11.09.2019).
19. Ломтадзе В.Д. Словарь по инженерной геологии. – СПб: СПбГИ, 1999. – 360 с.
20. Трофимов В.Т., Красилова Н.С. Инженерно-геологические карты. – М.: КДУ, Добросвет, 2018. – 383 с.
21. Инженерная геология России. Т. 3. Инженерно-геологические структуры России / В.Т. Трофимов, Т.И. Аверкина, Т.В. Ан-

- дреева, С.Д. Балыкова, А.В. Бершов, Ю.К. Васильчук, Е.О. Головина, А.В. Ершова, Н.С. Красилов, М.Б. Куринов, В.М. Ладугин, Ю.В. Фролова. – М.: КДУ, 2015. – 710 с.
22. Трофимов В.Т. Зональность инженерно-геологических условий континентов Земли. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 348 с.
23. Строкова Л.А., Ермолаева А.В. Районирование территории по степени опасности оседания земной поверхности при проектировании магистрального газопровода в южной Якутии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 10. – С. 59–68.
24. Строкова Л.А., Епифанова Е.А., Коржнева Т.Г. Численный анализ поведения основания опоры моста на старой железнодорожной линии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 125–139.
25. Strokov L.A., Teterin E. A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 43. – 6 p.
26. Purgina D.V., Strokov L.A., Kuzevanov K.I. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 33. – 6 p.
27. Опыт инженерно-геологического районирования по несущей способности грунтов промплощадки Эльгинского ГОК в Якутии / Л.А. Строкова, С.А. Дмитриева, Н.В. Осьмушкина, А.В. Осьмушкин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 175–185.
28. Strokov L.A., Ermolaeva A.V., Golubeva V.V. The investigation of dangerous geological processes resulting in land subsidence while designing the main gas pipeline in South Yakutia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 43. – 6 p.
29. Строкова Л.А., Ермолаева А.В. Природные особенности строительства участка газопровода «Сила Сибири» на участке Чаяндынское нефтегазоконденсатное месторождение – Ленск // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – № 4. – Т. 326. – С. 41–55.
30. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение) / под ред. Б.А. Блюмана. Серия Алтае-Саянская. Лист М-46 – Кызыл. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. – 349 с.
31. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение) / под ред. Е.П. Миронюк. Серия Алтае-Саянская. Лист N-46 – Абакан. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. – 391 с.
32. СП 115.13330.2016. Геофизика опасных природных воздействий. – М.: ФГУП Стандартинформ, 2016. – 49 с.
33. Особенности проявления неблагоприятных природных процессов на территории республики Тыва / А.Д. Абалаков, А.И. Шеховцов, Г.И. Лысанова, Л.С. Новикова // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 6. – С. 132–137. URL: <http://www.natural-sciences.ru/ru/article/view?id=35980> (дата обращения: 11.05.2019).
34. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. – М.: ФГУП Стандартинформ, 2018. – 122 с.
35. Ганова С.Д., Скопинцева О.В., Исаев О.Н. К вопросу исследования состава углеводородных газов угольных пластов и пыли с целью возможного прогнозирования их потенциальной опасности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 6. – С. 109–115.

Поступила 19.09.2019 г.

Информация об авторах

Строкова Л.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Надеждина Ю.Ю., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 624.131

TYPIFICATION OF ENGINEERING AND GEOLOGICAL CONDITIONS OF THE TERRITORY OF THE ROUTE OF THE PROJECTED RAILWAY ELEGEST–KYZYL–KURAGINO

Lyudmila A. Strokova¹,
sla@tpu.ru

Yulia Yu. Nadezhkina¹,
levak.yuliya@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The study is relevant due to the development of the project of the first railway in Tyva, which should link Tyva with the Krasnoyarsk territory. The route is planned in very difficult engineering-geological conditions. This article presents the typification of engineering and geological conditions of the territory of the route. An engineering-geological evaluation is necessary in order to prepare decision making on land planning and land use of the area but also so that necessary industrial and infrastructure development can be carried out with smaller impacts on breakable environments as well as reducing hazards and damage to constructions with consequent savings to people and property.

This study aims to conduct typological engineering-geological zoning of the region, taking into account the latest work on the study of engineering-geological conditions of the route.

Object of the study is the geological environment of the area of the projected railway Kuragino–Kyzyl. We considered the main natural components, which influence land use planning and development, such as lithology; topography; seismotectonic; geotechnic; hydrology-hydrogeology and permafrost.

Methods: brief review of relevant literature; analysis of information obtained from geological survey company files, the definition of criterions, signs and methods of zoning. All information layers about the natural environment were processed, and then combined to produce a single engineering-geological map of regions.

Results. We selected the classification features of the geological environment of the study area and produced a map of zoning of engineering-geological conditions of the study. Moreover, we gave the characteristics of the selected taxa.

Summary. A brief description of the main factors of the regional engineering-geological situation is given and the results of zoning based on the principle of formation analysis and classification of engineering-geological conditions of the territory are introduced.

Key words:

Engineering and geological conditions, regional factors, railway, zoning, geological processes.

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

REFERENCES

- Andriamamonjisoa S.N., Hubert-Ferrari A. Combining geology, geomorphology and geotechnical data for a safer urban extension: application to the Antananarivo capital city (Madagascar). *Journal of African Earth Sciences*, 2019, vol. 151, pp. 417–437.
- Baynes F.J., Fookes P.G., Kennedy J.F. The total engineering geology approach applied to railways in the Pilbara, Western Australia. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2005, vol. 64, no. 1, pp. 67–94.
- Biondino D., Borrelli L., Critelli S., Muto F., Gullà G. The interplay of structural pathway and weathering intensity in forming mass-wasting processes in deeply weathered gneissic rocks (Sila Massif, Calabria, Italy). *Journal of Maps*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 242–256.
- Cheskidov V.V., Manevich A.I. Engineering and geological support for slope stability monitoring as a part of transport infrastructure construction projects. *Mining science and technology*, 2016, no. 1, pp. 50–57.
- Failache M.F., Zuquette L.V. Geological and geotechnical land zoning for potential Hortonian overland flow in a basin in southern Brazil. *Engineering Geology*, 2018, vol. 246, pp. 107–122.
- Grendas N., Marinos V., Papathanassiou G., Ganas A., Valkaniotis S. Engineering geological mapping of earthquake-induced landslides in South Lefkada Island, Greece: evaluation of the type and characteristics of the slope failures. *Environmental Earth Sciences*, 2018, vol. 77, no. 12, p. 425. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7598-9> (accessed 11 September 2019).
- Hassanpour J., Firouzei Y., Hajipour G. A regional-scale engineering geological study for selecting suitable rock masses for constructing unlined oil storage caverns in Southern Zagros, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, no. 1, pp. 267–280.
- Hearn G.J. Geomorphology in engineering geological mapping and modelling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, no. 2, pp. 723–742.
- Li Z., Shi W., Lu P., Wang Q., Miao Z. Landslide mapping from aerial photographs using change detection-based Markov random field. *Journal Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 187, pp. 76–90.
- Martínez-Graña A.M., Goy J.L., Zazo C. Engineering geology maps for planning and management of natural parks: «Las Batuecas-Sierra de Francia» and «Quilamas» (Central Spanish System, Salamanca, Spain). *Geosciences*, 2013, vol. 1, pp. 46–62.
- Meehan C.L., Kumar S., Pando M.A., Mouradian A.G., Saleh A.F. E-value of data – the Qatar geologic mapping project. *Geotechnical Special Publication*, 2019, vol. 3, no. 14, pp. 12–23.
- Morales M., Panthi K.K., Botsialas K., Holmøy K.H. Development of a 3D structural model of a mine by consolidating different data sources. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, no. 1, pp. 35–53.
- Privett K.D. The lines of evidence approach to challenges faced in engineering geological practice. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2019, vol. 52, no. 2, pp. 141–172.
- Ullah K.M., Mansourian A. Evaluation of land suitability for urban land-use planning: Case study Dhaka city. *Transactions in GIS*, 2016, vol. 20, no. 1, pp. 20–37.

15. Wu Z., Barosh P.J., Hu D., Ye P., Jiang W. Hazards posed by active major faults along the Golmud-Lhasa railway route, Tibetan Plateau, China. *Engineering Geology*, 2004, vol. 74, no. 3–4, pp. 163–182.
16. Yang J. Research on the new railway field geological survey system based on mobile GIS. *Journal of Railway Engineering Society*, 2019, vol. 36, no. 2, pp. 15–20.
17. Youssef A.M. Landslide susceptibility delineation in the Ar-Rayth area, Jizan, Kingdom of Saudi Arabia, using analytical hierarchy process, frequency ratio, and logistic regression models. *Environmental Earth Sciences*, 2015, vol. 73, no. 12, pp. 8499–8518.
18. Zuquette L.V., Failache M. Mapping groundwater pollution vulnerability with application in a basin in southern Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 2018, vol. 77, no. 19, p. 689. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7862-z> (accessed 11 September 2019).
19. Lomtadze V.D. *Slovar po inzhenernoy geologii* [Engineering geology dictionary]. St-Petersburg, SPGI Publ., 1999. 360 p.
20. Trofimov V.T., Krasilova N.S. *Inzhenerno-geologicheskie karty* [Engineering-geological maps]. Moscow, KDU, Dobrosvet Publ., 2018. 383 p.
21. Trofimov V.T., Averkina T.I., Andreeva T.V., Balykova S.D., Bershov A.V., Vasilchuk Yu.K., Golovina E.O., Ershova A.V., Krasilova N.S., Kurinov M.B., Ladygin V.M., Frolova Yu.V. *Inzhenernaya geologiya Rossii. T. 3. Inzhenerno-geologicheskie struktury Rossii* [Engineering geology of Russia. Vol. 3. Engineering-geological structures of Russia]. Moscow, KDU Publ., 2015. 710 p.
22. Trofimov V.T. *Zonalnost inzhenerno-geologicheskikh usloviy kontinentov Zemli* [Zoning of engineering-geological conditions of the earth's continents]. Moscow, Moscow state University Publ., 2002. 348 p.
23. Strokova L.A., Ermolaeva A.V. Zoning according to the hazard level of earth surface subsidence when designing the main gas pipeline in south Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 10, pp. 59–68. In Rus.
24. Strokova L.A., Epifanova E.A., Korzhneva T.G. Numerical analysis of bridge foundation behaviour on the old railway line. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 125–139. In Rus.
25. Strokova L.A., Teterin E. A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, 012051.
26. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33, 01246.
27. Strokova L.A., Dmitrieva S.A., Osmushkina N.V., Osmushkin A.V. Experience of engineering-geological zoning on bearing capacity of soils of the industrial site of Elga coal-preparation plant in Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 175–185. In Rus.
28. Strokova L.A., Ermolaeva A.V., Golubeva V.V. The Investigation of Dangerous Geological Processes Resulting In Land Subsidence While Designing the Main Gas Pipeline in South Yakutia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, 6 p.
29. Strokova L.A., Ermolaeva A.V. Natural features of construction of the main gas pipeline «The Power of Siberia» on a site Chayandinskoye oil and gas field - Lensk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 41–55. In Rus.
30. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000. Seriya Altai-Sayan. List M-46 – Kyzyl* [The state geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000. Series Altai-Sayan. Sheet M-46 – Kyzyl]. Ed. by B.A. Blyuman. St-Petersburg, Map factory VSEGEI Publ., 2008. 349 p.
31. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000. Seriya Altai-Sayan. List N-46 – Abakan* [The state geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000. Series Altai-Sayan. Sheet N-46 – Abakan]. Ed. by E.P. Mironyuk. St-Petersburg, Map factory VSEGEI Publ., 2008. 391 p.
32. *SP 115.13330.2016. Geofizika opasnykh prirodnykh vozdeystviy* [Set of rules: geophysics of natural hazards]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 49 p.
33. Abalakov A.D., Shekhovtsov A.I., Lysanova G.I., Novikova L.S. Peculiarities of manifestation of hazardous natural processes on the territory of the Republic of Tuva. *Successes of modern natural sciences*, 2016, no. 6. pp. 132–137. In Rus. <http://www.natural-sciences.ru/ru/article/view?id=35980> (date of access: 11.05.2019).
34. *SP 14.13330.2018. Stroitelstvo v seysmicheskikh rayonakh. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp* [Set of rules: construction in seismic areas. Updated version of SNIp II-7-81*]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 122 p.
35. Ganova S.D., Skopintseva O.V., Isaev O.N. On the issue of studying the composition of hydrocarbon gases of coals and dust to predict their potential hazard. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 6, pp. 109–115. In Rus.

Received: 19 September 2019.

Information about the authors

Lyudmila A. Strokova, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Yulia Yu. Nadezhdina, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 551.34:502.6:550.46

ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДАХ КЛЮЧЕВЫХ РАЙОНОВ КРИОЛИТОЗОНЫ КАРСКОГО РЕГИОНА

Бутаков Владислав Игоревич¹,
vladbutakov@yahoo.com

Слагода Елена Адольфовна^{2,3,1},
eslagoda@ikz.ru

Тихонравова Яна Витальевна^{4,2},
tikh-jana@yandex.ru

Опокина Ольга Леонидовна^{2,1},
opokina@ikz.ru

Томберг Ирина Викторовна⁵,
kaktus@lin.irk.ru

Жученко Наталья Альбертовна⁵,
zhna@lin.irk.ru

¹ Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

² Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86.

³ Тюменский государственный университет,
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6.

⁴ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36

⁵ Лимнологический институт СО РАН,
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3.

Актуальность исследования. Информация о составе, льдистости и геохимических особенностях мерзлых пород необходима при освоении нефтегазоконденсатных месторождений Ямала, Гыдана и Таймыра. Среди факторов, определяющих экологию тундровых ландшафтов криолитозоны, большое значение имеют подземные льды, в том числе полигонально-жильные, и последствия их вытаивания. Гидрохимический состав и содержание редкоземельных элементов в сингенетических жилах фиксируют информацию об источниках влаги и условиях, при которых происходило их формирование. Соотношение основных ионов и распределение редкоземельных элементов в растворе может быть использовано для оценки влияния на состав льда атмосферных осадков, морских и вулканических аэрозолей, антропогенного загрязнения.

Цель: выявить источники поступления химических элементов и оценить влияние типа льдовыведения на гидрохимический состав и распределение редкоземельных элементов в различных генетических типах льда – полигонально-жильном, морском, озерном и фирновом льдах.

Объекты: полигонально-жильный лед, вмещающие его отложения, сезонные льды, поверхностные воды, отобранные в экспедициях ИКЗ ТюмНЦ СО РАН в 2009–2014 гг.

Методы исследования химического состава: масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, атомно-абсорбционная спектрометрия, эмиссионная фотометрия, хроматография.

Результаты. Установлено, что на химический состав полигонально-жильных льдов, изученных в прибрежной зоне ключевых участков о. Белый, о. Сибирякова, Западного Ямала и Западного Таймыра, имели влияние морские и континентальные аэрозоли. Сингенетические полигонально-жильные льды, пресные и ультрапресные по минерализации, сформированы при промерзании талых вод, которые содержат сорбированные снегом морские аэрозоли – взвешенные в атмосфере твердые и жидкие частицы. Полигонально-жильные льды в удаленном от моря районе оз. Сохонто не имеют признаков морского влияния по соотношению основных ионов. Полигонально-жильные льды с минеральными включениями формировались не только за счет талых снеговых вод с аэрозолями континентального происхождения, но и за счет надмерзлотных вод. В полигонально-жильных льдах выявлено увеличение содержания лантаноидов в водорастворимой форме по сравнению с кларковыми значениями и современными поверхностными льдами. По цериевой аномалии в большинстве изученных сингенетических ледяных жил подтверждается участие морских аэрозолей. По распределению редкоземельных элементов выявлено характерное для полигонально-жильных льдов соотношение легких и тяжелых редкоземельных элементов равно 0,9, и соотношение лантана к остальным лантаноидам, равное 0,2. Морской лед наследует минерализацию и состав морской воды. Озерный лед различается по глубине и отражает сезонное изменение гидрохимического состава при ледоставе и повышение концентрации морских аэрозолей в снеге, перекрывающем озерный лед. Фирновый лед полярного Урала имеет очень низкую минерализацию, в нем отсутствуют примеси морского аэрозоля. В полигонально-жильных льдах голоценового и неоплейстоценового возраста реализован природный механизм накопления редкоземельных элементов в водорастворимой форме в комплексе с железом, торием и иттрием. Вытаивание ледяных жил может приводить к поступлению редкоземельных элементов в поверхностные воды.

Ключевые слова:

Полигонально-жильный лед, гидрохимия льда, редкоземельные элементы, геохимия отложений, криогенное концентрирование, кларк гидросферы.

Введение

Химический состав природных льдов определяется присутствием в нем минеральных и органических веществ, растворенных газов [1]. Наличие этих компонентов в водном растворе обусловлено целым рядом протекающих в разных природных условиях физических, физико-химических, криогенных, геологических и биологических процессов. Геокриологические исследования включают изучение гидрохимического состава многолетнемерзлых пород и подземных льдов [2]. Водорастворимые соли в многолетнемерзлых породах и льдах при диссоциации образуют главные ионы Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} [3]. Анализ распределения главных ионов в растворе позволяет определить возможный источник воды, участвовавшей в льдообразовании, а также закономерности криогенной концентрации при формировании льдов [4]. Установлено, что при сингенетическом формировании полигонально-жильных льдов основным источником вод являются атмосферные осадки [5]. На Западном Ямале, Западном Таймыре, островах Белый и Сибирикова в Карском море изучены строение, генезис и химический состав подземных льдов, в том числе полигонально-жильных льдов, установлена их связь с генезисом отложений и с воздействием морских вод на состав ледяных жил, сформированных в приливной зоне [6–8]. В последние годы, в связи с интересом к экологическим проблемам Арктики, началось изучение микрокомпонентов, в частности редкоземельных элементов, в составе атмосферных осадков и поверхностных вод. Данные об их распределении в подземных льдах в публикациях немногочисленны. Авторы указывают на связь химического состава пластовых льдов с составом исходной воды и с условиями преобразования при переходе элементов из породы в воду и далее концентрированием солей в подземных водах при промерзании [9]. Определены спектры содержания редкоземельных металлов для пластовых льдов Новосибирских островов [10]. Основным источником редкоземельных элементов в полигонально-жильных льдах могут являться примеси в атмосферных зимних осадках, в том числе антропогенные, морские и вулканические аэрозоли. Кроме того, выявлено, что в составе полигонально-жильного льда могут участвовать сегрегационный и термокарстово-пещерный лед [11]. Основным источником для образования сегрегационного льда является внутригрунтовая слабосвязанная вода, для термокарстово-полостного льда – поверхностная вода [12]. С учетом этого в формировании полигонально-жильного льда могут участвовать вещества, поступавшие вместе с грунтовой влагой и поверхностными водами [13]. Участие поверхностных и морских вод можно установить по основным ионам [14], а участие атмосферных аэрозолей или грунтовой влаги – по распределению редкоземельных элементов в составе полигонально-жильного льда [10].

Методы исследований, математической обработки и интерпретации химического состава

Пробы для геохимических исследований были отобраны в виде монолитов льда и фильтрованной воды, хранившихся в мерзлом состоянии до проведения анализов. Общий химический и микрокомпонентный анализ монолитов и расплавов льда выполнен в Лаборатории гидрохимии и химии атмосферы Лимнологического института СО РАН, г. Иркутск. Для химического анализа монолиты льда были зачищены, расплавлены и дополнительно отфильтрованы через поликарбонатные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм. Основные катионы в расплавах льда и водной вытяжке из отложений (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) измеряли методом атомной абсорбции (AAS-30, Zeiss Jena, Germany), анионы (SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^-) – методом жидкостной хроматографии (Миллихром А-02, Эконова, Россия), гидрокарбонаты (HCO_3^-) – потенциометрическим титрованием. Для определения валового состава взвеси, отфильтрованной из расплавов льда, минеральный остаток разлагают смесью концентрированных азотной и плавиковой кислот с ультразвуковым воздействием и нагреванием для перехода минеральных веществ в раствор. Элементный анализ взвеси, воды, расплавов льда и ацетатно-аммонийной вытяжки из отложений был выполнен на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500ce фирмы Agilent Technologies Inc.

Математическая обработка количественных характеристик химического состава включала составление базы данных гидрохимического и элементного состава проб и разработку программы анализа результатов исследований образцов разных типов льда (полигонально-жильного, морского, озерного), вмещающих отложений и взвеси из льда. Массив количественных характеристик химического состава был разделен на группы по районам исследований, по количеству минеральной взвеси во льду, по генезису и возрасту вмещающих отложений методом корреляционного анализа [15]. Для оценки величины минерализации льдов использована классификация, предложенная Ю.К. Васильчуком [16]. При составлении наименования по гидрохимическому типу воды учитывали анионы и катионы, содержание которых составляет более 20 % от суммы миллимолярных концентраций, перечисление ионов производили в порядке возрастания концентраций компонентов – от меньшего значения к большему. Для определения источника воды используют соотношения компонентов. Однако не существует однозначных интерпретаций соотношений главных ионов, нужны дополнительные показатели для определения источников поступления компонентов. Такими показателями могут быть концентрации редкоземельных элементов (РЗЭ) (таблица).

Таблица. Соотношения химических элементов для водных сред
Table. Chemical elements correlation in water environments

Источник компонента Component source	Процесс поступления и преобразования компонента Component receipt and transformation	Преобладающие ионы и соотношения компонентов Dominant ions and component ratios
Атмосферный аэрозоль арктического региона Atmospheric aerosol of the arctic region [14]	Формирование аэрозоля над поверхностью моря Aerosol formation over the sea surface	Преобладающие ионы/Dominant ions – Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} Корреляция пар ионов/Correlation of ion pairs: $\text{NH}_4^+/\text{SO}_4^{2-}$, Na^+/Cl^- , $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$, $\text{Ca}^{2+}/\text{NO}_3^-$
	Летом в составе аэрозоля отражен процесс выветривания пород Aerosol composition reflects rock weathering in summer	Преобладающий ион/Dominant ion – Ca^{2+}
Снег Snow [10]	В процессе выветривания в состав снега попадают большие количества коллоидной взвеси During weathering the snow contains colloidal suspension large amounts	Высокое содержание/High content Cl^- , SO_4^{2-} $\text{Ce}_{\text{ан}}=0,80$ Превышение содержания La, Ce, Nd, Sm, Gd, Dy, Yb относительно кларковых значений для речной воды более чем в 2 раза Exceeding the content of La, Ce, Nd, Sm, Gd, Dy, Yb relative to the clark values for river water by more than 2 times
Тундровые озера Tundra lakes [17]	Растворение и выщелачивание осадочных пород Dissolution and leaching of sedimentary rocks	$(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^- > 1$
	Поступление хлоридов из пород Receipt of chlorides from soils	$\text{Cl}^-/\text{Na}^+ > 1,14$
Речная вода River water [10]	Содержание РЗЭ отражает состав пород бассейна и атмосферных осадков REE content reflects rock composition of the river basin and precipitation	$\text{Ce}_{\text{ан}}=1,21$ $\text{Eu}_{\text{ан}}=0,98$ Превышение содержания La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er, Yb относительно кларковых значений для речной воды более чем в 5 раз Exceeding the content of La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er, Yb relative to clark values for river water by more than 5 times
Морская вода Sea water [18, 19]	Формирование металлоносных осадков Formation of metal-bearing sediments	$\text{Ce}_{\text{ан}} < 1$ $(\text{LPЗЭ}/\text{TPЗЭ})^{\text{NASC}} < 1$
Полигонально-жильный лед (о. Новая Сибирь) Ice wedge (New Siberia island) [10]	Формирование льда из атмосферных осадков Ice formation from atmospheric precipitation	$\text{Ce}_{\text{ан}}=0,97$ $\text{Eu}_{\text{ан}}=2,37$ $\text{Na}^+/\text{Cl}^- = 1,35 \dots 1,61$ Превышение содержания La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er, Yb относительно кларковых значений для речной воды более чем в 15 раз Exceeding the content of La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er, Yb relative to the clark values for river water by more than 15 times
Полигонально-жильный лед (Западный Ямал) Polygonal ice wedge (Western Yamal) [20]	Поступление компонентов из атмосферных осадков, содержащих морские соли Receipt of components from precipitation containing marine salts	$(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/\text{Cl}^- = 0,9$ $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^- = 0,2$
Шлировый лед Lens ice [10]	Поступление компонентов из осадочных пород Receipt of components from sedimentary rocks	$\text{Na}^+/\text{Cl}^- = 6,95$ Превышение содержания La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er, Yb относительно кларковых значений для речной воды более чем в 8 раз Exceeding the content of La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er, Yb relative to Clarke values for river water by more than 8 times
Пластовые льды Massive ground ice [10]	Поступление компонентов из морских вод и осадочных пород Receipt of components from sea water and sedimentary rocks	$\text{Ce}_{\text{ан}} < 1$ $\text{Eu}_{\text{ан}} < 1$ $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^- = 0,11 \dots 0,60$ $\text{Na}^+/\text{Cl}^- = 11,9$
Текстурообразующие льды Texture-forming ice [21]	Поступление компонентов из осадочных пород Receipt of components from sedimentary rocks	$\text{Eu}_{\text{ан}} > 1$ $(\text{LPЗЭ}/\text{TPЗЭ})^{\text{NASC}} \sim 1$ Содержание РЗЭ равно значению кларковых чисел для речной воды The REE content is equal to the value of the Clark numbers for river water

Для выявления геохимических аномалий проведение сравнения содержания редкоземельных элементов в полигонально-жильных и сезонных льдах с кларками этих элементов в речной воде, так как минерализация полигонально-жильных льдов сравнима с минерализацией речной воды. Валовый состав взвеси из льда сравнивали с кларками земной коры, которые служат эталоном пониженных или повышенных кон-

центраций и нарушения равновесных отношений между элементами [22].

Распределение РЗЭ в различных водных системах служит индикатором окислительно-восстановительных геохимических процессов [23, 24]. В общем случае поверхностные и подземные воды могут наследовать состав и особенности распределения РЗЭ от пород или водных масс, с которыми они взаимодействуют

[25, 26]. Чтобы выявить закономерности в изменении состава РЗЭ в природных процессах, необходимо исключить влияние неравномерной распространенности четных и нечетных элементов. Для этого применяется метод нормализации составов РЗЭ на состав в хондритах или в сланце. Обычно используются содержания, нормированные на NASC (North American Shale Composite) [27]. Спектры содержаний оценивают по величине цериевой (Ce_{an}), европиевой (Eu_{an}) аномалий и соотношению легких (ЛРЗЭ) и тяжелых (ТРЗЭ) элементов, выраженных как:

$$Ce_{an} = Ce/Ce_{NASC} / (2/3 \times La/La_{NASC} + 1/3 \times Nd/Nd_{NASC});$$

$$Eu_{an} = 2 \times Eu/Eu_{NASC} / (Sm/Sm_{NASC} + Gd/Gd_{NASC});$$

$$(ЛРЗЭ/ТРЗЭ)^{NASC} = (La/La_{NASC} + 2 \times Pr/Pr_{NASC} + Nd/Nd_{NASC}) / (Er/Er_{NASC} + Tm/Tm_{NASC} + Yb/Yb_{NASC} + Lu/Lu_{NASC}) [18, 28].$$

Отрицательной называется аномалия, если ее численное значение меньше единицы, положительной – если ее численное значение больше единицы. Соотношения основных ионов и редкоземельных элементов являются показателями обстановок формирования осадочных пород и подземных льдов (табл. 1).

Район и объекты исследований

Комплексные исследования многолетнемерзлых толщ в Карском регионе в 2008–2014 гг. включали изучение состава, строения отложений и геохимических особенностей подземного льда, наземных морского и озерного льда, поверхностных вод на ключевых участках. Исследования геохимических особенностей и микроэлементов в составе полигонально-жильных льдов проведены в районах мыса Марре-Сале (Западный Ямал), оз. Сохонто и р. Юрибей (Центральный Ямал), о. Белый, о. Сибирякова, пос. Диксон и мыс Кареповский (Западный Таймыр) (рис. 1). Климатические условия арктической зоны с продолжительной холодной зимой, коротким прохладным летом, небольшим количеством осадков ~400 мм/год и преобладающим западным направлением ветров [29] обеспечивают сплошное распространение многолетнемерзлых пород и подземных льдов.

В работе проанализирован гидрохимический и микрокомпонентный состав 61 образца, из них: 26 – полигонально-жильного льда, 15 – озерного и морского льда, 1 – льда ледника Романтиков (Полярный Урал), 3 – поверхностной воды, 11 – взвеси из полигонально-жильного льда, 5 – вмещающих отложений.

Сингенетические полигонально-жильные льды представлены в разрезах:

- о. Белый – вертикально-полосчатыми за счет пузырьков воздуха льдом жил (рис. 2), которые залегают в прибрежно-морских, субаэральных засоленных песках и супесях [30];
- о. Сибирякова – льдом с минеральными включениями (пробы ОС-2-09) и без минеральных примесей (пробы ОС-5-09) в жилах, залегающих соответственно в песчаных отложениях и супесчаных отложениях с крупными линзами автохтонного торфа [8];

- м. Марре-Сале – льдом с вертикальными минеральными включениями (пробы МС-2А-11) в жилах, залегающих в супесях; современной элементарной жилой и жильным льдом (пробы в центре и на контакте с породой, МС-2-09), залегающих в супесях, перекрытых торфом [20];
- оз. Сохонто – вертикально-полосчатым льдом с минеральными примесями в жиле, залегающей в слоистых песках, супесях и суглинках с линзами автохтонного торфа [31];
- р. Юрибей – вертикально-полосчатым льдом с примесью минеральных частиц в жилах, залегающих в автохтонном торфе и заторфованных супесях;
- п. Диксон – двумя ярусами жил – белым вертикально-полосчатым за счет пузырьков воздуха льдом (пробы Д-2-09 и Д-3-09) в заторфованных супесях и песках с древесными остатками в днище долины и более древним желтоватым вертикально-полосчатым льдом с пленками мути (пробы Д-1-09); залегающих в делювиальных суглинках на склоне возвышенности, сложенной сланцами, гранитами, гнейсами [8];
- м. Кареповский – вертикально-полосчатым льдом с органическими и минеральными примесями в жилах, залегающих в песках с растительным детритом и супесях с прослоями автохтонного торфа, перекрытых антропогенными отложениями – древесиной и корой со следами рубки.



Рис. 1. Ключевые участки исследований геохимии многолетнемерзлых отложений, полигонально-жильных льдов и сезонных льдов Карского региона

Fig. 1. Key areas of studying geochemistry of permafrost sediments, polygonal ice wedge and seasonal ice in the Kara region

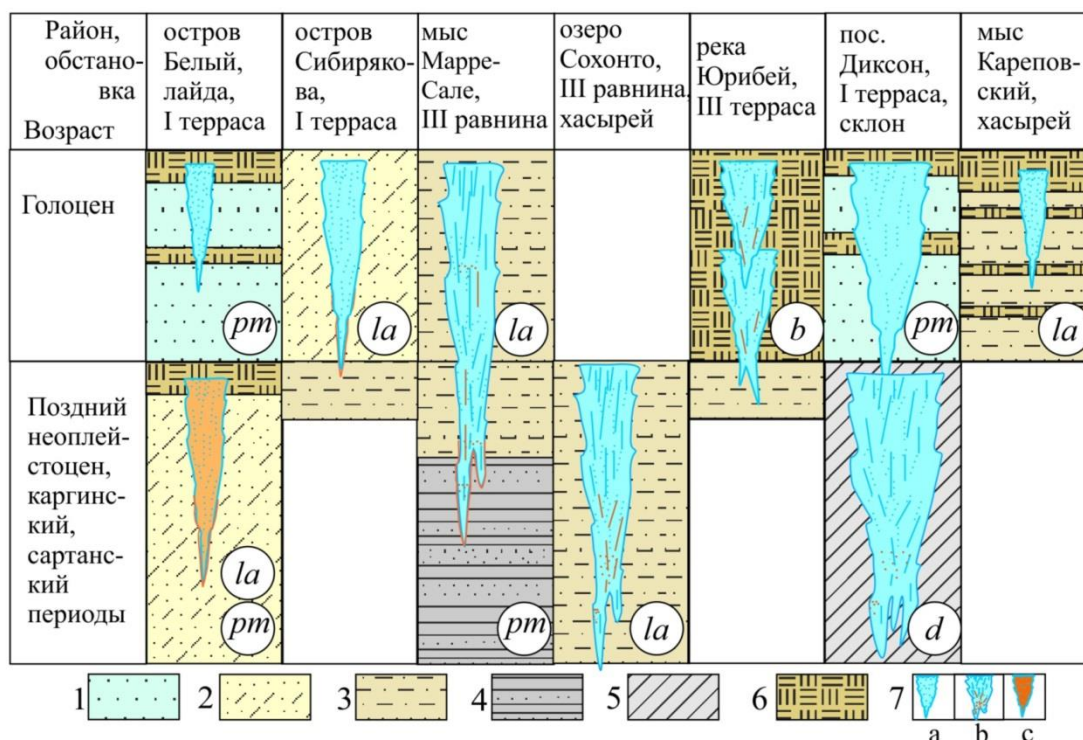


Рис. 2. Условия залегания полигонально-жильных льдов в голоценовых и верхнеплейстоценовых отложениях Карского региона: 1 – засоленные пески; 2 – пески, супеси с растительными остатками; 3 – супеси с растительными остатками; 4 – слоистые суглинки, супеси засоленные и опресненные; 5 – суглинки пылеватые делювиальные; 6 – торф, биогенные отложения; 7 – ледяные жилы с незначительными органо-минеральными включениями (а), ледогрунтовые (б), псевдоморфозы по вытаявшим полигонально-жильным льдам (с). Генезис отложений: б – биогенный; д – делювиальный; ла – озерно-аллювиальный; рт – прибрежно-морской

Fig. 2. Occurrence conditions of polygonal ice wedge in Holocene and Upper Pleistocene sediments in the Kara region: 1 – saline sands; 2 – sands, sandy loam with plant remains; 3 – sandy loam with plant remains; 4 – stratified loam, sandy loam saline and desalinated; 5 – silty deluvial loam; 6 – peat, biogenic sediments; 7 – ice wedge with minor organic and mineral inclusions (a), ice-ground (b), pseudomorphs of polygonal ice wedge (c). Genesis of deposits: b – biogenic; d – deluvial; la – lacustrine-alluvial; pm – coastal-marine

Сезонные льды и поверхностные воды

Для сравнения химического состава изучены пробы морского, озерного льда в районе м. Марре-Сале; фирнового льда из ледника Романтиков (горный массив Рай-Из на высоте около 800 м); вод из оз. Сохонто, мелкого озера и ручья в этом районе.

Результаты и их обсуждение

Полигонально-жильные льды по минерализации ультрапресные и пресные. Льды с низкой минерализацией (8...88 мг/л, при среднем значении 33 мг/л) (рис. 3, группа 1) района м. Марре-Сале (МС-2А-11), р. Юрибей, о. Белый, пос. Диксон и м. Кареповский, о. Сибирякова имеют гидрокарбонатно-хлоридный, натриевый гидрохимический состав. Основным источником воды при формировании этих жил служили зимние атмосферные осадки. Хлорид- и натрий-ионы могли поступать из морского аэрозоля, сорбированного снегом [14].

Отношение ионов натрия к хлориду ~0,96 в полигонально-жильных льдах разрезов МС-2А-11 (верхней части), р. Юрибей, о. Белый (нижней части), Д-1-09. Данная зависимость характерна для сингенетических полигонально-жильных льдов района исследований и хорошо коррелирует с соотношением в

озерном льду, поверхностной воде и атмосферных осадках [32].

Соотношение ионов $Mg/Cl \sim 0,2$ в полигонально-жильных льдах характерно как для распространенных на высоких гипсометрических уровнях м. Марре-Сале, р. Юрибей, м. Кареповский (10...30 м), так и в пределах низких гипсометрических уровней рельефа (до 5...6 м) в верхней части разреза о. Белый, о. Сибирякова, разрезах Д-2-09 и Д-3-09 (голоценовый жильный лёд), а также выявлено для морского льда. В первом случае это соотношение, вероятно, связано с поступлением морских аэрозолей, сорбированных снегом, во втором – с заливанием морскими водами полигональной поверхности с морозобойными трещинами и частичным протаиванием ледяных жил [8].

Гидрохимический состав полигонально-жильных льдов в районах оз. Сохонто, пос. Диксон (древний жильный лёд на склоне, разрез Д-1-09), м. Марре-Сале (из льда жилы на контакте с породой МС-2-09) отличается относительно повышенной минерализацией (36...140 мг/л, при среднем значении 84 мг/л), сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатным и смешанным катионным составом (рис. 3, группа 2). Отношение ионов натрия к хлориду не имеет явно выраженной тенденции, что, вероятно, связано со смешанным

источником. Такой состав мог быть сформирован талыми снеговыми водами с примесью пыли и аэрозолей континентального происхождения [3], а также участием сегрегационного льдообразования при формировании полигонально-жильного льда с многочисленными минеральными вертикальными прожилками.

По составу легкорастворимых солей водные вытяжки из многолетнемерзлых пород, вмещающих ледяные жилы (МС-2А-11), сульфатно-гидрокарбонатные и сульфатно-хлоридные, натриевые. В отложениях засоленность варьируется от 0,01 % на глубине 1,4 м до 0,21 % на глубине 3,5 м. При этом на глубине 7 м засоленность понижается до 0,08 %. Уменьшение засоленности и хлоридов сверху вниз по разрезу и сульфатный состав солей характерны для вторично промерзших отложений таликов [5]. Минерализация полигонально-жильных льдов в этом разрезе (10...88 мг/л, при среднем значении 39 мг/л) не соответствует составу и засоленности вмещающих пород. Засоленность многолетнемерзлых отложений разрезов о. Белый, пос. Диксон также не отражается на минерализации ультрапресных и пресных сингенетических полигонально-жильных льдов.

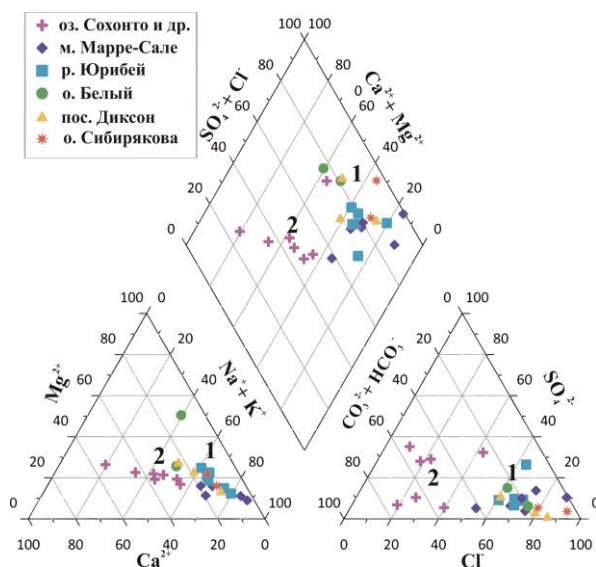


Рис 3. Диаграмма Пайпера химического состава расплавов полигонально-жильных льдов, выраженная в %-эквивалентах: 1 – группа льдов, сформированных при участии морских аэрозолей; 2 – группа льдов, сформированных при участии аэрозолей континентального происхождения и сегрегационного льдообразования

Fig. 3. Piper diagram. Chemical composition of polygonal ice wedge melts, in %-equivalents: 1 – group of ice formed with the marine aerosols participation; 2 – group of ice formed with the continental origin aerosols and segregation ice formation participation

На диаграмме гидрохимического состава пробы льда из изученных жил попадают в две разные группы по соотношению основных ионов (рис. 3). Это связано с тем, что в формировании льда жил участвовали разные источники влаги, в группе 1 – атмосфер-

ные зимние осадки с морскими аэрозолями, в группе 2 – зимние осадки и континентальными аэрозолями вместе с поверхностными водами.

Сезонные льды и поверхностные воды отличаются по гидрохимическому составу от полигонально-жильного льда. Морской лед наследует минерализацию морской воды, среднесоленый (1,1...3,5 г/л), характеризуется хлоридным, магниевым-натриевым составом (рис. 4). Озерный лед ультрапресный, минерализация уменьшается с глубиной, от 23 мг/л на поверхности до 4 мг/л на глубине. С глубиной меняется катионно-анионный состав от сульфатно-хлоридного, натриевого на поверхности, к гидрокарбонатно-хлоридному и смешанному катионному составу на глубине 0,55 м. Такое распределение отражает сезонное изменение гидрохимического состава при ледоставе и повышении концентрации морских аэрозолей в снеге, перекрывающем озерный лед в осенне-зимний период, т. к. не вся акватория моря покрыта льдом [17]. Фирновый лед полярного Урала имеет очень низкую минерализацию (1 мг/л), что делает затруднительным количественную оценку его гидрохимического состава, и в отличие от атмосферных осадков изученных ключевых участков [14], в нем отсутствуют примеси морского аэрозоля. Поверхностные воды озер, ручья ультрапресные (27–54 мг/л) по минерализации и имеют хлоридно-гидрокарбонатный и смешанный катионный состав, что обусловлено двумя источниками формирования – атмосферными осадками и обменными процессами с породами в открытой системе.

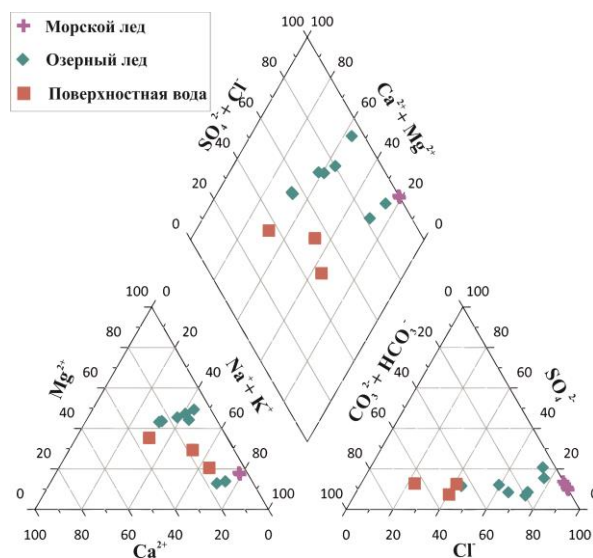


Рис 4. Диаграмма Пайпера химического состава расплавов сезонного льда и поверхностных вод, выраженная в %-эквивалентах

Fig. 4. Piper diagram. Chemical composition of seasonal ice melt and surface water, in % equivalents

Из распределения проб на диаграмме следует, что морской и озерный лед по составу ионов сходен с полигонально-жильным льдом группы 1; поверхност-

ные воды схожи с полигонально-жильным льдом группы 2.

При формировании полигонально-жильных льдов за счет морозобойного растрескивания в начале снеготаяния происходит затекание в трещины и быстрое промерзание талой воды, что сохраняет наиболее близкий к источнику химический состав. Морской атмосферный аэрозоль формирует хлоридно-натриевый состав льдов, континентальные аэрозоли – гидрокарбонатно-кальциевый состав. В формировании полигонально-жильного льда с многочисленными вертикальными прожилками минеральных частиц вместе с сингенетическим участвовало сегрегационное льдовыделение. В этом случае в летние сезоны в ледяных жилах возникали полости протаивания, в них затекали минеральные грунты вместе с надмерзлотными водами, которые являются источником повышенного содержания водорастворимых солей. При промерзании водонасыщенных грунтов, смешанных с водой оттаявших частей жилы, в замкнутом объеме происходила сегрегация, медленное выделение шпиров грунта и льда и метаморфизация химического состава льда.

Распределение редкоземельных элементов

Для полигонально-жильных льдов первой и второй группы выявлено превышение кларковых чисел лантаноидов [22] в водорастворимой форме. В полигонально-жильном льду значения концентраций лантаноидов в элементарной жилке разреза МС-2-09 в 70 раз превышают кларковые числа. Превышения выявлены в разрезах: м Кареповский в 30 раз; о. Белый, м. Марре-Сале (разрез МС-2-09 за исключение элементарной жилки) в 10 раз; р. Юрибей и м. Марре-Сале МС-2А-11 – в 5 раз; оз. Сохонто, о. Сибирякова и пос. Диксон – в 2...4 раза. Содержание РЗЭ в аэрозоле иногда связывают с выветриванием коренных пород [33]. Высокое содержание РЗЭ было обнаружено в талой воде ледников западной Гренландии [34]. Возможно, источником химических элементов являются вулканические выбросы, сорбированные падающим снегом [35]. Накопление лантаноидов в водорастворимой форме обусловлено низкой соленостью жил, т. к. при достижении концентрации солей 6 г/л происходит сорбция легких элементов из раствора [18].

Во взвеси из льда разрезов МС-2А-11 и р. Юрибей содержания лантаноидов оказались ниже, чем кларковые значения. В верхней части озерного льда, гидрохимический состав которого связан с морскими аэрозолями, в диапазоне глубин 0...0,32 м кларковые значения превышает La в 15 раз и Eu в 2 раза, суммарная концентрация лантаноидов равна 0,92 мкг/л, без лантана – 0,14 мкг/л. В нижней части гидрохимический состав льда формируется озерной водой, в диапазоне глубин 0,32...0,55 м кларковые значения превышает La в 13 раз, суммарная концентрация лантаноидов равна 0,69 мкг/л, без лантана – 0,05 мкг/л. Повышенное содержание РЗЭ в верхней части озерного льда, сформированного с участием зимних атмо-

сферных осадков, обусловлено содержанием лантаноидов в морском аэрозоле. В морском льду кларковые значения превышает La более чем в 100 раз и Eu в 3 раза, средняя суммарная концентрация лантаноидов в образце равна 9,1 мкг/л, без лантана – всего 0,07 мкг/л. Содержание лантана на два порядка превышает содержание остальных лантаноидов. В фирновом льду ледника Романтиков содержание лантаноидов крайне мало (на пределе обнаружения или ниже) – 0,03 мкг/л, без лантана – менее 0,01 мкг/л. Вероятно, низкие концентрации РЗЭ обусловлены отсутствием морского аэрозоля в составе снега Полярного Урала.

В полигонально-жильных льдах содержание лантана равно 20 % от общего содержания лантаноидов. Для разрезов оз. Сохонто содержание лантана выше – 50 %, МС-2-09 – 30 % (группа 1). В морском льду лантана содержится 99 %, в озерном – 88 %, в фирновом – 77 % от общего содержания лантаноидов. В многолетнемерзлых отложениях МС-2А-11 подвижная форма лантана относительно суммы лантаноидов варьируется от 5 % на глубине 7 м до 63 % на глубине 3 м, где обнаружено засоление. Для взвеси разрезов МС-2А-11 и р. Юрибей обнаружена линейная зависимость валового содержания лантана и суммы лантаноидов, содержание лантана относительно суммы лантаноидов равно 78 %. При формировании полигонально-жильных льдов наследуется исходный состав РЗЭ от зимних атмосферных осадков. Перераспределение РЗЭ обусловлено частичным протаиванием жил, участием сегрегационного льдообразования и химическим взаимодействием с вмещающими отложениями.

По цериевой и европиевой диаграмме можно определить уровень влияния морских источников РЗЭ, поступавших с аэрозолями, участие окислительных процессов при формировании ледяных жил. Цериевая аномалия, равная единице, означает отсутствие морского источника, а чем ближе к нулю, тем сильнее влияние морских источников РЗЭ. Полигонально-жильные льды на диаграмме по оси Se_{an} находятся в диапазоне 0,2...1,0; по оси Eu_{an} в диапазоне 0,7...1,5 (рис. 5). Полигонально-жильные льды имеют смешанный источник РЗЭ, снеговые талые воды и морские аэрозоли.

Фирновый лед, источником которого является снег, характеризуется отрицательной цериевой аномалией. Количество РЗЭ при этом близко к пределу обнаружения, что затрудняет интерпретацию результатов. Цериевая аномалия морского и озерного льда отрицательная, вероятно, это связано с поступлением РЗЭ из морских аэрозолей. Отложения МС-2А-11 имеют отрицательную цериевую аномалию и морской источник РЗЭ. Взвеси из льда разрезов р. Юрибей и МС-2А-11 по цериевой аномалии близки к полигонально-жильному льду.

Европиевая аномалия показывает участие кислорода в процессе льдообразования. Небольшие повышения европиевой аномалии до 1,5 выявлены для разрезов оз. Сохонто и МС-2А-11, это связано с ча-

стичным протаиванием жил. В целом полигонально-жильные льды и взвеси расположены на одной линии, близкой к единице. Следовательно, отсутствовали окислительные процессы, и протаивание ледяных жил не происходило. Отмеченные в многолетнемерзлых отложениях положительные европиевые аномалии свидетельствуют о процессах дальнейшего преобразования. В отложениях, вмещающих ледяную жилу (МС-2А-11), происходило преобразование осадочных пород при хорошей аэрации [10], что было возможно только в их талом состоянии и подтверждает их промерзание в талике [5].

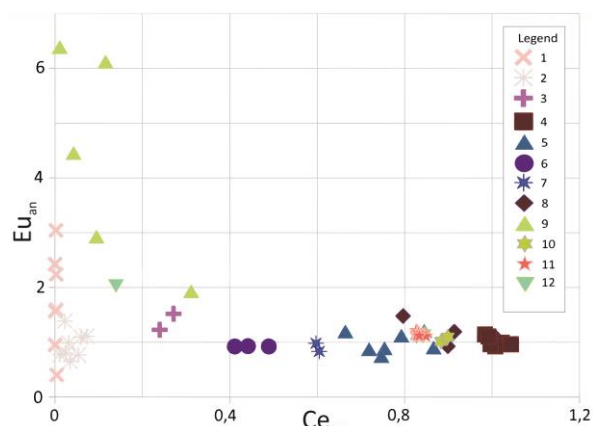


Рис. 5. Диаграмма цериевой и европиевой аномалии: 1 – морской лед; 2 – озерный лед; 3–8 – полигонально-жильный лед; 3 – оз. Сохонто; 4 – р. Юрибей; 5 – о. Белый, пос. Диксон, м. Кареповский; 6 – МС-2-09; 7 – о. Сибирякова; 8 – МС-2А-11; 9 – отложения МС-2А-11; 10 – взвесь из льда МС-2А-11; 11 – взвесь из льда района р. Юрибей; 12 – ледник Романтиков

Fig. 5. Diagram of cerium and europium anomalies: 1 – sea ice; 2 – lake ice; 3–8 – polygonal ice wedge; 3 – lake Sokhonto; 4 – river Yuribey; 5 – island Bely, settlement Dikson, cape Karepovskiy; 6 – MS-2-09; 7 – Sibiryakova island; 8 – MS-2A-11; 9 – soils of MS-2A-11 section; 10 – ice suspension of MS-2A-11 section; 11 – ice suspension of the river Yuribey area; 12 – glacier Romantikov

Соотношение легких и тяжелых РЗЭ отражает процессы перехода элементов из растворенной в нерастворенную форму. Диаграмма принимает вид степенной функции и отражает условия льдообразования – наличие термодинамического геохимического барьера при образовании полигонально-жильных льдов (рис. 6). При морозобойном растрескивании талая снеговая вода сразу после попадания в трещину замерзает, формируя жилу, – данный процесс минимизирует перераспределение РЗЭ, источником которых являются атмосферные осадки. Для полигонально-жильных льдов и взвеси из льда соотношение легких и тяжелых РЗЭ не превышает 1,7 при среднем значении 0,9. Следовательно, отсутствовало перераспределение РЗЭ при формировании льда, происходило быстрое промерзание воды без контакта с вмещающими отложениями. Таким образом, соотношение легких и тяжелых элементов, близкое к единице, яв-

ляется показателем, характеризующим полигонально-жильный лед. Для сезонных льдов соотношение легких и тяжелых РЗЭ не ниже – 1,9, при среднем значении 19,6. Для отложений разреза МС-2А-2011 льдов легких и тяжелых РЗЭ не ниже 1,7 при среднем значении 6,3, следовательно, многолетнемерзлые отложения обогащены легкими элементами. Источником легких элементов могут служить морские и речные поверхностные воды, обогащенные РЗЭ вследствие терригенного стока – поступления с суши растворенных, коллоидных и взвешенных веществ. При смешении вод происходил переход водорастворимых легких РЗЭ в нерастворимую форму [18].

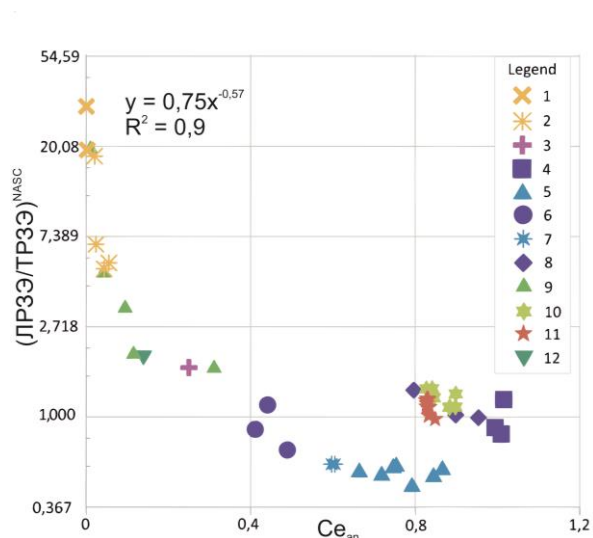


Рис. 6. Диаграмма соотношения цериевой аномалии и соотношения легких и тяжелых элементов: 1 – морской лед; 2 – озерный лед; 3–8 – полигонально-жильный лед; 3 – оз. Сохонто; 4 – р. Юрибей; 5 – о. Белый, пос. Диксон, м. Кареповский; 6 – м. Марре-Сале – МС-2-09; 7 – о. Сибирякова; 8 – МС-2А-11; 9 – отложения МС-2А-11; 10 – взвесь из льда разреза МС-2А-11; 11 – взвесь из льда района р. Юрибей; 12 – ледник Романтиков

Fig. 6. Diagram of cerium anomaly ratio and light and heavy elements ratio: 1 – sea ice; 2 – lake ice; 3–8 – polygonal ice wedge; 3 – lake Sokhonto; 4 – river Yuribey; 5 – island Bely, settlement Dikson, cape Karepovskiy; 6 – MS-2-09; 7 – Sibiryakova island; 8 – MS-2A-11; 9 – soils of MS-2A-11 section; 10 – ice suspension of MS-2A-11 section; 11 – ice suspension of the river Yuribey area; 12 – glacier Romantikov

Несмотря на различия в гидрохимическом составе, полигонально-жильные льды 1 и 2 группы имеют общий источник редкоземельных элементов – зимние атмосферные осадки и морской аэрозоль. Протаивание жил и незначительный обмен РЗЭ с вмещающими отложениями обнаружен только для разрезов МС-2А-11 (группа 1) и оз. Сохонто (группа 2).

Распределение нормированных содержаний РЗЭ для полигонально-жильных льдов, вмещающих отложений и взвеси из льда разреза МС-2А-11 представлено на рис. 7. Максимальные содержания РЗЭ во взвеси из льда находятся на глубине 3,5–3,7 м, во

льду на глубине 1,8 м. Несмотря на изменение концентраций РЗЭ в образцах закономерность распределения остается неизменной. Следовательно, условия и источники РЗЭ не менялись в процессе формирования.

Распределение нормированных содержаний РЗЭ для сезонных льдов представлено на рис. 8. В озер-

ном льду содержание РЗЭ и минерализация (с 22 до 5 мг/л) уменьшается с глубиной, т. к. верхняя часть льда сформирована в основном за счет снега. Для морского льда данная тенденция менее выражена. На диаграмме видно высокое содержание лантана, источником которого является терригенный материал, поставляемый реками [18].

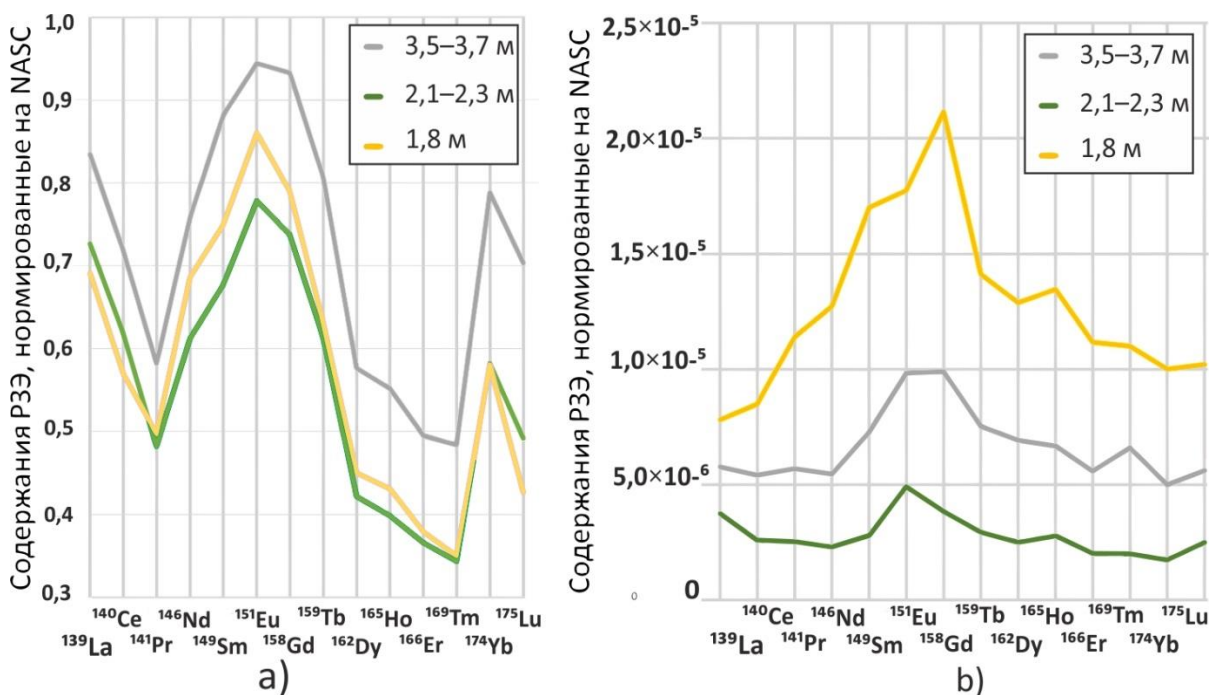


Рис 7. Распределение нормированных содержаний РЗЭ разреза МС-2А-11 для: а) взвеси из льда; б) полигонально-жильных льдов

Fig 7. Distribution of normalized REE contents of MS-2A-11 section for: (a) ice suspensions; (b) polygonal ice wedge

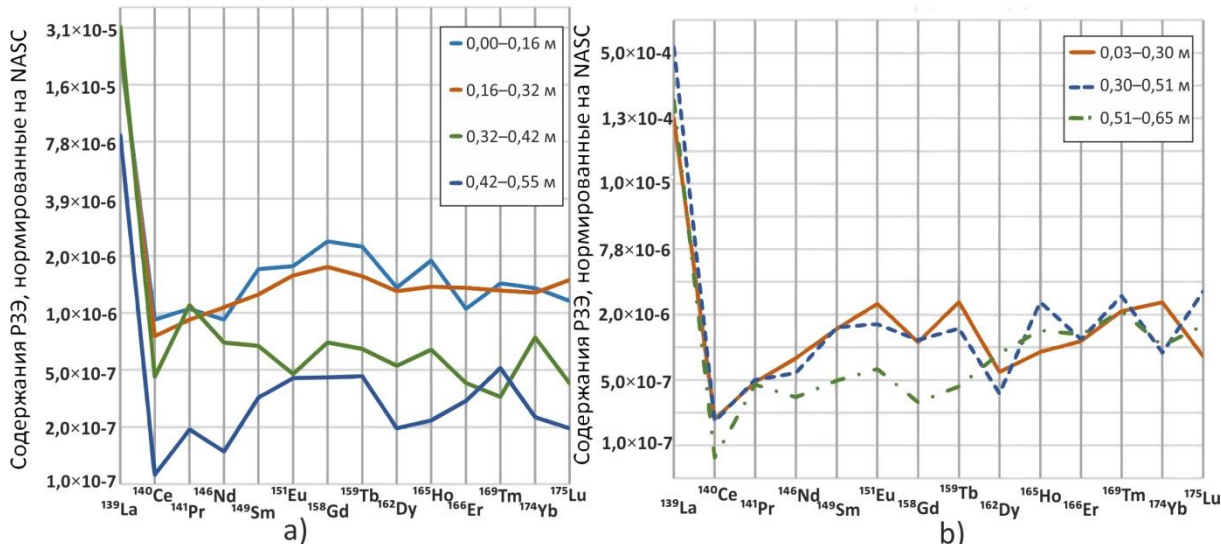


Рис 8. Распределение нормированных (NASC) содержаний РЗЭ в сезонных льдах: а) озерный лёд; б) морской лёд

Fig 8. Distribution of normalized REE contents in seasonal ice: a) lake ice; b) sea ice

РЗЭ могут находиться в коллоидной составляющей с железом [18]. Зависимость суммарной концентрации лантаноидов и содержания железа, иттрия и тория прослеживается для полигонально-жильных льдов, за исключением современной элементарной

жилки МС-2-09 и голоценовой жилы м. Кареповский. Источником железа в полигонально-жильных льдах могут являться аэрозоли и атмосферные осадки [32]. Корреляция суммарной концентрации лантаноидов и валового содержания железа, фосфора, тория, иттрия

и урана для взвеси из льда разрезов МС-2А-2011, р. Юрибей может указывать на то, что во взвеси присутствует в небольших количествах минерал, содержащий эти элементы, например, монацит. Монацит широко распространен как акцессорный минерал в гранитных изверженных и гнейсовых метаморфических породах, и наносные пески в областях с такими породами могут содержать монацит [36].

Полигонально-жильный лед современной элементарной жилки МС-2-09 и голоценовой жилы м. Кареповский по распределению РЗЭ не имеет достоверных линейных корреляций с другими полигонально-жильными льдами, возможно, высокие содержания РЗЭ в этих льдах обусловлены участием стока насыщенных органическими веществами вод и современным формированием их химического состава, в котором отражено влияние антропогенных источников РЗЭ.

Выводы

Сравнительный анализ гидрохимического состава и распределения редкоземельных элементов в полигонально-жильных льдах выявил:

1. На химический состав полигонально-жильных льдов, изученных в прибрежной зоне ключевых участков о. Белый, о. Сибирякова, Западного Ямала и Западного Таймыра, имели влияние морские и континентальные аэрозоли. Сингенетические полигонально-жильные льды, пресные и ультрапресные по минерализации, сформированы при промерзании талых вод, содержат сорбированные снегом морские аэрозоли. Полигонально-жильные льды в удаленном от моря районе оз. Сохонто не имеют признаков морского влияния по соотношению основных ионов. Полигонально-жильные льды с минеральными включениями формировались не только за счет талых снеговых вод с аэрозолями континентального происхождения, но и за счет надмерзлотных вод.
2. Минерализация сингенетических полигонально-жильных льдов без участия сегрегационного

льдообразования не зависит от степени засоленности вмещающих отложений.

3. Морской лед наследует минерализацию и состав морской воды. Озерный лед различается по глубине и отражает сезонное изменение гидрохимического состава при ледоставе и повышение концентрации морских аэрозолей в снеге, перекрывающем озерный лед. Фирновый лед полярного Урала имеет очень низкую минерализацию, в нем отсутствуют примеси морского аэрозоля.
4. Зимние атмосферные осадки имеют в своем составе атмосферные аэрозоли, насыщенные редкоземельными элементами.
5. В полигонально-жильных льдах выявлено увеличение содержания лантаноидов в водорастворимой форме по сравнению с кларковыми значениями и современными поверхностными льдами. По цериевой аномалии в большинстве изученных сингенетических ледяных жил подтверждается участие морских аэрозолей. По распределению редкоземельных элементов выявлено характерное для полигонально-жильных льдов соотношение легких и тяжелых редкоземельных элементов, равное 0,9, и отношение лантана к остальным лантаноидам, равное 0,2.
6. В полигонально-жильных льдах голоценового и неоплейстоценового возраста реализован природный механизм накопления редкоземельных элементов в водорастворимой форме в комплексе с железом, торием и иттрием. Вытаивание ледяных жил может приводить к поступлению редкоземельных элементов в поверхностные воды.

Работа выполнена по госзаданию НИР ТюмНЦ СО РАН на 2018-2020 годы, протокол № 2 от 08.12.2017 г. Проект IX.133.1.2: Закономерности стадийных изменений мерзлых толщ, льдов и ландшафтов арктических островов и обрамления Карского моря под воздействием климата, экзогенных и эндогенных геологических процессов. Аналитические исследования выполнены при поддержке РФФИ № 18-05-60222 Арктика, № 18-55-11005 АФ_т, № 18-05-00376 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирюхин В.А., Коротков А.И., Павлов А.Н. Общая гидрогеология. – Л.: Недра, 1988. – 359 с.
2. Методы геокриологических исследований / под ред. Э.Д. Ершова. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2004. – 511 с.
3. Фотиев С.М. Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // Криосфера Земли. – 1999. – Т. III. – № 2. – С. 40–65.
4. Анисимова Н.П. Криогидрохимические особенности мерзлой зоны. – Новосибирск: Наука, 1981. – 150 с.
5. Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири. – М.: Научный мир, 2010. – 352 с.
6. Подземные льды в четвертичных отложениях побережья Карского моря как отражение палеогеографических условий конца неоплейстоцена–голоцена / И.Д. Стрелецкая, Е.А. Гусев, А.А. Васильев, П.В. Рекант, Х.А. Арсланов // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. – 2012. – № 72. – С. 28–59.
7. Васильчук Ю.К., Трофимов В.Т. О находках сильноминерализованных повторно-жильных льдов // Известия Академии наук СССР. Серия геологическая. – 1984. – № 8. – С. 129–134.
8. Колебания уровня моря и их отражение в составе и строении полигонально-жильных льдов в низовьях Енисея / О.Л. Опонкина, Е.А. Слагода, И.В. Томберг, М.Ю. Суслова, А.Д. Фирсова,

- Т.В. Ходжер, Н.А. Жученко // Лёд и Снег. – 2014. – № 2 (126). – С. 82–90.
9. Алексеева Л.П. Геохимия подземных льдов, соленых вод и рассолов Западной Якутии: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Иркутск, 2015. – 223 с.
10. Иванова В.В. Геохимия пластовых льдов острова Новая Сибирь (Новосибирские острова, Российская Арктика) как отражение условий их генезиса // Криосфера Земли. – 2012. – Т. XVI. – № 1. – С. 56–70.
11. Соломатин В.И. Геокриология: подземные льды. 2 изд., испр. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 2017. – 346 с.
12. Рогов В.В. Основы криогенеза. – Новосибирск: Гео, 2009. – 203 с.
13. Бутаков В.И., Тихонравова Я.В., Слагода Е.А. Закономерности формирования геохимического состава подземных льдов и отложений на севере полуострова Гыдан // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2018. – № 5 (131). – С. 30–40.
14. Исследования атмосферного аэрозоля в арктических районах России / Л.П. Голобокова, В.В. Польшин, Д.М. Кабанов, С.А. Терпугова, Д.Г. Чернов, Е.В. Чипанина, Т.В. Ходжер, О.Г. Нещетаева, М.В. Панченко, С.М. Сакерин // Лед и снег. – 2013. – Т. 53. – № 2. – С. 129–136.
15. Дэвис Дж.С. Статистический анализ в геологии. – М.: Недра, 1990. – 319 с.

16. Васильчук Ю.К. Геохимический состав подземных льдов севера Российской Арктики // Арктика и Антарктика. – 2016. – № 2. – С. 99–115.
17. Variability of Water Chemistry in Tundra Lakes, Petuniabukta Coast, Central Spitsbergen, Svalbard / M. Mazurek, R. Paluszkiwicz, G. Rachlewicz, Z. Zwoliński // The Scientific World Journal. – 2012. – Article ID 596516. – 13 p.
18. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане // Литология и полез. ископаемые. – 2004. – № 4. – С. 339–358.
19. Piper D.Z., Bau M. Normalized rare earth elements in water, sediments, and wine: identifying sources and environmental redox conditions // American Journal of Analytical Chemistry. – 2013. – V. 4. – P. 69–83.
20. Строение и генезис подземных льдов в верхнеплейстоцен-голоценовых отложениях мыса Марре-Сале (Западный Ямал) / Е.А. Слагода, О.Л. Опокина, В.В. Рогов, А.Н. Курчатова // Криосфера Земли. – 2012. – Т. 16. – № 2. – С. 9–23.
21. Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Kononov A.M. Trace elements and rare earth elements in ground ice in kimberlites and sedimentary rocks of Western Yakutia // Cold Regions Science and Technology. – 2016. – T. 123. – C. 140–148.
22. Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых / под ред. А.П. Соловова. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
23. Elderfield H. The oceanic chemistry of the rare earth elements // Phil. Trans. R. Soc. London A. – 1988. – V. 325. – P. 105–126.
24. Johansson K.H., Stetzenbach K.J., Hodge V.F. Rare earth elements as geochemical tracers of regional groundwater mixing // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1997. – V. 61. – № 17. – P. 3605–3618.
25. Rare earth element distribution in the Lake Tyrrell groundwaters, Victoria, Australia / J.A. Fee, H.E. Gaudette, W.B. Lyons, D.T. Long // Chem. Geol. – 1992. – V. 96. – P. 67–93.
26. Rare earth elements in chloride-rich groundwater, Palo Duro Basin, Texas, USA / D.G. Gosselin, M.R. Smith, E.A. Lepel, J.C. Laul // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1992. – V. 56. – P. 1495–1505.
27. The «North American shale composite»: its compilation, major and trace element characteristics / L.P. Gromet, R.F. Dymek, L.A. Haskin, R.L. Korotev // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1984. – V. 48. – № 12. – P. 2469–2482.
28. Rare earth element variations in Mid-Archean banded iron formations: implications for the chemistry of ocean and continent and plate tectonics / Y. Kato, I. Ohta, T. Tsunematsu et al. // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1998. – V. 62. – № 21/22. – P. 3475–3497.
29. Геокриология СССР. Западная Сибирь / под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1989. – 454 с.
30. Радиоуглеродное датирование многолетнемерзлых отложений острова Белый, Карское море / Е.А. Слагода, Г.В. Симонова, Я.В. Тихонравова, А.О. Кузнецова, К.А. Попов, П.Т. Орехов // Криосфера Земли. – 2018. – Т. 22. – № 4. – С. 3–14.
31. Реконструкция развития термокарста в районе озера Сохонто (Центральный Ямал) в позднем неоплейстоцене-голоцене по криолитологическим и ботаническим данным / Е.А. Слагода, М.В. Нарушко, Ю.И. Прейс, О.Л. Опокина, А.Н. Курчатова // Криосфера Земли. – 2016. – Т. 20. – № 4. – С. 59–68.
32. Семенец Е.С., Свистов П.Ф., Талаш А.С. Химический состав атмосферных осадков. Российского Заполярья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 3. – С. 27–36.
33. Water-soluble trace, rare earth elements and organic compounds in Arctic aerosol / C. Turetta, R. Zangrando, E. Barbaro, J. Gabrieli, E. Scalabrin, P. Zennaro, A. Gambaro, G. Toscano, C. Barbante // Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali. – 2016. – V. 27. – P. 95–103.
34. Ocean circulation and freshwater pathways in the Arctic Mediterranean based on a combined Nd isotope, REE and oxygen isotope section across Fram Strait / G. Laukert, M. Frank, D. Bauch et al. // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2017. – V. 202. – P. 285–309.
35. Sadeghi M. et al. REE contents in solid sample media and stream water from different geological contexts: Comparison between Italy and Sweden // Journal of Geochemical Exploration. – 2013. – V. 133. – P. 176–201.
36. Harlov D.E. et al. Apatite-magnetite relations in the Kiirunavaara magnetite-apatite ore, northern Sweden // Chemical Geology. – 2002. – V. 191. – P. 47–72.

Поступила 14.11.2019 г.

Информация об авторах

Бутаков В.И., ассистент-стажер Института геологии и нефтегазодобычи Тюменского индустриального университета; инженер 1 категории НИПИ «Нефтегазпроект» Тюменского индустриального университета.

Слагода Е.А., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории Комплексных методов изучения криогенных геосистем Института криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН; ведущий научный сотрудник, Тюменский государственный университет; ведущий научный сотрудник, Тюменский индустриальный университет.

Тихонравова Я.В., научный сотрудник лаборатории Общей геоэкологии Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН; научный сотрудник лаборатории Комплексных методов изучения криогенных геосистем Института криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН.

Опокина О.Л., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории Комплексных методов изучения криогенных геосистем Института криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН; доцент, Тюменский индустриальный университет.

Томберг И.В., кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории Гидрохимии и химии атмосферы Лимнологического института СО РАН.

Жученко Н.А., научный сотрудник лаборатории Гидрохимии и химии атмосферы Лимнологического института СО РАН.

UDC 551.34:502.6:550.46

HYDROCHEMICAL COMPOSITION AND RARE-EARTH ELEMENTS IN ICE WEDGE OF THE KARA REGION CRYOLITOZONE KEY AREAS

Vladislav I. Butakov¹,
vladbutakov@yahoo.com

Elena A. Slagoda^{2,3,1},
eslagoda@ikz.ru

Yana V. Tikhonravova^{4,2},
tikh-jana@yandex.ru

Olga L. Opokina^{2,1},
opokina@ikz.ru

Irina V. Tomberg⁵,
kaktus@lin.irk.ru

Natalja A. Zhuchenko⁵,
zhna@lin.irk.ru

¹ Tyumen Industrial University,
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

² Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS,
86, Malygin street, Tyumen, 625000, Russia.

³ University of Tyumen,
6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russia.

⁴ Melnikov Permafrost Institute SB RAS,
36, Merzlotnaya street, Yakutsk, 677010, Russia

⁵ Limnological Institute SB RAS,
3, Ulan-Bator street, Irkutsk, 664033, Russia.

Relevance of the research. Information on composition, ice content and geochemical characteristics of frozen rocks is necessary for exploration of oil and gas condensate fields of Yamal, Gydan and Taimyr. Among the factors determining the tundra landscapes ecology of the cryolithozone, underground ice and their melting have great importance. The hydrochemical composition and rare-earth elements content in syngenetic ice wedge retain the information on the moisture sources and conditions of their formation. The main ions correlation and rare-earth elements distribution in the ice composition can be used to estimate the influence of such natural factors as precipitation, sea and volcanic aerosols and anthropogenic pollution.

The main aim of the research is to identify chemical elements sources and to assess the impact of the ice type on hydrochemical composition and rare-earth elements distribution in different genetic types of ice – wedge, seasonal and firm ice.

Objects: ice wedge, sediments rocks, seasonal ice, surface water, taken in expeditions Earth Cryosphere Institute, Tyumen scientific centre SB RAS in 2009–2014.

Methods of chemical research: inductively coupled plasma mass spectrometry, atomic absorption spectrometry, emission photometry, chromatography.

Results. It is established that marine and continental aerosols influenced the chemical composition of ice wedge studied in the coastal zone of the key areas of Belyj island, Sibiryakova island, Western Yamal and Western Taimyr. Fresh and ultrafresh syngenetic ice wedge is formed by freezing melt water, which contains snow-sorbed sea aerosols – suspended in the atmosphere solid and liquid particles. Ice wedge in the lake Sokhonto area long-distanced from the sea has no signs of marine influence according to the main ions content. Ice wedge with mineral inclusions was formed not only due to snow melt water with aerosols of continental origin, but also due to the suprapermafrost water. It was found out that lanthanide content in water-soluble form has increased in comparison with both clark values and the content in the modern surface ice. In the most of examined syngenetic ice wedge the participation of marine aerosols is confirmed taking into account the cerium anomaly. Moreover according to the distribution of rare-earth elements the correlation between light and heavy rare-earth elements typical for ice wedge, equal to 0,9, and correlation between lanthanum and the other lanthanides, equal to 0,2, are observed. Sea ice inherits the mineralization and composition of sea water. Lake ice varies in depth and reflects seasonal changes in hydrochemical composition of ice and increases in concentration of marine aerosols in the snow covering the lake ice. Firm ice of the polar Urals has a very low mineralization, there are no impurities of sea aerosol. The natural mechanism of rare earth elements accumulation in water-soluble form in combination with iron, thorium and yttrium is implemented in ice wedge of the Holocene and Neopleistocene. Melting out ice wedge may lead to the flow of rare-earth elements in the surface water.

Key words:

Ice wedge, ice hydrochemistry, rare-earth elements, geochemistry of deposits, cryogenic concentration, clark of hydrosphere.

The research was carried out by the state task of R&D Tyumen SC SB RAS for 2018–2020, report no. 2, 08.12.2017. Project IX.133.1.2: Laws of stage changes of permafrost, ice and landscapes of arctic islands and the Kara Sea framing under the impact of climate, environmental and endogen geological processes. The analytical research was supported by the RFBR no. 18-05-60222 Arctic, no. 18-55-11005 AF_t, № 18-05-00376 A.

REFERENCES

- Kiryukhin V.A., Korotkov A.I., Pavlov A.N. *Obshchaya gidrogeologiya* [Fundamental Hydrogeology]. Leningrad, Nedra Publ., 1988. 359 p.
- Metody geokriologicheskikh issledovaniy* [Methods of geocryological investigations]. Ed. by E.D. Ershov. Moscow, Moscow University Press, 2004. 512 p.
- Fotiev S.M. Regularities in formation of ionic-salt composition of natural waters, the Yamal Peninsula. *Kriosfera zemli*, 1999, vol. III, no. 2, pp. 40–65. In Rus.
- Anisimova N.P. *Kriogidrokhimicheskie osobennosti merzloy zony* [Cryohydrochemical characteristics of frozen zone]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1982. 151 p.
- Kritsuk L.N. *Podzemnye ldy Zapadnoy Sibiry* [Ground ice of West Siberia]. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2010. 352 p.
- Streletskaia I.D., Gusev E.A., Vasiliev A.A., Rekant P.V., Arslanov H.A. Ground ice in quaternary deposits of Kara sea coast as a proxy of palaeogeography in late pleistocene-holocene. *Byulleten komissii po izucheniiu chetvertichnogo perioda*, 2012, no. 72, pp. 28–59. In Rus.
- Vasilchuk Yu.K., Trofimov V.T. O nakhodkakh silnomineralizovannykh povtorno-zhilnykh ldov [About finding strongly mineralized ice wedge]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geologicheskaya*, 1984, no. 8, pp. 129–134.
- Opokina O.L., Slagoda E.A., Tomberg I.V., Suslova M.Yu., Firsova A.D., Hodzher T.V., Zhuchenko N.A. Sea level fluctuations and their signature in the composition and structure of polygonal ice wedge in the Yenisei River lower reaches. *Led i Sneg*, 2014, no. 2 (126), pp. 82–90. In Rus.
- Alekseeva L.P. *Geokhimiya podzemnykh ldov, solenyykh vod i rassolov Zapadnoy Yakutii*. Dis. Dokt. nauk [Geochemistry of underground ice, salt water and brines of Western Yakutia. Dr. Diss.]. Irkutsk, 2015. 223 p.
- Ivanova V.V. Geochemical features of formation of massive ground ice bodies (New Siberia island, Siberian Arctic) as the evidence of their genesis. *Kriosfera Zemli*, 2012, vol. XVI, no. 1, pp. 56–70. In Rus.
- Solomatin V.I. *Geokriologiya: podzemnye ldy* [Geocryology: underground ice]. Moscow, Yurayt Publ., 2017. 346 p.
- Rogov V.V. *Osnovy kriogeneza* [Fundamentals of cryogenesis]. Novosibirsk, Geo Publ., 2009. 203 p.
- Butakov V.I., Tikhonravova Ya.V., Slagoda E.A. Regularities of geochemical composition formation of underground ice and deposits on the north of the Gydan peninsula. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft i gaz*, 2018, no. 5 (131), pp. 30–40. In Rus.
- Golobokova L.P., Polkin V.V., Kabanov D.M., Terpugova S.A., Chernov D.G., Chipanina E.V., Hodzher T.V., Necvetaeva O.G., Panchenko M.V., Sakerin S.M. Atmospheric aerosol research in the Arctic regions of Russia. *Led i sneg*, 2013, vol. 53, no. 2, pp. 129–136. In Rus.
- Davis J.C. *Statistics and data analysis in geology. Kansas Geological Survey*. New York, John Wiley and Sons Publ., 1986. 656 p.
- Vasilchuk Yu.K. Geochemical composition of underground ice in the North of the Russian Arctic. *Arktika i Antarktika*, 2016, no. 2, pp. 99–115. Available at: http://e-notabene.ru/arctic/article_21378.html (accessed 10 November 2019). In Rus.
- Mazurek M., Paluszkiwicz R., Rachlewicz G., Zwoliński Z. Variability of Water Chemistry in Tundra Lakes, Petuniabukta Coast, Central Spitsbergen, Svalbard. *The Scientific World Journal*, 2012, Article ID 596516. 13 p.
- Dubinin A.V. Geochemistry of rare earth elements in the ocean. *Lithology and Mineral Resources*, 2004, vol. 39, no. 4, pp. 289–307.
- Piper D.Z., Bau M. Normalized rare earth elements in water, sediments, and wine: identifying sources and environmental redox conditions. *American Journal of Analytical Chemistry*, 2013, vol. 4, pp. 69–83.
- Slagoda E.A., Opokina O.L., Rogov V.V., Kurchatova A.N. Structure and genesis of the underground ice in the neopleistocene-holocene sediments of Marre-Sale cape, Western Yamal. *Kriosfera Zemli*, 2012, vol. 16, no. 2, pp. 9–23. In Rus.
- Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Kononov A.M. Trace elements and rare earth elements in ground ice in kimberlites and sedimentary rocks of Western Yakutia. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, vol. 123, pp. 140–148.
- Spravochnik po geokhimicheskim poiskam poleznykh iskopaemykh* [Guide to geochemical prospecting for minerals]. Ed. by A.P. Solovov. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.
- Elderfield H. The oceanic chemistry of the rare earth elements. *Phil. Trans. R. Soc. London A*, 1988, vol. 325, pp. 105–126.
- Johannesson K.H., Stetzenbach K.J., Hodge V.F. Rare earth elements as geochemical tracers of regional groundwater mixing. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1997, vol. 61, no. 17, pp. 3605–3618.
- Fee J.A., Gaudette H.E., Lyons W.B., Long D.T. Rare earth element distribution in the Lake Tyrrell groundwaters, Victoria, Australia. *Chem. Geol.*, 1992, vol. 96, pp. 67–93.
- Gosselin D.G., Smith M.R., Lepel E.A., Laul J.C. Rare earth elements in chloride-rich groundwater, Palo Duro Basin, Texas, USA. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1992, vol. 56, pp. 1495–1505.
- Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. The «North American shale composite»: its compilation, major and trace element characteristics. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1984, vol. 48, no. 12, pp. 2469–2482.
- Kato Y., Ohta I., Tsunematsu T. Rare earth element variations in Mid-Archean banded iron formations: implications for the chemistry of ocean and continent and plate tectonics. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1998, vol. 62, no. 21/22, pp. 3475–3497.
- Geokriologiya SSSR. Zapadnaya Sibir* [Geocryology of the USSR. Western Siberia]. Ed. by E.D. Ershov. Moscow, Nedra Publ., 1989. 454 p.
- Slagoda E.A., Simonova G.V., Tikhonravova Ya.V., Kuznetsova A.O., Popov K.A., Orekhov P.T. Radiocarbon dating of permafrost in Bely island, the Kara sea. *Earth's cryosphere*, 2018, vol. 22, no. 4, pp. 3–11.
- Slagoda E.A., Narushko M.V., Preys Yu.I., Opokina O.L., Kurchatova A.N. Reconstruction of thermokarst in the late pleistocene-holocene from geocryological and botanical data (area of lake Sokhonto, Central Yamal). *Kriosfera Zemli*, 2016, vol. 20, no. 4, pp. 59–68. In Rus.
- Semenec E.S., Svistov P.F., Talash A.S. Chemical composition of atmospheric precipitation in Russian Subarctic. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 3, pp. 27–36. In Rus.
- Turetta C., Zangrando R., Barbaro E., Gabrieli J., Scalabrini E., Zennaro P., Gambaro A., Toscano G., Barbante C. Water-soluble trace, rare earth elements and organic compounds in Arctic aerosol. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 2016, vol. 27, pp. 95–103.
- Laukert G., Frank M., Bauch D. Ocean circulation and freshwater pathways in the Arctic Mediterranean based on a combined Nd isotope, REE and oxygen isotope section across Fram Strait. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, vol. 202, pp. 285–309.
- Sadeghi M. REE contents in solid sample media and stream water from different geological contexts: Comparison between Italy and Sweden. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, vol. 133, pp. 176–201.
- Harlov D.E. Apatite-monzonite relations in the Kiirunavaara magnetite-apatite ore, northern Sweden. *Chemical Geology*, 2002, vol. 191, pp. 47–72.

Received: 14 November 2019.

Information about the authors

Vladislav I. Butakov, trainee assistant, engineer 1st category, Tyumen Industrial University.

Elena A. Slagoda, Dr. Sc., principal researcher, Tyumen Scientific Centre SB RAS; leading researcher, University of Tyumen; leading researcher, Tyumen Industrial University.

Yana V. Tikhonravova, researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS; researcher, Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific centre SB RAS.

Olga L. Opokina, Cand. Sc., senior researcher, Tyumen Scientific centre SB RAS; associate professor, Tyumen Industrial University.

Irina V. Tomberg, Cand. Sc., researcher, Limnological Institute SB RAS.

Natalja A. Zhuchenko, researcher, Limnological Institute SB RAS.

УДК 622.24

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ЗАБОЯ ВОЗДУХОМ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ АВАРИЙНОСТИ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН НА КУЮМБИНСКОМ НЕФТЯНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

Бузанов Кирилл Владимирович¹,
byzanovaltay@mail.ru

Борисов Константин Иванович²,
kibor1956@gmail.com

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Сибирский федеральный университет,
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79/10.

Актуальность. Проблема поглощений промывочной жидкости при строительстве верхних секций эксплуатационных и разведочных скважин на месторождениях Восточной Сибири не нова и является одной из основных причин низкого показателя коммерческой скорости бурения в регионе. Кроме того, проходка осложненных интервалов скважин требует значительных временных и материальных затрат. Одним из перспективных решений проблемы поглощений промывочной жидкости является применение воздуха в качестве очистного агента. Технология бурения скважин с продувкой известна более ста лет, однако в связи с прогрессом в области компрессорного машиностроения открываются новые горизонты и возможности её применения. При этом требуется адаптация существующих методик расчета воздухообеспечения к новым для данной технологии горно-геологическим условиям. В статье изложены основные результаты научно-практического исследования очистки забоя воздухом при бурении интервалов под кондуктор в горно-геологических и хозяйственных условиях Куюмбинского нефтяного месторождения.

Цель: формирование основ технико-технологического решения, обеспечивающего безаварийную проходку интервалов скважин под направления и кондукторы с применением очистки забоя воздухом на месторождениях Восточной Сибири.

Объект: методика расчета воздухообеспечения циркуляционной системы скважины Б.Б. Кудряшова.

Методы: теоретические исследования, математическое моделирование с заимствованием положений теории пневмотранспорта, аэродинамики дисперсных частиц в потоке воздуха, производственный эксперимент в условиях действующей буровой установки на месторождении.

Результаты. Сформулированы положения, позволяющие модифицировать расчетную методику воздухообеспечения циркуляционной системы скважины, применение которых позволит предотвратить аварийно-опасные ситуации на стадии проектирования.

Ключевые слова:

Очистка забоя воздухом, аэродинамическое сопротивление, методика Б.Б. Кудряшова, катастрофические поглощения промывочной жидкости, регулирование параметров режима бурения, аэродинамическое давление в скважине.

Введение

Нефтегазовая промышленность является важнейшей народнохозяйственной отраслью в структуре промышленного производства России. Осуществляя транснациональные и внутренние проекты, нефтяникам приходится решать широкий спектр проблем в различных условиях ведения работ. Характерным примером таких проблем являются катастрофические поглощения промывочной жидкости при бурении интервалов под направления и кондукторы на скважинах месторождений Восточно-Сибирского региона. Эффективность решений зависит от совокупности факторов: автономности месторождения, развития его инфраструктуры, наличия поверхностных источников водозабора, уровня организации производства компании-оператора месторождения.

Так, например, благодаря близости рек и некоторым организационным решениям проблема катастрофических поглощений решена при строительстве секции кондуктора на Ярактинском и Талаканском месторождениях.

Однако практика ведения работ на Чаяндинском месторождении (Якутия) [1], Дулисьминском (Иркутская область) [2], Куюмбинском (Красноярский край) [3] месторождениях показывает сложность, а зачастую и невозможность ликвидации поглощений очистного агента на водной основе в интервалах направлений и кондукторов и значительные, сопряженные с этим, временные и ресурсные затраты.

Строительство секций кондукторов и технических колонн на разведочных скважинах Ковыктинского месторождения (Иркутская область) также ведется в условиях естественного отсутствия циркуляции промывочной жидкости. Вследствие этого только лишь на одной скважине № 74р время углубления интервала под кондуктор составило более 35 суток. Осложняющим фактором является и ограниченность водоснабжения на месторождении. В табл. 1 приведен анализ производственной ситуации на скважине № 74р Ковыктинского газоконденсатного месторождения.

Таблица 1. Анализ производственной ситуации на скважине № 74р Ковыктинского ГКМ**Table 1.** Analysis of operational situation for well № 74r of Kovyktinskoe gas condensate field

Забой на момент поглощения, м Bottom hole depth at the moment of fluid loss, m	Параметры режима бурения Drilling parameters	Описание производственной ситуации Operational situation
195	$n=60\div 65$ об/м/гpm; $W_{\text{дол/бит}}=40\div 50\text{--}120$ кН/кN; $Q_{\text{вх/инс}}=28\text{--}18$ л/с/лр; $V_{\text{ср.мех/ав.пен}} < 1$ м/ч/м/h	Катастрофическое поглощение, $\rho=1,08\div 1,12$ г/см ³ , более 20 операций ГИМ-поршень, циклические закачки вязкоупругой смеси в объеме 56 м ³ , фактическое время бурения интервала 29–339 м – 35 суток Catastrophic loss, $\rho=1,08\div 1,12$ г/см ³ , over 20 strokes of hydraulic actuator piston, periodic pushing of hi-vis pill $V_{\text{total}}=56$ м ³ , 29–339 m interval drilling time – 35 days

Примечание: n – частота вращения породоразрушающего инструмента; $W_{\text{дол}}$ – осевое усилие на долото; $Q_{\text{вх}}$ – подача промывочной жидкости; $V_{\text{ср.мех}}$ – средняя механическая скорость бурения; ρ – плотность промывочной жидкости; ВУС – вязкоупругая система; $V_{\text{общ}}$ – общий объем ВУС.

Note: n – rotation speed of the rock cutting tool; W_{bit} – axial weight on the drilling bit; Q_{inc} – flow rate of the flushing fluid; $V_{\text{av,pen}}$ – average penetration rate; ρ – flushing fluid density; hi-vis – high viscosity; V_{total} – total volume of the hi-vis pill.

С конца прошлого века зарубежные и отечественные специалисты активно работают в направлении увеличения эффективности ударно-вращательного бурения с продувкой воздухом или газожидкостными смесями. Широкое распространение получили исследования в области технологии и техники пневмударного бурения, такие как:

- 1) повышение рабочего давления воздуха на основе создания высокопроизводительных бустеров и современных буровых установок;
- 2) создание погружных пневмударных установок с улучшенными эксплуатационными характеристиками, энергетическими параметрами и ресурсом работы [4–6].

С целью сокращения срока строительства скважин и повышения эффективности процесса сооружения горных выработок компании ООО «Интес» и ООО «Коралайна Инжиниринг» провели опытно-промышленные работы по строительству секций кондукторов с использованием технологии ударно-вращательного бурения и очистки забоя воздухом на эксплуатационных скважинах Куюмбинского месторождения.

Эти и другие достижения в области материаловедения, механики газожидкостных сред, опыта отечественного и зарубежного, теории и практики технологии бурения скважин с очисткой забоя воздухом и конструкторских решений определяют современный мировой технический уровень развития ударно-вращательного бурения, существенно расширив технические и технологические возможности его применения.

Использование воздуха как очистного агента является перспективной для исследования технологией снижения проблемы катастрофических поглощений при бурении интервалов под направление и кондуктор в контексте реализации ударно-вращательного бурения.

Однако анализ опыта отечественного и зарубежного, теории и практики технологии бурения скважин с очисткой забоя воздухом показывает целесообразность дальнейшего развития способа и актуальность научных исследований в следующих направлениях:

- 1) Определение достоверной зависимости для расчета коэффициента аэродинамического трения в условиях повышенных расходов очистного агента.
- 2) Выявление степени влияния шероховатости затрубного пространства, действительной массовой, объемной концентрации, а также плотности забойной примеси в потоке воздуха на ожидаемое давление на компрессоре.
- 3) Создание методики оптимизации механической скорости бурения и расхода очистного агента.
- 4) Проведение расчетов и мониторинг рабочего аэродинамического давления в циркуляционной системе для предотвращения пневморазрыва горных пород разреза скважины.

Выбор зависимости для определения коэффициента аэродинамического трения

Для оценки требуемого воздухообеспечения скважины первостепенную важность имеет правильный выбор зависимости для расчета коэффициента аэродинамического сопротивления.

Проведенные исследования показали принципиальную возможность совершенствования методики расчета воздухообеспечения, предложенной Б.Б. Кудряшовым, на основе использования теории пневмотранспорта и динамики движения дисперсных частиц в несущем газовом потоке [7].

В частности, для учета действительной объемной концентрации забойной примеси и вязких сил используется формула определения кинематической вязкости потока воздуха ν_p [8]:

$$\nu_p = \nu_g \cdot \left(1 - \frac{\mu_v}{0,65}\right)^{-1,675},$$

где μ_v – объемная концентрация частиц горной породы (или притока воды); 0,65 и –1,675 – эмпирические коэффициенты; ν_g – кинематическая вязкость воздуха.

В случае применения бурильных труб с ниппельным соединением Б.Б. Кудряшовым экспериментально доказана рациональность использования формулы Веймаута для расчета коэффициента аэродинамического трения [9]:

$$\lambda_b = \frac{0,009407}{\sqrt[3]{D_{\text{эф}}}},$$

и формулы Лобаева при использовании труб с муфто-во-замковыми соединениями [9]:

$$\lambda_{\text{л}} = \frac{1.42}{\left(\frac{D_{\text{эф}}}{e}\right) \cdot \lg(N_R)},$$

где $\lambda_{\text{в}}$, $\lambda_{\text{л}}$ – коэффициенты аэродинамического трения; $D_{\text{эф}}$ – эффективный диаметр канала; e – шероховатость стенки затрубного пространства; N_R – число Рейнольдса; 0,009407, 1,42 – эмпирические коэффициенты.

В технологии бурения с контролем давления при определении потерь аэродинамического давления используют формулу Хэйланда [10–12]:

$$\lambda_{\text{Хэ}} = \left(\frac{1}{-1.8 \lg \left(\left(\frac{e}{3.7 D_{\text{эф}}} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{N_R} \right)} \right)^2,$$

где $\lambda_{\text{Хэ}}$ – коэффициент аэродинамического трения.

В.И. Марон в исследованиях динамики двухфазных потоков в трубопроводах при $N_R > 10^4$ рекомендует использовать для определения коэффициента аэродинамического трения формулу И.Е. Ходановича [13]:

$$\lambda_{\text{Х}} = 0,067 \cdot \left(2 \cdot \frac{e}{D_{\text{эф}}} + \frac{158}{N_R} \right)^{0.2},$$

и формулу А.Д. Альтшуля [13]:

$$\lambda_{\text{А}} = 0,11 \cdot \left(\frac{e}{D_{\text{эф}}} + \frac{68}{N_R} \right)^{0.25}.$$

Для выявления степени влияния плотности продуктов разрушения забоя на результирующее расчетное давление на компрессоре нами проводились исследования для двух ситуаций: наличие только дисперсной фазы в потоке воздуха при отсутствии водопритока и с учетом поступающего в скважину водопритока, но без наличия твердой фазы.

При этом модификация методики Б.Б. Кудряшова предполагает применение в формируемых математических моделях расчета воздухообеспечения скважины зависимости Кондратьева для определения кинематической вязкости и приведенных зависимостей для расчета коэффициента аэродинамического трения.

Рассмотрим пример расчета для следующих компонентов буровой колонны. Набор компоновки низа буровой колонны (КНБК) включал в себя буровое долото CONCAVE SD 12 BIT (диаметр – 394 мм), погружной пневмоударник МАСН 122 (диаметр – 240 мм), УБТ-229 мм (длина – 9,4 м), переводник НЗ-171/МЗ-152, центратор (диаметр – 374 мм), переводник НЗ-152/МЗ-133, буровых труб СБТ – 127 мм. Кроме этого, в колонну буровых труб включались обратные клапаны с интервалом 27 м для предотвращения пневмоудара в момент подачи воздуха после спуско-подъемных операций.

В табл. 2, 3 приведены, соответственно, характеристики процесса углубления интервала под кондуктор на скважине № 401 и анализ производственной ситуации с помощью модифицированной нами методики [14].

Таблица 2. Характеристика бурения интервала под кондуктор скважины № 401 Куюмбинского месторождения

Table 2. Parameters of drilling down the surface casing interval of well no. 401 at Kuyumbinskoe field

Интервал, м Interval, m	Нагрузка на долото ($W_{\text{доп}}$), кН Weight on bit (W_{bit}), kN	Частота вращения долота (n), об/мин Bit rotation speed (n), rpm	Подача воздуха ($Q_{\text{воз}}$), м ³ /мин Air supply (Q_{air}), m ³ /min	Давление на компрессоре ($P_{\text{ком}}$), МПа Pressure at the compressor (P_{comp}), MPa	Механическая скорость бурения ($V_{\text{мех}}$), м/ч Penetration rate (V_{pen}), m/h	Время проходки ($t_{\text{бур}}$), ч Net drilling time (t_{drill}), h
34–44	20	20	76	1,3	10	1
42–66	20–30	20	76	1,7	11	2,2
60–66	5	20	76	1,7	–	1,5
66–75	20–30	20	76	1,7	9	1
70–75	5	20	76	1,7	–	1,5
75–90	20–30	20	76	1,7	10–11	1,5
85–90	5	20	76	1,7	–	1,5
94–118	≈40	20	76	1,8–1,9	До 30 м/ч	1

Таблица 3. Анализ производственной ситуации на скважине № 401 на основе модифицированной методики

Table 3. Analysis of operational situation at well no. 401, based on the modified method

Характеристика объекта исследования Description of the object	Расчетное давление при анализируемых коэффициентах аэродинамического трения, МПа Calculated pressure at various aerodynamic friction, MPa				
	$\lambda_{\text{в}}$	$\lambda_{\text{л}}$	$\lambda_{\text{Хэ}}$	$\lambda_{\text{Х}}$	$\lambda_{\text{А}}$
Выкидная линия Flow line	0,1037	0,1013	0,1054	0,1053	0,1055
Забой направления 35 м Surface casing bottom hole 35 m	0,1041	0,1013	0,1061	0,1059	0,1062
Забой 94 м Bottom hole 94 m	0,1042	0,099	0,1087	0,1079	0,1086
Компрессор Compressor	1,577	1,55	1,66	1,59	1,61

Подача воздуха была принята равной 76 м³/мин, объемная концентрация водопритока в потоке воздуха принята в соответствии с геологическими условиями Куюмбинского месторождения и составила $2,8 \cdot 10^{-3}$, объемная концентрация горной породы – $1,34 \cdot 10^{-4}$. Забой 94 м принят как достигнутый в штатном режиме на скважине во время опытно-промышленных работ.

Air supply was taken at 76 m³/min, volumetric concentration of water influx in the air flow was taken at $2,8 \cdot 10^{-3}$, based on the geological conditions for Kuyumbinskoe field, volumetric concentration of rock – $1,34 \cdot 10^{-4}$. Bottom hole at the depth of 94 m was taken as actual, reached normally during the pilot work at the well.

Анализ данных табл. 2, 3 показывает, что наибольшую точность расчетов воздухообеспечения скважины обеспечивает использование коэффициента $\lambda_{\text{Хэ}}$. Кроме того, необходимо отметить, что фактически реализованный на скв. № 401 расход воздуха в циркуляционной системе недостаточен для эффек-

тивного удаления выбуренной породы с забоя скважины. Для оценки необходимого расхода воздуха нами проведены расчеты с использованием основных положений методики Б.Б. Кудряшова и теории пневмотранспорта и построены математические модели воздухообеспечения для условий ведения работ на Куюмбинском нефтяном месторождении. Значения расходов $Q_{\text{возд}}=166 \text{ м}^3/\text{мин}$ и $Q_{\text{возд}}=216 \text{ м}^3/\text{мин}$ были получены для скорости витания частиц $15,25 \text{ м/с}$ и транспортной скорости потока $19,2 \text{ м/с}$, соответственно [14].

Таким образом, модифицированная методика расчета воздухообеспечения циркуляционной системы разведочных скважин для условий Куюмбинского месторождения позволяет:

- 1) повысить точность расчета требуемого рабочего давления на компрессоре до 98 %;
- 2) учесть наличие продуктов разрушения забоя в потоке воздуха благодаря использованию характеристик кинематической вязкости;
- 3) аналитически оценить закономерности изменения рабочего давления на забое скважины при повышении расхода воздуха на компрессоре до эффективных значений.

Разработка критерия расходной массовой концентрации шлама

Проведение промышленных испытаний технологии ударно-вращательного бурения на эксплуатационных скважинах Куюмбинского месторождения позволило выявить важность известного параметра расходной массовой концентрации шлама для стабильности процесса углубки скважины [9]:

$$\mu = G_{\text{п}}/G,$$

$$G = \frac{Q \cdot p_0}{R \cdot T},$$

$$G_{\text{п}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{БК}}^2 \cdot \rho \cdot V_{\text{мех}}}{4},$$

где μ – расходная массовая концентрация шлама в потоке воздуха; $G_{\text{п}}$ – удельная масса выносимой горной породы, кг/с; G – массовый расход воздуха, нагнетаемого в скважину, кг/с; Q – расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; p_0 – атмосферное давление, Па; R – газовая постоянная воздуха, Дж/кг \times °К; T – средняя температура воздуха в скважине, К; $D_{\text{БК}}$ – диаметр формируемого ствола скважины, м; ρ – средняя плотность горных пород, кг/м 3 ; $V_{\text{мех}}$ – планируемая механическая скорость бурения интервала под направление, м/с.

Анализ результатов производственного эксперимента на скважине № 401 Куюмбинского месторождения выявил увеличение расходной массовой концентрации (РМК) забойной примеси в потоке воздуха с 2 до 3,1 при росте $V_{\text{мех}}$ с 10 до 30 м/ч и неизменном расходе воздуха $Q_{\text{возд}}=76 \text{ м}^3/\text{мин}$. При этом через час ведения работ по углублению в таких условиях был получен рост давления на $1,5 - 2 \text{ кгс/см}^2$, послуживший первым признаком прихвата/прижога КНБК. При бурении интервала под кондуктор скважины № 404 значение показателя РМК шлама в потоке воздуха составило 1,86. Время углубки при этом –

8,5 часов, время продувки без углубления – 2 часа. Для аналогичного интервала скважины № 405 значение показателя РМК шлама в потоке воздуха составило 2,04. Бурение при этом составило 6 часов, время продувки без бурения – 2 часа. Критерием безаварийности в данном случае нами предлагается использовать значение показателя расходной массовой концентрации продуктов разрушения забоя скважины в потоке очистного агента, полученное эмпирически при определенных значениях механической скорости бурения, а также соотношениях времени углубления и продувки забоя.

На рис. 1 приведен график, отображающий закономерность распределения значений критерия РМК от механической скорости и времени углубления.

Результаты проведенных ранее исследований говорят о невозможности корректного учета влияния значения РМК шлама на величину рабочего давления на компрессоре при проектировании воздухообеспечения циркуляционной системы [1–3].

В условиях проведения опытно-промышленных работ (ОПР) стабильность процесса бурения наблюдалась при значении РМК = 2 и соотношении времени углубления и продувки 6,5 ч/3,5 ч.

Систематизация полученных данных дает возможность ввести критериальную оценку стабильности процесса углубки интервалов скважин под кондуктор на исследуемом месторождении на основе поддержания значения показателя РМК равным 2, соотношения времени бурения и чистки забоя при поэтапном увеличении расхода воздуха и механической скорости бурения.

Оптимальное регулирование параметров режима бурения $V_{\text{мех}}$ и $Q_{\text{возд}}$ при проходке интервала под кондуктор скважины № 401 Куюмбинского месторождения представлено на рис. 2.

Методика расчета аэродинамических давлений с учетом пластовых условий

Достижения в области повышения надежности конструкций погружных пневмоударников и компрессорном машиностроении сделали возможным обеспечение повышенного расхода воздуха при очистке забоя скважины. Вместе с тем возросли риски возникновения ситуации пневморазрыва пласта. Иницирование пневморазрыва может привести к различным негативным последствиям, таким как скапливание продуктов разрушения в призабойной зоне, вторичное измельчение шлама, грифоны.

А.С. Бронзов, В.И. Тиль, М.Н. Климентов [15, 16] отмечают факты бурения геолого-разведочных скважин с продувкой воздухом в отсутствие циркуляции на устье и, как следствие, выноса шлама. В ряде случаев отсутствие выноса породы может оказывать на стабильность углубки положительное влияние. При значительной трещиноватости горных пород происходит коагуляция трещины, уменьшается целостность ствола скважины и снижается риск возможных поглощений тампонажного раствора при заканчивании секции.

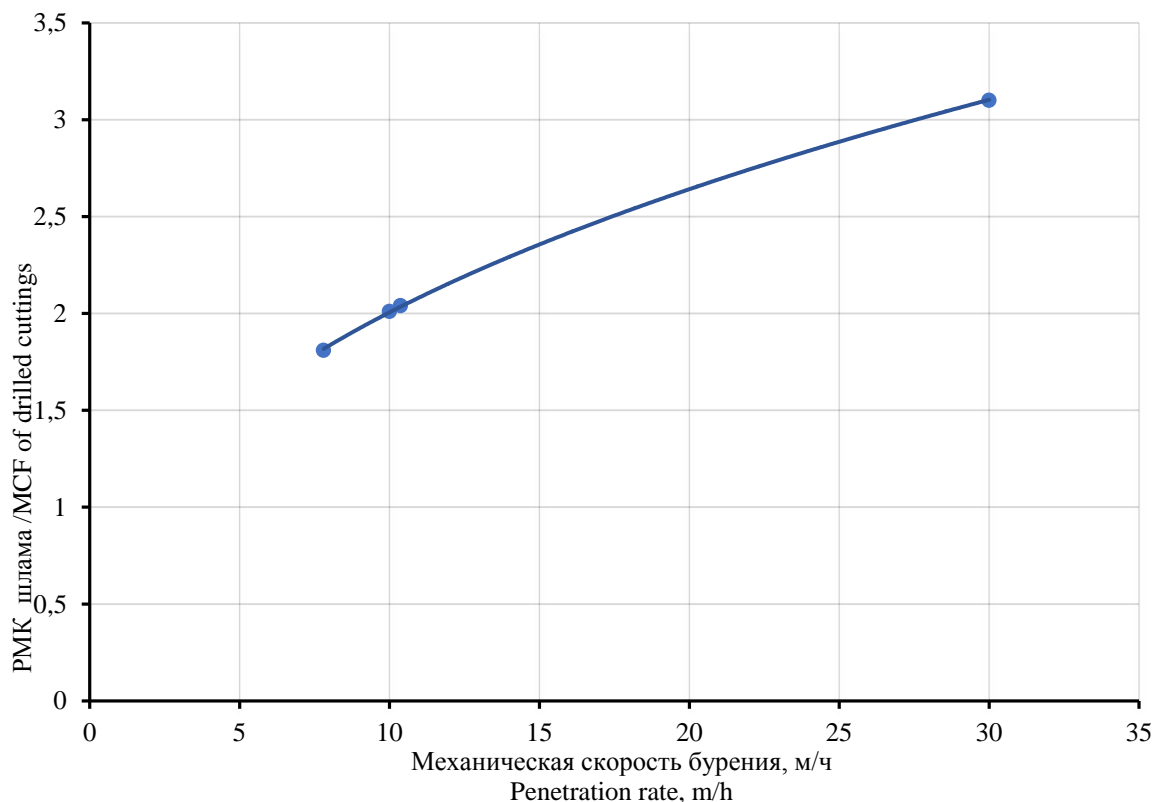


Рис. 1. Значения расходной массовой концентрации при соответствующих $V_{\text{мех}}$ на скважинах № 401, 404, 405 Куюмбинского нефтяного месторождения

Fig. 1. Values of mass concentration in the flow and corresponding values of V_{pen} in wells no. 401, 404, 405 of Kuyumbinskoe oilfield

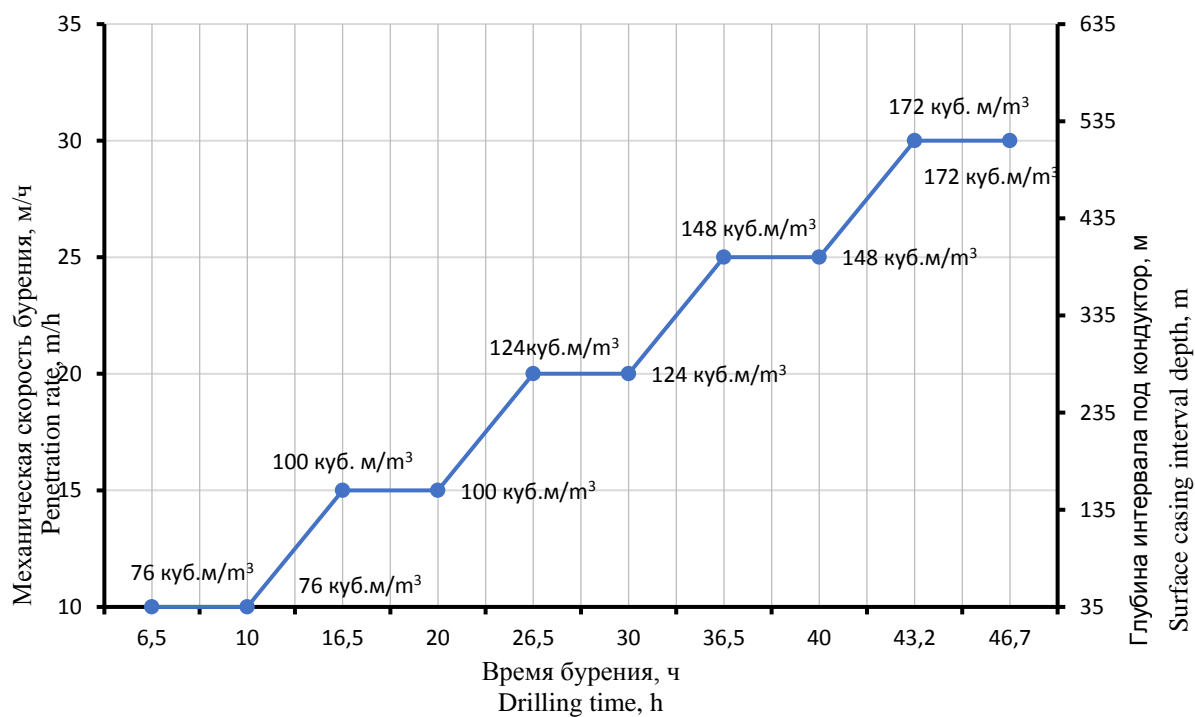


Рис. 2. Регулирование $V_{\text{мех}}$ и $Q_{\text{возд}}$ при постоянном значении критерия $PMK=2$ и соотношения времени углубления и продувки

Fig. 2. Control of V_{pen} and Q_{air} at constant $MCF=2$ and the ratio of penetration time and blow-down

Предлагаемые методики расчета воздухообеспечения [9, 11, 17–19] позволяют рассчитывать параметры работы циркуляционной системы, не учитывая при этом давлений в системе скважина – пласт. Зависимость для расчета требуемого расхода воздуха, предлагаемая в методике Б.Б. Кудряшова [9], не учитывает сменяемость горных пород по разрезу скважины.

$$Q_{\text{возд}} = \left(K \cdot K_1 \cdot \frac{\pi(D_{\text{СКВ}}^2 - D_{\text{БК}}^2)}{4} \right) \cdot V,$$

где $Q_{\text{возд}}$ – расход воздуха, м³/с; K – коэффициент, учитывающий уменьшение подъемной силы воздуха вследствие потерь давления в кольцевом пространстве; K_1 – коэффициент неравномерности скорости из-за наличия каверн; V – скорость восходящего потока воздуха, м/с; $D_{\text{СКВ}}$ – диаметр скважины с учетом его увеличения вследствие разработки, м; $D_{\text{БК}}$ – диаметр буровых труб, м.

На этом фоне приобретает важность решение задачи по созданию научной основы проектных расчетов циркуляционной системы скважины, позволяющих предотвратить искусственный пневморазрыв горных пород.

Базой являются предложенные Б.Б. Кудряшовым формулы для определения аэродинамических сопротивлений [9].

Для кольцевого пространства:

$$P = \frac{\sqrt{p_1^2 + \lambda \cdot (1 + K_{\Gamma} \cdot \mu) \cdot a \cdot l + p_1 \cdot (1 + \mu) \cdot b \cdot l}}{1 - (1 - \mu) \cdot b \cdot l},$$

где p_1 – давление на предыдущей ступени расчета, Па; μ – расходная концентрация шлама в потоке воздуха; K_{Γ} – безразмерный коэффициент Гастерштадта; l – текущая координата для восходящего потока от устья к забою, м; λ – коэффициент аэродинамического трения; a , b – выражения, применяемые с целью эргономики расчетов:

$$a = \frac{G^2 \cdot R \cdot T}{D_{\text{ВЫХ}} \cdot F^2},$$

$$b = \frac{g \cdot \sin \beta}{2 \cdot R \cdot T'}$$

где $D_{\text{ВЫХ}}$ – внутренний диаметр канала движения воздуха, м; G – массовый расход воздуха, кг/с; R – газовая постоянная воздуха, Дж/кг×°К; F – площадь сечения канала, м²; g – ускорение свободного падения, м/с²; β – зенитный угол скважины, град.

Также при нисходящем движении потока воздуха по буровой колонне:

$$p_{\text{БК}} = \frac{\sqrt{p_1^2 + \lambda \cdot a \cdot \left(l + \frac{D_{\text{ЭФ}} \cdot \xi \cdot n}{\lambda} \right) - p_1 \cdot b \cdot l}}{1 + b \cdot l},$$

где n – количество замковых соединений в буровой колонне; ξ – коэффициент местного сопротивления в соединении бурового инструмента, определяющийся в свою очередь по формуле Б.С. Филатова:

$$\xi = a' \cdot \left[\left(\frac{D_{\text{ЭФ}}}{d_3} \right)^2 - 1 \right]^2,$$

где a' – опытный коэффициент для муфтово-замковых соединений принимается равным 2; d_3 – наименьший диаметр суженной части соединения, м.

Сущность предлагаемых дополнений заключается в поинтервальном расчете аэродинамических давлений на основе стратиграфических границ разреза и значений эффективного расхода воздуха (рис. 2). Далее определяются граничные условия: пластовое давление, давление гидроразрыва, что позволяет оценить расчетное рабочее давление. Принимается во внимание и возможность регулирования рабочего давления на компрессоре. Необходимо заметить, что современные дожимные компрессорные установки позволяют регулировать давление в скважине с достаточно высокой точностью.

Результатом совершенствования методики расчета воздухообеспечения в данном аспекте являются сформулированные нами рекомендации регулирования темпа приращения рабочего аэродинамического давления.

Моделирование такого регулирования для скважины № 401 Куюмбинского месторождения приведено в табл. 4 и на рис. 3. Лимитирующими факторами служит условие репрессии на пласт и предотвращение пневморазрыва.

Таблица 4. Численные результаты расчета $P_{\text{раб}}$ для скважин Куюмбинского нефтяного месторождения

Table 4. Numerical results of P_{op} calculation for the wells at Kuyumbinskoe field

Глубина интервала, м Interval depth, m	Пластовое давление, Formation pressure,	Фактические давление гидроразрыва Actual hydrofracturing pressure	Расчетное рабочее давление Calculated operating pressure
50	4,25	8,2	8
100	8,5	16,4	15,9
105	8,925	17,22	16
150	12,75	21,45	16,24
200	17	28,95	20,51
250	21,25	36,45	25,1
300	25,5	43,95	27,33
350	29,75	51,45	31,88
400	34	58,95	36,43
450	38,25	66,45	41,7
500	42,5	73,95	45,54
550	46,75	81,45	50,1

Заключение

Анализ результатов опытно-промышленных работ ударно-вращательного бурения интервалов скважин под кондуктор в технико-геологических условиях Куюмбинского месторождения позволил:

- 1) определить оптимальную зависимость для расчета коэффициента аэродинамического трения в методике Б.Б. Кудряшова на основе учета кинематической вязкости продуктов разрушения забоя, а также шероховатости обсаженного и открытого ствола скважины;
- 2) выявить характер изменения давления на компрессоре при увеличении расхода воздуха скважинных в условиях Куюмбинского месторождения;

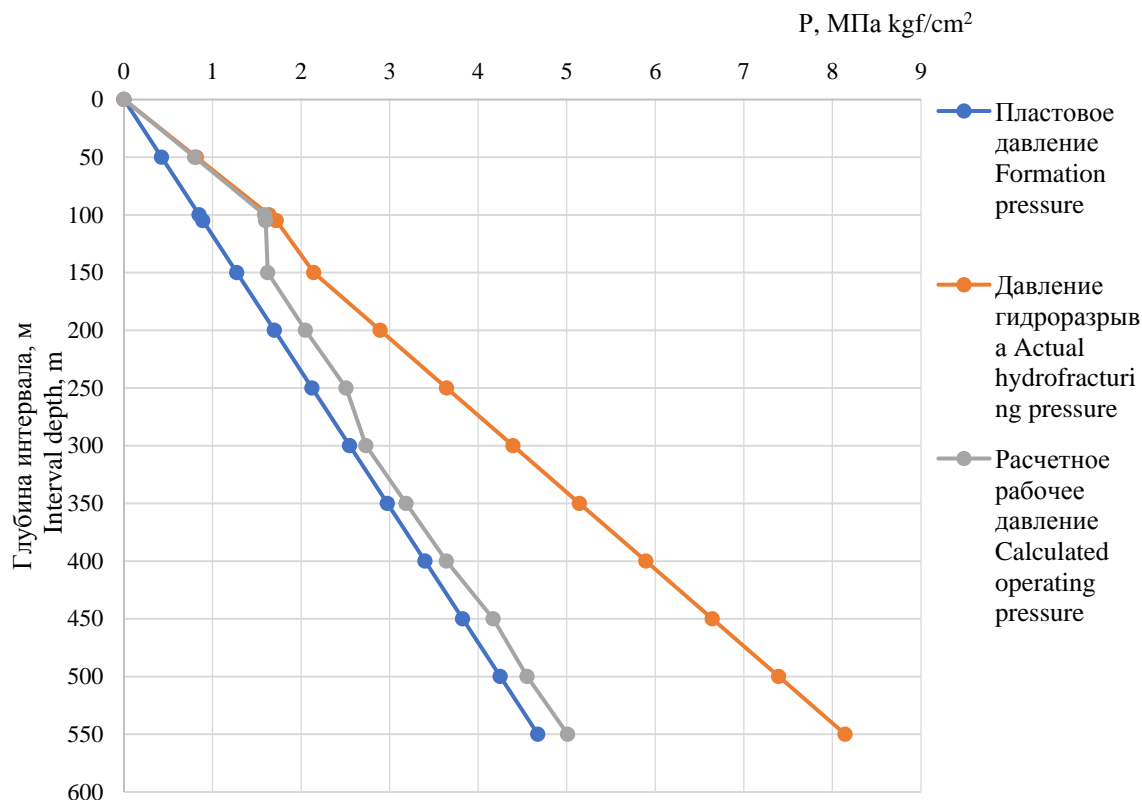


Рис. 3. Совмещенный график давлений с условием регулирования приращения $P_{\text{раб}}$ для секции кондуктора скважины № 401 Куюмбинского месторождения

Fig. 3. Overlay of pressures in the context of P_{op} increase control for the surface casing interval in well no. 401 of Kuyumbinskoe field

- 3) сформулировать критериальную оценку безаварийности углубки скважины на основе поддержания оптимального значения расходной массовой концентрации шлама, предотвращая тем самым прихватоопасную ситуацию;
 - 4) разработать основы методики регулирования параметров работы компрессорного оборудования и механической скорости проходки скважин с целью предотвращения разрыва горных пород.
- Выполненный комплекс исследований и сформулированные дополнения к методике расчета возду-

снабжения позволяют сделать шаги в применимости известной методики расчета воздухообеспечения скважины в новых технико-технологических условиях, тем самым расширив границы эффективности применения ударно-вращательного бурения при строительстве эксплуатационных и разведочных скважин на месторождениях углеводородов Восточно-Сибирского региона, и могут служить научно-методической основой при проектировании программ работ в конкретных условиях хозяйствования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бузанов К.В., Борисов К.И. Обоснование и расчет параметров оборудования и распределения аэродинамических давлений при реализации пневмоударного бурения в геологических условиях Чаяндинского месторождения // Вестник ассоциации буровых подрядчиков. – 2015. – № 4. – С. 9–15.
2. Бузанов К.В., Борисов К.И. Технология бурения пневмоударником как способ предупреждения катастрофических поглощений на Дулисьминском месторождении // Инженер-нефтяник. – 2014. – № 4. – С. 28–31.
3. Бузанов К.В. Строительство вертикальных секций скважин с опережением в условиях Восточно-Сибирского региона с применением технологии ударно-вращательного бурения и очисткой забоя воздухом // Бурение и нефть. – 2017. – № 1. – С. 25–32.
4. Pletcher J., Scarr A. Application of air percussion drilling improves drilling efficiency in horizontal sandstone wells // Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition held. – Florence, Italy, 19–22 September 2010. – P. 44–53.
5. Zhu H. Influence of relevant parameters on hole cleaning and pipe string erosion // Society of Petroleum Engineers Drilling Oil and Gas India Conference and Exhibition. – New Delhi, 20–22 January 2010. – P. 76–85.
6. Ванг Х. Итоги применения пневмоударного бурения в Керуй Групп // Нефть и Газ: 14 Международная выставка. – М., 30 июня 2017. – С. 61–68.
7. Земерев Е.С. Критическое истечение сыпучих материалов в пневмотранспортной системе подачи порошков: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2017. – 116 с.
8. Кондратьев А.С., Ньа Т.Л. Основы расчета гидродинамических параметров при движении жидкости с монодисперсными крупными твердыми частицами в вертикальных трубах // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 9. – С. 35–42.
9. Кудряшов Б.Б., Кирсанов А.И. Бурение разведочных скважин с применением воздуха. – М.: Недра, 1990. – 263 с.

10. Malloy K.P. Air drilling in the presence of hydrocarbons: a time for pause // International Association of Drilling Contractors. Society of Petroleum Engineers Drilling Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition. – Джакарта, Индонезия, 28–29 March 2007. – P. 97–103.
11. Air and gas drilling field guide / W.C. Lyons, B. Guo, R.L. Graham, G.D. Hawley. – UK, Oxford OX2 8DP: British Library Cataloguing-in-Publication Data, 2009. – 776 p.
12. Maranuk C. Unique system for underbalanced drilling using air in the Marcellus Shale // Society of Petroleum Engineers Eastern Regional Meeting. – Charleston, USA, 21–23 October 2014. – P. 87–93.
13. Марон В.И. Гидравлика двухфазных потоков в трубопроводах. – СПб.: Изд-во «Лань», 2012. – 254 с.
14. Бузанов К.В. Разработка и совершенствование технологии безаварийного бурения интервалов под направления и кондукторы разведочных и эксплуатационных скважин на месторождениях Восточно-Сибирского региона (на примере Куюмбинского нефтяного месторождения): дис. ...канд. техн. наук. – Томск, 2018. – 139 с.
15. Бронзов А.С. Бурение скважин с использованием газообразных агентов. – М.: Недра, 1989. – 288 с.
16. Климентов М.Н., Тиль В.И. Сооружение скважин ударно-вращательным способом бурения. – М.: Недра, 1986. – 95 с.
17. Min Lu. Experimental and computational study of two-phase slug flow: a thesis submitted for degree of Doctor of Philosophy. – London, 2015. – 346 p.
18. Vieira P. Minimum air and water flow rates required for effective cuttings transport in high angle and horizontal wells // International Association of Drilling Contractors. Society of Petroleum Engineers Drilling Conference. – Dallas, 26–28 February 2002. – P. 32–40.
19. Liu H. Experimental study on carrying capacity of cuttings in annulus for air/mist drilling // Society of Petroleum Engineers. Ico TA Coiled Tubing Roundtable. – Houston, 7–8 March 2001. – P. 130–139.

Поступила 18.06.2019 г.

Информация об авторах

Бузанов К.В., кандидат технических наук, ассистент отделения нефтегазового дела Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Борисов К.И., доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой бурения нефтяных и газовых скважин Сибирского федерального университета.

UDC 622.24

IMPROVEMENT OF BOTTOM HOLE AIR CLEANING TO REDUCE ACCIDENT RATE OF WELL DRILLING AT KUYUMBINSKOE OILFIELD

Kirill V. Buzanov¹,
byzanovaltay@mail.ru

Konstantin I. Borisov²,
kibor1956@gmail.com

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Siberian Federal University,
79/10, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russia.

The relevance of the research. The problem of washing fluid absorption during the construction of upper sections of production and exploration wells in the fields of Eastern Siberia is not new and is one of the main reasons for low rate of commercial drilling speed in the region. In addition, penetration of trouble intervals of wells requires considerable time and material costs. Air drilling is one of the promising solutions to the problem of absorption of washing liquid. The air drilling technique has been known for more than a hundred years, however, a new horizons of its application are opening up by the reason of the compressor's engineering progress. At the same time, it is necessary to adapt the existing methods of calculating air supply to the new mining and geological conditions for this technology. The paper introduces the main results of practical research in air cleaning of bottom hole during the drilling of the surface casing interval in the geological and economic context of Kuyumbinskoe oilfield.

The aim of the research is to study and develop a new methodology for trouble-free air drilling of intervals for directions and conductors in the construction cycle of production and exploration wells in fields in Eastern Siberia.

Object: the B.B. Kudryashov's method of calculating the air supply of the circulation system of a well.

Methods: combination of theoretical studies, mathematical modeling based on the basic principles of the theory of pneumatic transport, movement of dispersed particles in a carrier air stream and pilot works in real production conditions.

Results. The authors have stated the regulations that allow modifying the computational methodology for air supply to the well circulating system, the use of which will help prevent emergency situations at the design stage.

Key words:

Air cleaning of bottom hole, aerodynamic drag, B. Kudryashov's method, catastrophic loss of circulating fluid, control over drilling technique, aerodynamic pressure in a well.

REFERENCES

1. Buzanov K., Borisov K. Rationale and calculation of equipment parameters, distribution of aerodynamic pressures when using air percussion drilling in the geologic conditions of Chayandinskoye field. *Drilling Contractors Association's Herald*, 2015, no. 4, pp. 9–15. In Rus.
2. Buzanov K., Borisov K. Air percussion drilling as a way to prevent catastrophic fluid loss at Dulisminskoye field. *Petroleum Engineer*, 2014, no. 4, pp. 28–31. In Rus.
3. Buzanov K. Advanced drilling of vertical well intervals in the conditions of East Siberia using percussion rotary drilling and air cleaning of bottom hole. *Drilling and Oil*, 2017, no. 1, pp. 25–32. In Rus.
4. Pletcher J., Scarr A. Application of air percussion drilling improves drilling efficiency in horizontal sandstone wells. *Society of Petroleum Engineers Drilling Annual Technical Conference and Exhibition*. Florence, Italy, 19–22 September 2010. pp. 44–53.
5. Zhu H. Influence of relevant parameters on hole cleaning and pipe string erosion. *Society of Petroleum Engineers Oil and Gas India Conference and Exhibition*. New Delhi, 2010, 20–22 January. pp. 76–85.
6. Wang H. Itogi primeneniya pnevmoudarnogo bureniya v Kerui Grupp [Results of applying pneumatic percussion drilling in the Kerui group]. *Naft i gaz: 14 Mezhdunarodnaya vystavka* [14th International Oil and Gas Exhibition]. Moscow, 2017, June 30. pp. 61–68.
7. Zemerev E.S. *Kriticheskoe istechenie syuchikh materialov v pnevmotransportnoy sisteme podachi poroshkov*. Dis. Kand. nauk [Critical flow of bulk materials in the pneumotransport powder supply system. Cand. Diss.]. Perm, 2017. 116 p.
8. Kondratyev A.S., Nya T.L. Basis of calculation of hydrodynamic parameters of fluid movement with monodispersed large solids in vertical pipes. *Fundamental Research*, 2016, no. 9, pp. 35–42. In Rus.
9. Kudryashov B.B., Kirsanov A.I. *Burenie razvedochnykh skvazhin s primeneniem vozdukha* [Drilling of exploration wells using air]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 263 p.
10. Malloy K.P. Air drilling in the presence of hydrocarbons: a time for pause. *International Association of Drilling Contractors. Society of Petroleum Engineers Drilling Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition*. Jakarta, Indonesia, 28–29 March 2007. – P. 97–103.
11. Lyons W.C., Guo B., Graham R.L., Hawley G.D. *Air and gas drilling field guide*. UK, Oxford OX2 8DP, British Library Cataloguing-in-Publication Data, 2009. 776 p.
12. Maranuk C. Unique system for underbalanced drilling using air in the Marcellus Shale. *Society of Petroleum Engineers Eastern Regional Meeting*. Charleston, USA, 2014, 21–23 October. pp. 87–93.
13. Maron V. *Gidravlika dvukhfaznykh potokov v truboprovodakh* [Hydraulics of two-phase flows in pipelines]. St.-Petersburg, Lan Publ. house, 2012. 254 p.
14. Buzanov K. *Razrabotka i sovershenstvovanie tekhnologii bezavariynogo burenia intervalov pod napravlenie i konduktory razvedochnykh i ekspluatatsionnykh skvazhin na mestorozhdeniyakh Vostochno-Sibirskogo regiona (na primere Kuymbinskogo neftyanogo mestorozhdeniya)*. Dis. Kand. nauk [Development and improvement of accident-free technology for drilling of conductor and surface casing intervals for exploration and production wells in East-Siberia (case study: Kuyumbinskoe oilfield). Cand. Diss.]. Tomsk, 2018. 139 p.
15. Bronzov A.S. *Burenie skvazhin s ispolzovaniem gazoobraznykh agentov* [Drilling wells with gaseous agents]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 288 p.

16. Klimentov M., Til V. *Sooruzhenie skvazhin udarno-vrashchatelnym sposobom bureniya* [Percussion rotary drilling of wells]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 95 p.
17. Min Lu. *Experimental and computational study of two-phase slug flow*: a thesis submitted for degree of Doctor of Philosophy. London, 2015. 346 p.
18. Vieira P. Minimum air and water flow rates required for effective cuttings transport in high angle and horizontal wells. *International Association of Drilling Contractors. Society of Petroleum Engineers Drilling Conference*. Dallas, 2002, 26–28 February. pp. 32–40.
19. Liu H. Experimental study on carrying capacity of cuttings in annulus for air/mist drilling. *Society of Petroleum Engineers. Ico TA Coiled Tubing Roundtable*. Houston, 2001, 7–8 March. pp. 130–139.

Received 18.06.2019

Information about the authors

Kirill V. Buzanov, Cand. Sc., assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Konstantin I. Borisov, Dr. Sc., associate professor, head of department, Siberian Federal University.

УДК 622.323'156(571.16)

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СПЕЦИФИКА БУРОВЫХ ШЛАМОВ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТОВ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Климова Алена Андреевна¹,
klimovalena777@mail.ru

Язиков Егор Григорьевич¹,
yazikoveg@tpu.ru

Шайхиев Ильдар Рафаилович²,
ildar.shaihiev@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Общество с ограниченной ответственностью «Газпромнефть-Восток»,
Россия, 634045, г. Томск, ул. Нахимова, 13а, стр. 1.

Актуальность исследования обусловлена слабой изученностью минералогического, элементного состава и токсичности буровых шламов, образованных в процессе строительства скважин на нефтяных месторождениях.

Цель: выявить минералогическую и геохимическую специфику буровых шламов, определить наличие токсичности данного вида отхода с использованием современных методов исследований.

Методы: рентгеновская порошковая дифрактометрия; масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой; сканирующая электронная микроскопия; биотестирование.

Результаты. В пробах бурового шлама исследуемых нефтяных месторождений Томской области определены общие минералы – кварц, альбит, мусковит и кальцит, что указывает на схожий состав исходных вмещающих пород. В буровых шламах выделяется следующая геохимическая специализация, выраженная в повышенном концентрировании таких химических элементов, как Pb, Zn, Cu. Главным образом, элементы относятся к тяжелым металлам I, II и III класса опасности. Величина суммарного показателя загрязнения показывает, что большинство проб шлама относится к низкой степени загрязнения. Однако для образцов с действующих шламовых амбаров характерна средняя степень загрязнения. Выявленные минеральные фазы представлены оксидами железа, свинца, цинка, сульфидом железа, сульфатом бария. Были обнаружены частицы железа и свинца сферической формы. В целом пробы бурового шлама не оказывают токсического действия на тест-объекты: *Daphnia magna*, *Scenedesmus quadricauda*, *Drosophila melanogaster*. В то же время пробы с эксплуатируемых амбаров оказывают влияние на тест-организм *Daphnia magna*. Таким образом, исследуемые пробы бурового шлама относятся к малоопасным, практически неопасным отходам и не являются потенциально токсичными.

Ключевые слова:

Буровой шлам, шламовый амбар, кустовая площадка, нефтяное месторождение, элементный состав, тяжелые металлы, биотестирование.

Введение

Строительство нефтяных и газовых скважин является экологически опасным для объектов природной среды, что отмечается в работах различных авторов [1–3]. Наибольшую опасность при проведении буровых работ при строительстве скважин представляет загрязнение территории буровыми отходами, химическими реагентами и продукцией скважин [2, 3]. Влияние объектов нефтегазового комплекса подробно рассмотрено в аналитическом обзоре [4], в котором приведена информация о загрязняющих веществах, подлежащих контролю, и организации мониторинга за состоянием природной среды на территории нефтепромысла.

Основным хранилищем отходов бурения на этапе строительства объектов нефтепромысла являются шламовые амбары, многие из которых размещены в водоохранных зонах и представляют серьезную угрозу речным, озерным и болотным экосистемам [2, 5]. Влияние шламовых амбаров как источника поступления сточных вод и отходов бурения в окружающую среду, в частности в болотные экосистемы, рассмот-

рено в работах [2, 6, 7]. Установлено, что влияние на болотные экосистемы незначительно при условии правильной эксплуатации шламовых амбаров [6], за исключением вариантов с нарушением обваловок амбаров и аварийных ситуаций, при которых происходит перелив и утечка буровых сточных вод [2].

Цель исследования – выявление минералогической и геохимической специфики буровых шламов, определение наличия токсичности данного вида отхода с использованием современных методов исследований. Объект исследования – отходы бурения (буровой шлам), образованные при бурении эксплуатационных скважин на территории кустовых площадок № 7, 8, 3 Шингинского и Южно-Шингинского месторождений, расположенных на территории Парабельского и Каргасокского районов Томской области (рис. 1).

Химические характеристики буровых отходов в значительной степени зависят от исходного состава пород, а также от технологии бурения, а именно от типа буровых растворов и метода бурения. Таким образом, отходы бурения от каждой буровой деятельности имеют свои химические характеристики [8].

Присутствие углеводородов и тяжелых металлов в отходах бурения представляет собой проблему для природной среды, поскольку тяжелые металлы не подвергаются биологическим процессам и сохраня-

ются в окружающей среде. Помимо факторов окружающей среды, интенсивность рассматриваемого процесса определяется формами металлов и типами связей с твердофазными компонентами [9].



Рис. 1. Фрагмент схемы расположения нефтяных месторождений (Шингинское и Южно-Шингинское) в Томской области

Fig. 1. Fragment of location scheme of oil fields (Shinginskoe and Yuzhno-Shinginskoe) in the Tomsk region

Для смазки и охлаждения бурового оборудования, компенсации пластового давления, транспортировки выбуренной породы и решения многих других задач при строительстве скважин применяются буровые растворы [10]. Они представляют собой суспензию твердых веществ, растворенных в жидкости (например, в воде или в нефти) или в жидких эмульсиях с химическими добавками, которые необходимы для изменения их свойств [11]. Состав буровых растворов является сложным и варьирует в широком диапазоне в зависимости от конкретной скважины и таких условий, как температура, давление, геологическое строение, и других факторов. В большинстве буровых растворов присутствуют металлы, концентрации которых могут варьировать в зависимости от состава базовых ингредиентов и добавок. Ряд металлов в буровых растворах и шламах, потенциально токсичных и вызывающих наибольшую озабоченность, включает As, Ba, Cr, Cd, Cu, Fe, Pb, Hg, Ni, Zn. Некоторые из этих металлов преднамеренно добавляются к буровым растворам в виде солей металлов и органо-металлических соединений. Наиболее распространенным металлом в большинстве буровых растворов является Ba (щелочноземельный металл, такой как K

и Sr). Почти весь барий в буровом растворе присутствует за счет барита (BaSO_4), который добавляют в раствор для увеличения его плотности [12].

Буровой шлам представлен частицами измельченной породы, почвы и бурового раствора, а также включает различные эмульгаторы, соли и минеральные добавки [13, 14]. В дополнение к твердым формам буровые шламы содержат небольшое количество жидких и твердых компонентов бурового раствора [15]. Химический состав буровых шламов определяется литологическим составом разбуриваемых пород и реагентами, входящими в состав буровых растворов [12, 16, 17]. Буровые шламы содержат макроэлементы (Ca, Mg, K, Na) и микроэлементы (Cu, Co, Fe, Mn, Zn, As, Al, Ba, Cr, Cd, Pb, Ni, Hg) [8, 18]. Такие элементы, как Ba, Ni, Co, Cu и Zn, могут представлять угрозу, связанную с долговременной подвижностью [19].

По данным различных авторов, содержание тяжелых металлов в буровых шламах варьируется от минимальных до повышенных концентраций [20–24]. Большинство металлов, связанных со шламами, находятся в неподвижных формах в минералах из геологических образований. Так, согласно исследованиям, барий более распространен в буровом растворе, чем в

буровых шламах, как и ожидалось из-за его обилия в буровых растворах, свинец и цинк более распространены в шламах, чем в буровых растворах, что указывает на высокие концентрации в пробуренном пласте или загрязнение шлама обсадными трубами [14].

Исследование [20] показывает, что в буровых шламах содержится большое количество элементов I и II класса опасности, концентрации которых во много раз превышают предельно допустимые концентрации (ПДК) в почве. Авторы делают выводы, что присутствие тяжелых металлов в буровом шламе связано с поступлением из выбуренной породы, что подтверждалось аналитическими методами исследования водного и кислотного экстрактов.

Согласно исследованию [9], тяжелые металлы в буровых шлаках были в основном связаны с органической фракцией. Отмечается, что металлы, присутствующие в буровых шлаках, такие как Cu, Ni, Zn, Cd и Co, связаны в основном с окисляемыми фазами [19]. Кроме того, металлы органической фракции характеризуются долговременной подвижностью, что указывает на необходимость постоянного мониторинга отложений, содержащих отходы этого типа. При исследовании и оценке буровых шламов большое внимание уделяется валовому содержанию токсичных компонентов [25], большая часть металлов находится в нерастворимой форме, как правило, в структуре кристаллической решетки минералов вмещающих пород [14, 21, 25]. Также следует учитывать подвижную форму тяжелых металлов [25, 26], так как исследования показывают, что буровой шлам может стать источником вторичного загрязнения из-за выноса подвижных форм элементов, входящих в состав отхода.

Подводя итог, необходимо отметить, что помимо нефтепродуктов и минерализованных вод в буровом шламе, тяжелые металлы также являются немаловажным критерием, обуславливающим токсичность данного вида отхода.

Геология

Шингинское и Южно-Шингинское месторождения располагаются в локальном поднятии юго-западной части Шингинской мезоседловины [27]. Район приурочен к территории Западно-Сибирской плиты, является элементом Урало-Сибирской платформы. Исследуемая территория расположена в Васюганской нефтегазоносной области (НГО) Пудинского нефтегазоносного района (НГР). Верхнеюрский нефтегазоносный комплекс является основным нефтегазоперспективным комплексом данного района, и наиболее продуктивной является надугольная толща васюганской свиты [28].

Согласно фондовым материалам компании ООО «Газпромнефть-Восток», геологический разрез месторождений сложен образованиями складчатого палеозойского фундамента и мощной толщей осадочных терригенных пород мезо-кайнозойского чехла. Мезозойские отложения представлены породами юрской и меловой систем. Отложения юрской системы

представлены тюменской, васюганской, георгиевской и баженовской свитами.

Методика исследования

В мае и августе 2018 г. был проведен отбор проб бурового шлама из шламовых амбаров двух нефтяных месторождений (Южно-Шингинское и Шингинское). Всего было отобрано 5 объединенных проб бурового шлама с пяти шламовых амбаров. На Шингинском месторождении пробы отбирались из шламовых амбаров на кустовых площадках № 7, 8. На Южно-Шингинском месторождении пробы отбирались с трех амбаров, расположенных на кустовой площадке № 3. Следует отметить, что амбар № 3 на кустовой площадке № 3 и амбар, расположенный на кустовой площадке № 8, на момент отбора проб эксплуатировались. Схема расположения кустовых площадок представлена на рис. 2.

С каждого шламового амбара путем смешения точечных проб, отобранных по периметру амбара, составлялись объединенные пробы. Масса объединенных проб составила не менее 1 кг. Все работы по отбору проб бурового шлама проводились в соответствии с методическими рекомендациями [29]. Подготовка проб буровых шламов к аналитическим исследованиям включала несколько этапов: предварительное просушивание, растирание и просеивание через сито (с диаметром отверстий 1 мм), с последующим истиранием до состояния «пудры» и упаковкой в полиэтиленовые пакетики. Перед исследованием на сканирующем электронном микроскопе пробы бурового шлама были разделены на магнитную, электромагнитную и немагнитную фракции.

Минералогический состав исследуемых проб определялся методом рентгеновской порошковой дифрактометрии на дифрактометре Bruker D2 PHASER в МИНОЦ «Урановая геология» на базе Инженерной школы природных ресурсов НИ ТПУ (консультант Б.Р. Соктоев). Предварительно валовые пробы были измельчены на дробильной установке и растерты в агатовой ступке до пудрообразного состояния. Выделение глинистой составляющей осуществлялась методом отмучивания исходной пробы, с последующим растиранием в агатовой ступке. Изучение минеральных форм элементов в исследуемых буровых шлаках проводилось на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N с ЭДС приставкой Bruker XFlash 4010/5010 в МИНОЦ «Урановая геология» (консультант С.С. Ильенко). Исследование проводилось на электронном микроскопе в режиме высокого вакуума с использованием детектора обратно-рассеянных электронов. Элементный состав определялся методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МС-ИСП) в Химико-аналитическом центре «Плазма», г. Томск.

Полученные результаты были обработаны при помощи программы Microsoft Excel. Кларк концентрации рассчитывался по формуле $Kk = C/Ck$, где Kk – кларк концентрации, C – содержание элемента в пробе, мг/кг; Ck – геохимический кларк земной коры, мг/кг [30].

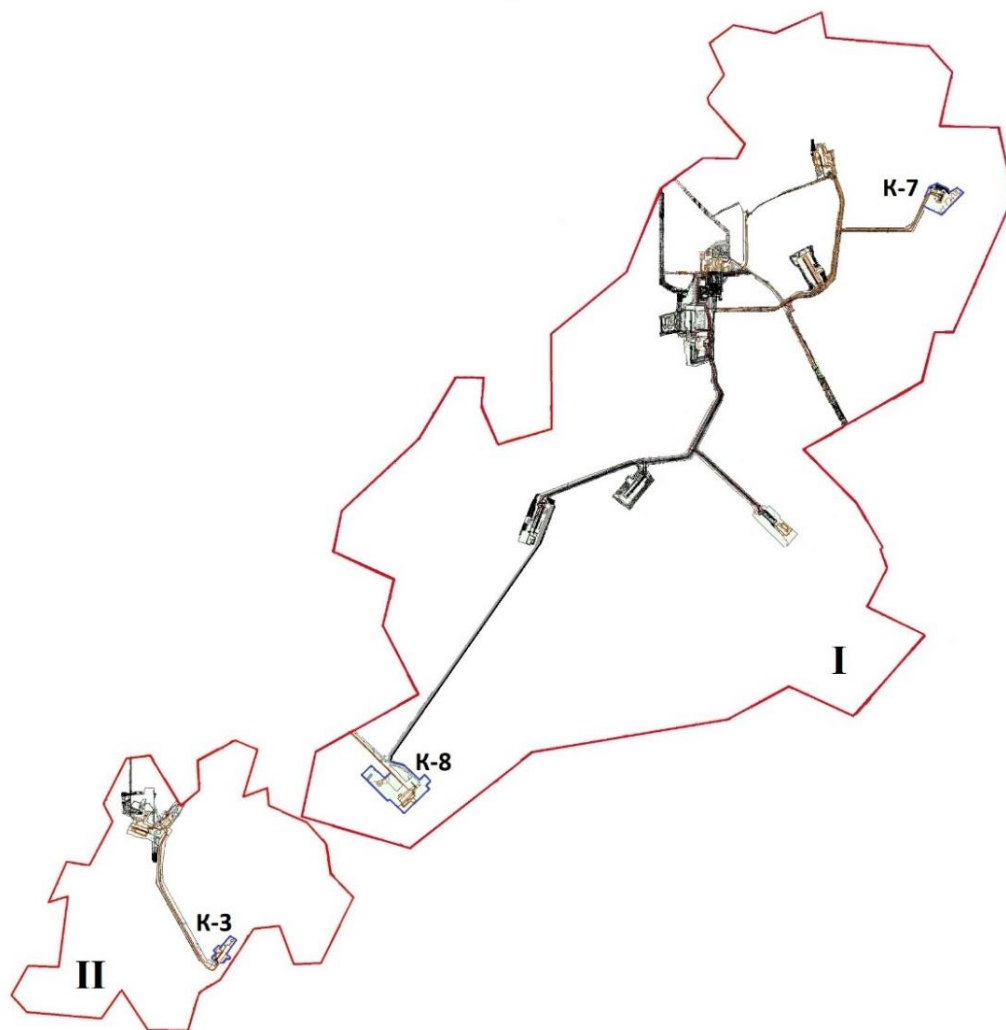


Рис. 2. Схема расположения кустовых площадок на территории нефтяных месторождений I – Шингинское месторождение, II – Южно-Шингинское месторождение; Кустовая площадка № 3 (K-3), Кустовая площадка № 7 (K-7), Кустовая площадка № 8 (K-8)

Fig. 2. Location scheme of well pads within the territory of oil fields: I – Shinginskoe oil field, II – Yuzhno-Shinginskoe oil field; well pad no. 3 (K-3), well pad no. 7 (K-7), well pad no. 8 (K-8)

Также был рассчитан суммарный показатель загрязнения при использовании кларка концентрации (Kk) по формуле:

$$Z_c = \sum_{i=1}^n Kk - (n - 1),$$

где Kk – кларк концентрации *i*-го химического элемента; *n* – число учитываемых аномальных элементов. Суммарный показатель загрязнения разделяется на категории: низкий – менее 16; средний 16–32, высокий 32–128, очень высокий – более 128 [31].

Токсичность и класс опасности бурового шлама определялись методом биотестирования с использованием трех тест-объектов из разных биологических групп. В аккредитованной лаборатории ОГБУ «Облкомприрода» г. Томска (аналитик А.П. Сороченко) по аттестованным методикам был определен класс опасности исследуемых буровых шламов с помощью биотестирования на двух тест-объектах: *Daphnia magna* и *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Breb. Было проана-

лизировано 5 объединенных проб бурового шлама с исследуемых шламовых амбаров на каждом тест-организме.

На базе отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов НИ ТПУ был поставлен эксперимент по определению токсичности исследуемых проб бурового шлама на тест-объекте плодовой мушки *Drosophila melanogaster*. Данный биологический объект позволяет выявить токсичность твердой фазы отхода, в то время как использование *Daphnia magna* и *Scenedesmus quadricauda* отображает токсичность водорастворимых соединений отходов. Важным преимуществом мушки *Drosophila melanogaster*, как тест-объекта, является возможность оценки токсического влияния на следующее поколение на генетическом уровне, через соотношение полов и наличие морфоз.

В процессе биотестирования проб бурового шлама на тест-объекте *Drosophila melanogaster* изучено 5 объединенных проб и просмотрено более 7000 особей.

Для постановки эксперимента взяты дрозофилы двух линий *yellow* (y) и *singed* (sn). При скрещивании самок *yellow* с самцами *singed* в опыте и контроле получены самцы *yellow* и самки дикого типа. Контрольные и опытные группы формировали одновременно и идентично. В дальнейшем следили за развитием нового поколения. Истертые до пудры пробы бурового шлама добавляли в питательную среду для дрозофил в процентном соотношении 0,2 % (буровой шлам) и 99,8 % (чистая среда). При этом процентная величина 0,2 % была установлена после определения летальной дозы (LD50). По окончании эксперимента по оценке токсичности буровых шламов на тест-объект *Drosophila melanogaster* оценивалось соотношение особей обоих полов в пробах бурового шлама по отношению к контролю.

Был рассчитан показатель, обозначаемый греческой буквой χ , возведенной в квадрат, откуда и получивший свое название критерий хи-квадрат. Вычисляется данный показатель по формуле:

$$\chi^2 = \sum \frac{(O - E)^2}{E},$$

где O – фактически наблюдаемое число особей в данном классе; E – теоретически ожидаемое число таких особей; Σ – сумма результатов по всем классам [32]. Оценка степени соответствия проводилась с помощью критерия хи-квадрат и сравнения полученной величины с табличным значением. Существуют значения χ^2 , определяющие границы, ниже которых полученные значения остаются в рамках случайных отклонений. Принято считать допустимой границей вероятность 0,05. Также учитывается число степеней свободы, равное числу классов, уменьшенному на единицу. В нашем случае оно равно 1, т. к. в эксперименте участвует две линии мух. При вероятности значения 0,05 и степени свободы, равной 1, табличное значение равно 3,84, ниже которого теоретическое отклонение от фактического не будет наблюдаться.

Результаты и их обсуждение

По данным рентгенофазового анализа в составе исследуемых проб бурового шлама были определены минералы: кварц, альбит, анортотлаз, мусковит, клинохлор, кальцит. Наличие в каждой пробе общих минералов, таких как кварц, альбит, мусковит и кальцит, указывает на схожий состав исходных вмещающих пород. Кварц и альбит преобладают в составе исследуемых проб бурового шлама с Южно-Шингинского и Шингинского месторождений. Тем не менее, стоит отметить различия в минеральном составе проб. В буровом шламе с амбаров Южно-Шингинского месторождения фиксируется кальцит, в то время как в пробах с Шингинского месторождения присутствует магнезиальный кальцит. Существуют различия в минеральном составе проб с Южно-Шингинского месторождения: в пробе амбара № 3 отсутствует анортотлаз, а в амбаре № 2 не выявлен клинохлор, в то же время в пробе амбара № 1 диагностированы все ранее перечисленные минералы. Результаты анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1. Минералогический состав бурового шлама
Table 1. Mineralogical composition of drill cuttings

Наименование минерала Mineral name	Южно-Шингинское месторождение Yuzhno-Shinginskoe field (3)			Шингинское месторождение Shinginskoe field (2)	
	Кустовая площадка/Well pad				
	3		7	8	
	амбар/sludge pit				
	1	2	3	1	
	содержание/content, %				
Кварц /Quartz	52,7	56,9	45	56,8	63,3
Альбит /Albite	18,6	14,8	27,7	18,7	19,6
Анортотлаз Anorthoclase	10,4	9,1	–	10	9,2
Мусковит Muscovite	6,9	17,5	16,1	6,9	4,4
Клинохлор Klinochlor	6,6	–	5,6	2,8	2,1
Кальцит/Calcite	4,9	1,7	5,6	–	–
Кальцит магнези- альный Magnesite Calcite	–	–	–	4,7	1,5

Примечание: в скобках – количество проб.

Note: the amount of samples is given in brackets.

Глинистая составляющая отделялась методом отмучивания, с последующей фильтрацией через фильтр и анализом полученной фракции на дифрактометре. Результаты рентгенофазового анализа выделенной составляющей представлены в табл. 2.

Таблица 2. Минералогический состав выделенной фракции методом отмучивания
Table 2. Mineralogical composition of the selected fraction by elutriation

Наименование минерала Mineral name	Южно-Шингинское месторождение Yuzhno-Shinginskoe field (3)			Шингинское месторождение Shinginskoe field (2)	
	Кустовая площадка/Well pad				
	3		7	8	
	амбap/sludge pit				
	1	2	3	1	
	содержание/content, %				
Кварц /Quartz	36,2	29,9	32,7	29,4	33,4
Альбит/Albite	21,7	7,3	3,2	7,8	20,5
Мусковит Muscovite	24,0	16,6	17,5	19,0	26,4
Каолинит Kaolinite	10,2	5,6	–	7,1	–
Кальцит/Calcite	7,2	2,5	6,9	6,4	4,9
Цеолит/Zeolite	0,7	0,2	0,2	0,5	–
Иллит/Illite	–	37,9	31,8	29,8	–
Клинохлор Clinocllore	–	–	5,9	–	14,4
Доломит Dolomite	–	–	1,9	–	–
Вермикулит Vermiculite	–	–	–	–	0,3

Примечание: в скобках – количество проб.

Note: the amount of samples is given in brackets.

По данным рентгенофазового анализа в составе отделенной фракции обнаружен глинистый минерал из группы водных силикатов – каолинит, максимальную долю в составе проб занимают слюды, в частности гидрослюды (иллит и вермикулит).

Для обработки данных, полученных в ходе анализа элементного состава, использовалась описательная статистика в программе Microsoft Excel. Следует отметить, что для ряда элементов (Ru, Te, Re, Se, In, Au, Hg) расчет не проводился, т. к. в более 50 % случаев результат анализа был ниже предела обнаружения. В единичных пробах было выявлено содержание селена и золота, так, в пробе амбара № 2 кустовой площадки № 3 Южно-Шингинского месторождения отмечается наличие Se и Au. В пробе амбара кустовой площадки № 8 Шингинского месторождения также установлен Se. При сравнении среднего содержания химических элементов в пробах бурового шлама из амбаров Шингинского и Южно-Шингинского месторождений отмечается близкое содержание элементов, за исключением ряда элементов. Так, в пробах Южно-Шингинского месторождения среднее содержание мышьяка и цинка выше, чем в пробах с Шингинского месторождения.

Для определения геохимической специализации буровых шламов используется кларк верхней части континентальной коры по [30]. Диаграммы для буровых шламов с Шингинского и Южно-Шингинского нефтяных месторождений представлены на рис. 3, 4. В буровых шламах из амбаров Южно-Шингинского месторождения устанавливаются повышенные концентрации Pb, Zn, Cu, Mo, Ag, W, Sb, As. Динамика накопления элементов в буровом шламе хорошо прослеживается на примере таких элементов, как Zn, Pb, Mo, Sb, для которых фиксируется увеличение концентрации от амбара № 1 к амбару № 3. Содержание элементов в шламе исследуемого амбара № 3 выше, чем в шламе остальных амбаров на данном месторождении. Для буровых шламов с амбаров кустовой площадки № 7 Шингинского месторождения устанавливаются повышенные концентрации Pb, Sn, Sb, Ag, As, кустовой площадки № 8 – Pb, Zn, Sb, Cu, Mo, Ag, Be.

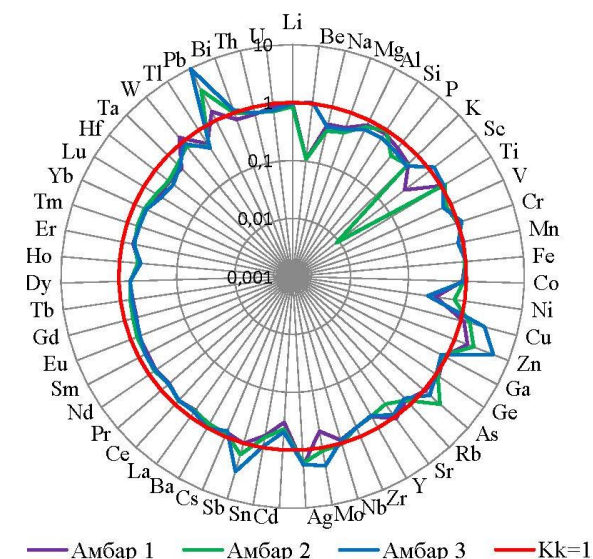


Рис. 3. Геохимическая специализация бурового шлама с Южно-Шингинского месторождения, кустовая площадка № 3

Fig. 3. Geochemical specialization of drill cuttings from the Yuzhno-Shinginskoe oil field, well pad no. 3

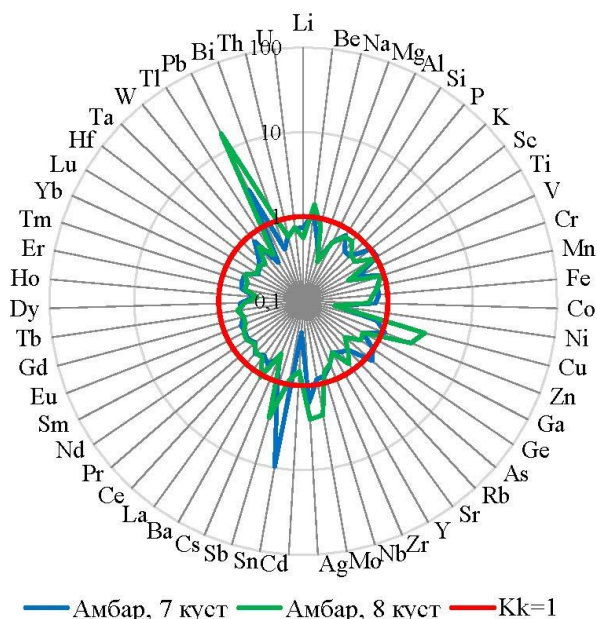


Рис. 4. Геохимическая специализация бурового шлама с Шингинского месторождения, кустовая площадка № 7, 8

Fig. 4. Geochemical specialization of drill cuttings from the Shinginskoe oil field, well pad no. 7, 8

В целом элементный состав исследуемых буровых шламов двух месторождений близок. Выделяется геохимическая специализация, в составе которой преобладают тяжелые металлы. В соответствии с полученными данными, можно разделить тяжелые металлы по степени опасности (ГОСТ 17.4.1.02-83): наиболее опасный I класс – As, Pb, Zn; II класс – Cu, Mo, Sb; III класс – Ba, Mn, W.

В табл. 3 показана специфика накопления химических элементов в буровых шламах. Наибольшая концентрация элементов отмечается в амбаре № 3 Южно-Шингинского месторождения, где выделяются 15 элементов, у которых $Kk > 1$. В то же время накопление химических элементов снижается от эксплуатируемого амбара № 3 к недействующим (амбары № 1, 2). Суммарный показатель загрязнения, рассчитанный по кларку концентрации, показывает, что преимущественно пробы шлама относятся к низкой степени загрязнения, а в отдельных амбарах (Шингинское месторождение, кустовая площадка № 8 и Южно-Шингинское месторождение, кустовая площадка № 3, амбар № 3) – к средней степени загрязнения.

Для установления геохимической специфики исследуемых буровых шламов было решено сравнить ряд элементов с повышенными концентрациями относительно среднего содержания химических элементов в верхней части континентальной коры (Ti, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Mo, Ag, Sn, Sb, Ba, Pb) с такими показателями, как содержание химических элементов в почвах горизонта В, С Васюганской равнины и со средним содержанием химических элементов в осадочных горных породах в целом (табл. 4).

Таблица 3. Кларки концентрации (Кк) химических элементов относительно среднего состава верхней части континентальной земной коры по Н.А. Григорьеву в буровых шламах нефтяных месторождений (Шингинское и Южно-Шингинское)

Table 3. Clarks of concentration of chemical elements relative to the average composition in the upper continental crust by N.A. Grigoriev in drill cutting oil fields (Shinginskoe and Yuzhno-shinginskoe)

Диапазон Range	Химические элементы/Chemical elements				
	Шингинское месторождение Shinginskoe field (2)		Южно-Шингинское месторождение Yuzhno-Shinginskoe field (3)		
	Кустовая площадка/Well pad				
	7	8	3		
	амбap/sludge pit				
	1		2	3	
>3	Sn,	Pb, Cu	–	Pb	Pb, Sb, Zn
2–3	Pb	Sb, Ag, Mo, Zn	–	As, Zn	Cu, Mo
1–2	Ag, Sb, As, Be, Zn, Ti, Sc	Be, Bi, Ba	Ag, Zn, Pb, W, Cu, Ge, Sr, Ti, As, Mn, Sb	Ag, Sb, Cu, Ti, Mo, Hg, Ge, Nb, Cr, Mn	Ag, As, Sc, Cr, Bi, Ti, Be, Ba, Ge, Fe,
0,5–1	Ge, Cr, Mo, Si, Nb, W, Fe, Cu, Mn, Li, U, Co, Ba, Ce, Zr, Th, Ga, Nb, La, Eu, Rb, Sm, Al, P, Tb, Tm, Yb, K, Pr, Sr, Er, Dy, Ta, Gd, Cs, Na, V, Y	Ti, Cr, Sn, Sr, P, Mn, Si, Na, U, Nb, W, Cd, Ce, Fe, La, Ge, Nd, Zr, Sm, Ga, Tb, K, Th, Rb, Co, Al, Pr, Sc, Yb, Li, Eu, Gd, Er	Ba, Fe, Cr, Li, Ga, Nb, U, Si, Co, Cs, Al, V, Ce, Rb, Th, Bi,P, Nd, La, Eu, Sm,Zr,Pr,Dy,Er, Tm, Sn, Tb, Yb, K, Gd, Y, Mg, Tl, Mo, Lu	Si, Bi, Fe, Co, Cs, Li, Ba, Ga, Ce, V, Th, Rb, W, Nd, Eu, Sm, Al, La, U, Gd, Tb, Pr, Zr, Ni, Tm, Sn, Yb, Dy, Er, K,Y, Ta, Lu, Sr, Hf	Li, Sn, Co, Nb, Sr, W, Mn, Ce, Ga,Th, Cs, La, U, Sm, Nd, V, Rb, Si, Pr, Zr, Eu, Al, Dy, Tb, Er, Gd, P, Tm, Yb, Y, K, Ta
<0,5	Hf, Bi, Lu, Hg, Ho, Tl, Mg, Ni, Cd	Y, Tm, Dy, Cs, Hf, As, Ti, Lu, Ta, Hg, V, Ho, Mg, Ni	Na, Hf, Ta, Ho, Hg, Cd, Ni, Sc, Be	P, Ho, Tl, Cd, Mg, Na, Be, Sc	Cd, Mg, Lu, Na, Tl, Ho, Hf, Hg, Ni
Zc	12,78	24,85	3,81	8,54	20,77

Примечание: в скобках – количество проб.

Note: the amount of samples is given in brackets.

Таблица 4. Среднее содержание химических элементов (мг/кг) в пробах бурового шлама, в почве горизонта В, С, в осадочных горных породах и в верхней части континентальной коры

Table 4. Average content of chemical elements in samples of drill cuttings in the soil of horizon B, C, in sedimentary rocks and in the upper part of the continental crust

Элементы Elements	Данные автора/Author data		[33]		[30]	
	Шингинское месторождение Shinginskoe field (2)	Южно-Шингинское месторождение Yuzhno-Shinginskoe field (3)	Горизонт В (70–80 см) Horizon B (70–80 cm)	Горизонт С (155–165 см) Horizon C (155–165 cm)	Осадочная горная порода Sedimentary rock	Кларк Clark
Ti	3892,0 ± 239,36 (3652,64 – 4131,36)	4417,41 ± 132,82 (4264,58 – 4681,98)	3400,00	3000,00	3500,00	3930
Cr	83,98 ± 1,95 (82,04 – 85,93)	97,03 ± 5,63 (89,73 – 108,1)	125,00	125,00	76,60	92,4
Mn	609,2 ± 12,69 (596,51 – 621,88)	729,31 ± 48,18 (633,4 – 785,31)	900,00	800,00	730,00	770
Fe, %	2,96 ± 0,24 (2,71 – 3,2)	3,99 ± 0,048 (3,91 – 4,08)	4,5	4,0	3,54	4,06
Cu	74,63 ± 43,87 (30,76 – 118,5)	68,19 ± 17,94 (44,59 – 103,39)	44,00	36,00	31,00	39
Zn	127,39 ± 46,13 (81,26 – 173,52)	230,02 ± 81,5 (129,81 – 391,45)	90,00	75,00	69,00	75
As	4,61 ± 2,11 (2,5 – 6,71)	8,79 ± 2,16 (5,83 – 13,0)	9,00	7,00	7,70	5,6
Mo	2,49 ± 1,13 (1,35 – 3,62)	1,93 ± 0,71 (0,8 – 3,23)	10,30	5,40	1,53	1,56
Ag	0,22 ± 0,05 (0,17 – 0,28)	0,2 ± 0,01 (0,19 – 0,2)	н.о.	н.о.	0,11	0,11
Sn	18,29 ± 15,24 (3,06 – 33,53)	2,59 ± 0,36 (2,15 – 3,3)	н.о.	н.о.	2,7	3,5
Sb	1,61 ± 0,61 (1,0 – 2,22)	1,58 ± 0,54 (0,81 – 2,62)	н.о.	н.о.	0,89	0,81
Ba	457,32 ± 94,24 (363,08 – 551,56)	481,23 ± 26,0 (429,92 – 514,18)	460,00	420,00	410,00	510
Pb	161,96 ± 112,83 (49,13 – 274,79)	85,36 ± 42,18 (25,07 – 166,6)	18,00	17,00	12,00	17

Примечание: среднее содержание химических элементов в пробах бурового шлама по данным масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС), ± – станд. ошибка; в знаменателе – (min-max). [33] – содержание химических элементов в дерново-подзолистых почвах южной тайги Западной Сибири (Васюганская равнина). [30] Осадочная горная порода – среднее содержание химических элементов в осадочных горных породах в целом; кларк – среднее содержание химических элементов в верхней части континентальной коры.

Note: average content of chemical elements in samples of drill cuttings according to mass spectrometry with inductively coupled plasma (ICP-MS), ± – standard error; in the denominator – (min-max). [33] content of chemical elements in sod-podzolic soils of the southern taiga of Western Siberia (Vasyugan plain). [30] Sedimentary rock – average content of chemical elements in sedimentary rocks as a whole; Clark – average content of chemical elements in the upper part of the continental crust.

Содержание таких элементов, как Pb, Zn, Cu превышает среднее содержание в почве (горизонт В и С), в осадочных горных породах в целом и также среднее содержание химических элементов в верхней части континентальной коры. Элементы Ba и Ti отмечены в повышенном количестве относительно рассматриваемых горизонтов почвы и осадочных горных пород.

Пробы бурового шлама были разделены на магнитную, электромагнитную и немагнитную фракции. Доля магнитной и электромагнитной фракции составила менее 0,5 %. Полученное процентное соотношение представлено в табл. 5.

Таблица 5. Процентное соотношение магнитной, электромагнитной и немагнитной фракций в пробах бурового шлама

Table 5. Percentage ratio of magnetic, electromagnetic and non-magnetic fractions in samples of drill cuttings

<div>Месторождения Field</div> <div>Фракция Fraction</div>	Шингинское Shinginskoe (2)		Южно-Шингинское Yuzhno-Shinginskoe (3)		
	Кустовая площадка/Well pad				
	7	8	3		
	амбap/sludge pit				
	1			2	3
Магнитная Magnetic	0,10	0,42	0,21	0,02	0,12
Электромагнитная Electromagnetic	0,08	0,06	0,21	0,01	0,24
Немагнитная Non-magnetic	99,82	99,52	99,58	99,97	99,64

Примечание: в скобках – количество проб.

Note: the amount of samples is given in brackets.

Далее каждая фракция исследовалась методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии на сканирующем электронном микроскопе. Магнитная фракция в основном представлена оксидом железа. В пробах бурового шлама с Шингинского месторожде-

ния встречаются Ti-Fe содержащие частицы. Электромагнитная фракция проб бурового шлама выделяется наличием включений, спектр которых соответствует дисульфиду железа (минерал пирит). Также встречаются цинк-, свинец- и медь-содержащие частицы. В пробах бурового шлама, отобранных из действующих шламовых амбаров Шингинского месторождения кустовой площадки № 8 и Южно-Шингинского месторождения кустовой площадки № 3, амбара № 3, выявлены включения, спектр которых соответствует сульфату бария (минерал барит).

В исследуемых пробах бурового шлама обнаружены сферулы оксида железа и оксида свинца. Были сняты спектры, и сделаны снимки найденных сферул в режиме обратно рассеянных электронов. Результаты представлены на рис. 5, 6. Сферулы оксида железа обнаружены во всех пробах, за исключением пробы с кустовой площадки № 3, амбар № 1, Южно-Шингинского месторождения. Сферулы оксида свинца выявлены исключительно в пробах с Шингинского месторождения.

Следует отметить, что ряд минеральных фаз, встречающихся в пробах бурового шлама, совпадает с минералогическим составом образцов торфа из Васюганского болота, представленными детритовыми, аутогенными минералами [34]. К детритовым минералам относятся – кварц, полевые шпаты, ильменит, рутил, к аутогенным минералам – кальцит, оксиды железа, пирит, барит.

Так как в ходе исследования выявилось повышенное содержание ряда элементов по данным масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, среднее содержание химических элементов в пробах бурового шлама сравнили с содержанием этих элементов в технологических добавках, используемых при буровых работах на исследуемых месторождениях (табл. 6).

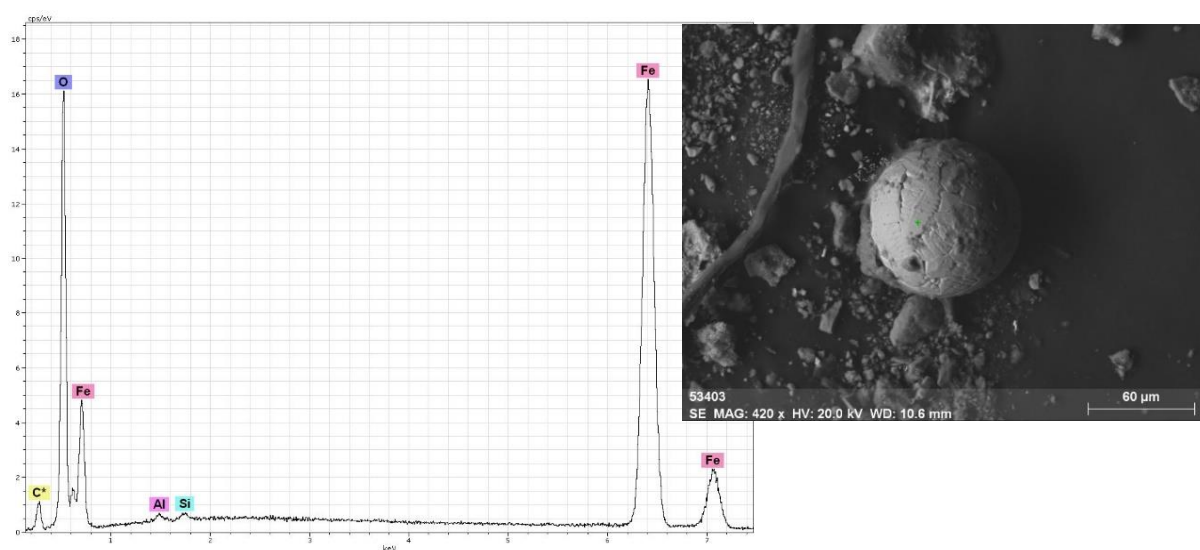


Рис. 5. Снимок в режиме обратно рассеянных электронов и спектр сферулы оксида железа размером 70 µm

Fig. 5. Back-scattered electron images and spectra of spherule of iron oxide, the size of the sample is 70 µm

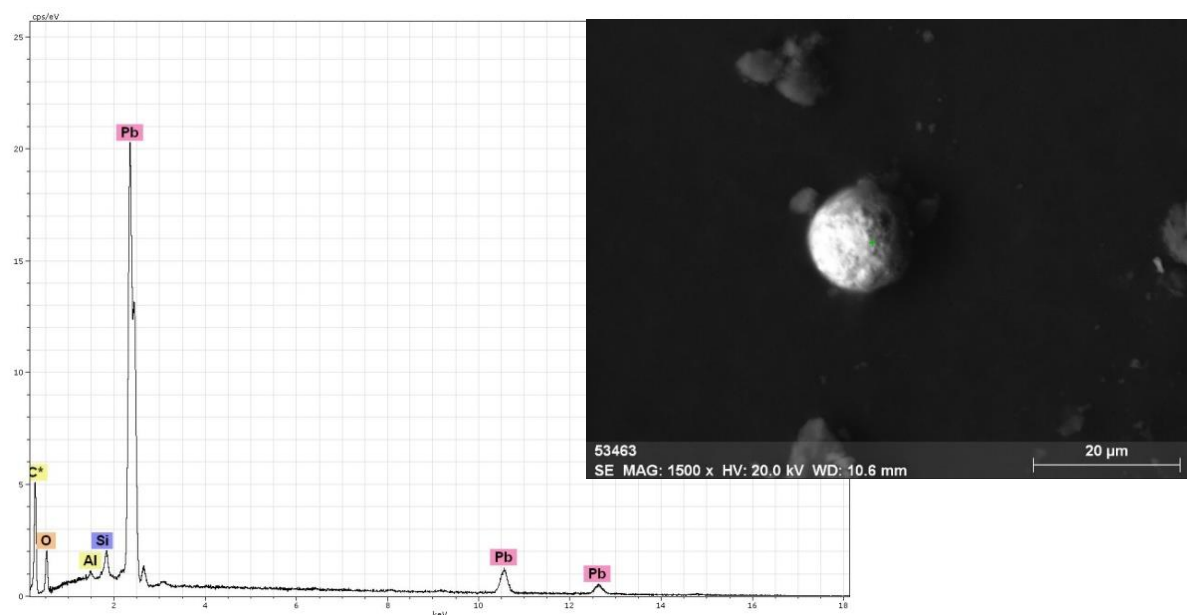


Рис. 6. Снимок в режиме обратно рассеянных электронов и спектр сферулы оксида свинца размером 15 μm

Fig. 6. Back-scattered electron images and spectra of spherule of lead oxide, the size of the sample is 15 μm

Таблица 6. Содержание химических элементов (в мг/кг) в технологических добавках в сравнении со средним содержанием элементов в буровом шламе

Table 6. Content of chemical elements (in mg/kg) in technological additives in comparison with the average content of elements in drill cuttings

Элементы/Elements		Ti	Cr	Fe	Cu	Zn	As	Ba	Pb
Среднее арифметическое значение по пробам бурового шлама Arithmetic average for samples of drill cuttings (n=5)		4207,2	91,81	35802,54	70,77	188,97	7,12	471,67	116,00
Технологические добавки Technological additives	Профосфат натрия кислый Sodium phosphosphate	25,57	1,34	217,28	2,69	12,18	0,25*	0,09	0,005*
	Понижитель фильтрации Filtration reducer	44,57	6,22	639,24	7,46	25,83	0,25*	0,08	0,016
	Ингибитор глин Clay inhibitor	166,82	6,28	7050,53	4,06	11,24	0,25*	1,55	0,020
	Полипас *R Polypas *R	8,91	1,94	130,43	0,85	0,30	0,25*	0,05	0,005*
	Карбонат кальция Calcium carbonate	27,09	4,79	1130,75	5,15	15,95	0,52	0,68	0,005*
	Добавка для бурения Drilling additive	11,51	3,90	313,01	1,68	5,01	0,25*	0,02	0,005*
	Полианиононая целлюлоза Polyionic cellulose	14,32	3,64	299,83	2,39	26,61	0,25*	0,08	0,005*
	0,25* – пол предела обнаружения/half detection limit								

Установлено, что содержания элементов в технологических добавках не оказывают существенного влияния на химический состав исследуемых проб бурового шлама.

Для определения токсического эффекта буровых шламов было проведено биотестирование с использованием следующих тест-объектов: рачков *Daphia magna* Straus, микроводоросли *Scenedesmus quadricaud* (Turp.) Breb., плодовой мушки *Drosophila melanogaster*. Результаты постановки экспериментов приведены в табл. 7. Токсичность исследуемых проб на тест-объект *Drosophila melanogaster* оценивалось по соотношению полов, т. к. при постановке эксперимента морфозы у нового поколения мушек не были выявлены.

По результатам исследования, все пробы бурового шлама не оказывают токсического действия на мик-

роводоросль *Scenedesmus quadricauda* и плодовую мушку *Drosophila melanogaster*. Однако для шламов Шингинского (кустовая площадка № 7) и Южно-Шингинского (кустовая площадка № 3, амбар № 1) месторождений биотестирование на тест-организме рачка *Daphia magna* устанавливает, что водная вытяжка из отхода оказывает вредное воздействие при кратности в 1 раз.

Как видно из таблицы, результаты биотестирования не отражают специфику накопления химических элементов. Можно предположить, что химические элементы, выявленные в повышенных концентрациях и отмеченные в концентрировании, находятся в нерастворенной форме и не влияют на тест-объект. Таким образом, исследуемые пробы бурового шлама относятся к малоопасным, практически неопасным отходам и не являются потенциально токсичными.

Таблица 7. Результаты биотестирования буровых шламов

Table 7. Results of biotesting of drill cuttings

Место отбора/Sampling place	Тест-объект/Test -object		
	<i>Daphia magna</i> Straus	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	<i>Drosophila melanogaster</i> мухи/flyes
Шингинское, кустовая площадка № 7, амбар 1 (I) Shinginskoe field, well pad № 7, sludge pit 1 (I)	+	–	– 1147
Шингинское, кустовая площадка № 8, амбар 1 (I) Shinginskoe field, well pad № 8, sludge pit 1 (I)	–	–	– 705
Южно-Шингинское, кустовая площадка № 3, амбар 1 (I) Yuzhno-Shinginskoe field, well pad №3, sludge pit 1 (I)	+	–	– 937
Южно-Шингинское, кустовая площадка № 3, амбар 2 (I) Yuzhno-Shinginskoe field, well pad № 3, sludge pit 2 (I)	–	–	– 806
Южно-Шингинское, кустовая площадка № 3, амбар 3 (I) Yuzhno-Shinginskoe field, well pad № 3, sludge pit 3 (I)	–	–	– 835
+	Водная вытяжка оказывает вредное воздействие при кратности в 1 раз Water extract has a harmful effect at a multiplicity of 1 time		
–	Не оказывает вредное воздействие/No harmful effect		

Примечание: в скобках – количество проб.

Note: the amount of samples is given in brackets.

Выводы

Обобщая вышеизложенные результаты исследования по установлению геохимической и минералогической специфики буровых шламов, на примере Шингинского и Южно-Шингинского месторождений, можно отметить некоторые особенности.

1. Исследуемые пробы обладают схожим минералогическим составом, что указывает на одинаковое образование исходных вмещающих пород. Максимальная доля в составе буровых шламов приходится на кварц и каликатровые полевые шпаты. Глинистая составляющая представлена каолинитом, иллитом и вермикулитом.
2. В буровом шламе, отобранном из шламовых амбаров Шингинского и Южно-Шингинского месторождений, фиксируются повышенные концентрации Pb, Zn, Cu относительно среднего состава верхней части континентальной земной коры и осадочных горных пород в целом (по Н.А. Григорьеву) и содержания химических элементов почвах горизонтов В, С Васюнагской равнины (по А.И. Сысо).
3. Суммарный показатель загрязнения, рассчитанный по кларку концентрации, показывает, что преимущественно пробы шлама относятся к низкой степени загрязнения, а в отдельных амбарах (Шингинское месторождение, кустовая площадка № 8 и Южно-Шингинское месторождение кусто-

вая площадка № 3, амбар № 3) – к средней степени загрязнения, что подтверждает тот факт, что данные амбары находились в стадии эксплуатации на момент отбора.

4. Метод энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии на сканирующем электронном микроскопе выявил минеральные фазы таких элементов, как Fe, Pb, Zn, Ba, Cu, Ti. Были обнаружены частицы железа и свинца характерной сферической формы.
5. По результатам биотестирования все пробы шлама не оказывают токсического действия на микродоросль *Scenedesmus quadricauda* и плодую мушку *Drosophila melanogaster*. Однако для буровых шламов с действующих амбаров Шингинского (кустовая площадка № 7) и Южно-Шингинского (кустовая площадка № 3, амбар № 1) месторождений биотестирование на тест-организме рачка *Daphia magna* устанавливает вредное воздействие при кратности в 1 раз.
6. По результатам токсикологического анализа методом биотестирования, выявлено, что исследуемые пробы бурового шлама относятся к малоопасным, практически неопасным отходам и не являются потенциально токсичными.

Исследования были выполнены с использованием научного оборудования Центра коллективного использования ТПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Московченко Д.В., Дожорукова С.Л. Последствия буровых работ на севере Тюменской области // Экология и промышленность России. – 2002. – № 9. – С. 27–30.
2. Соромотин А.В. Воздействие добычи нефти на таежные экосистемы Западной Сибири. – Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2010. – 320 с.
3. Пашкевич М.А., Куликова М.А., Экологический мониторинг. – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2013. – 100 с.

4. Экологическое сопровождение разработки нефтегазовых месторождений. Вып. 2. Мониторинг природной среды на объектах нефтегазового комплекса: аналитический обзор / А.Г. Гендрин, Г.А. Надоховская, Н.К. Смирнова, В.П. Середина, А.И. Непотребный, А.Г. Киселев, Е.С. Русинова, А.М. Худолец, А.А. Серых, А.Н. Чемерис. – Новосибирск: Государственная публичная научно-техническая библиотека Сибирского отделения Российской академии наук; ТомскНИПИнефть ВНК, 2006. – 123 с.
5. Савичев О.Г., Бернатонис П.В., Бернатонис В.К. Геохимические условия размещения и утилизации отходов бурения в торфяно-болотных геосистемах Сибири // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – № 375. – С. 183–186.
6. Влияние шламовых амбаров на геохимическое состояние болотных экосистем в бассейне реки Васюган / В.А. Базанов, О.Г. Савичев, Д.В. Волостнов, Б.А. Егоров, А.О. Крутовский, Е.Г. Язиков. // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 30. – № 2. – С. 72–75.
7. Savichev O.G., Matveenko I.A., Savchenko D.V. Changes in chemical composition of drilling waste water in taiga zone of Western Siberia (the Russian Federation) on the basis of thermodynamic approach // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – 7 p.
8. Characterization of drilling waste from shale gas exploration in Central and Eastern Poland / M. Mikos-Szymańska, P. Rusek, K. Borowik, M. Rolewicz, P. Bogusz // Environmental Science and Pollution Research. – 2018. – V. 25. – Iss. 36. – P. 35990–36001.
9. Kujawska J., Cel W. Mobility of metals from drill cuttings // International Journal of Waste Resources. – 2017. – V. 7. – P. 1–3.
10. Onwukwe S. I., Nwakaudu M. S. Drilling wastes generation and management approach // International Journal of Environmental Science and Development. – 2012. – V. 3. – № 3. – P. 252–257.
11. Drill cutting accumulations in the Northern and Central North Sea: a review of environmental interactions and chemical fate / E. Breuer, A.G. Stevenson, J.A. Howe, J. Carroll, G.B. Shimmield // Marine Pollution Bulletin. – 2004. – V. 48. – P. 12–25.
12. Frost T.K., Neff J. Toxicity of drilling discharges // Report Environmental Risk Management System. – Trondheim, SINTEF Publ., 2006. – V. 4. – 214 p.
13. Ifeadi Ch.N. The treatment of drill cuttings using dispersion by chemical reaction (DCR) // Health, Safety & Environment (HSE) International Conference on Oil and Gas Industry. Port Harcourt, 2004. – P. 1–12.
14. Neff J.M. Composition, environmental fates and biological effects of water based drilling muds and cuttings discharged to the marine environment: a synthesis and annotated bibliography. Report to Petroleum Environmental Research Forum (PERF) and American Petroleum Institute. – Daksberi: Battelle Publ., 2005. – 73 p.
15. Nabhani N., Khaje E. Environmental aspect of oil and water-based offshore drilling muds and cuttings // International Journal of Mechanical and Production Engineering. – 2015. – V. 3. – Iss. 4. – P. 14–19.
16. Соромотин А.В., Пислегин Д.В. Тяжелые металлы в донных отложениях шламовых амбаров геологоразведочных скважин Западной Сибири // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. – 2015. – № 6. – С. 514–520.
17. Матвиенко В.В., Кузнецов В.А., Цеханский М.В. К вопросу о современных методах переработки и утилизации отходов бурения // Нефть и газ Сибири. – 2017. – № 3. – С. 146–151.
18. Babken M.B., Chudnova T.A., Shapovalov D.A. Environmental justification of the use of drill cuttings in the soil // International agricultural journal. – 2019. – № 1. – P. 50–55.
19. Stuckman M., Lopano C.L., Hakala J.A. Trace metal distribution and mobility in drill cuttings from Marcellus shale gas extraction // Office of Scientific and Technical Information. – 2016. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1344480> (дата обращения 23.07.2019).
20. Хаустов А.П., Редина М.М. Охрана окружающей среды при добыче нефти. – М.: Дело, 2006. – 552 с.
21. Миниغازимов Н.С., Миниغازимов Р.Ш. Новая информация о токсичности нефтесодержащих отходов // Уральский экологический вестник. – 2014. – № 2. – Р. 31–36.
22. Павлова Е.Ю. Оценка экологической безопасности размещения бурового шлама на территории Ханты-Мансийского автономного округа-Югры // Международный студенческий вестник. – 2015. – № 4. – С. 676–679.
23. Оценка цитотоксичности образцов бурового шлама, собранных на территории амбара, в природных условиях ХМАО-Югры / А.В. Нехорошева, И.Ф. Киржаков, И.И. Авдеева, Р.Р. Ахмеджанов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17. – № 5. – С. 690–694.
24. Пичугин Е.А., Шенфельд Б.Е. К вопросу различия буровых и нефтяных шламов // Экология и промышленность России. – 2017. – Т. 21. – № 7. – С. 14–19.
25. Балаба В.И. Обеспечение экологической безопасности строительства скважин на море // Бурение и нефть. – 2004. – № 1. – С. 18–21.
26. Патин С.А. Нефть и экология континентального шельфа. – М.: ВНИРО, 2001. – 247 с.
27. Муртазин Д.Г., Пищулева А.В., Губаев А.Р. Применение кластеризации амплитудных спектров в условиях сложно-прогнозируемого геологического разреза по данным сейсмо-разведки 3D // Пронефть. Профессионально о нефти. – 2018. – № 1. – С. 28–32.
28. Даненберг Е.Е., Белозеров В.Б., Брылина Н.А. Геологическое строение и нефтегазоносность верхнеюрско-нижнемеловых отложений юго-востока Западно-Сибирской плиты (Томская область). – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. – 291 с.
29. ПНД Ф 12.1:2.2.2.3.3.2-03 Методические рекомендации. Отбор проб почв, грунтов, донных отложений, илов, осадков сточных вод, шламов промышленных сточных вод, отходов производства и потребления. – М.: ФБУ Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия, 2014. – 15 с.
30. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 382 с.
31. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Сагет, Б.А. Ревич, Е.П. Янин, Р.С. Смирнова, И.Л. Башаркевич, Т.Л. Онищенко, Л.Н. Павлова, Н.Я. Трефилова, А.И. Ачкасов, С.Ш. Саркисян. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
32. Гершензон С.М. Основы современной генетики. – Киев: Наукова думка, 1983. – 560 с.
33. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири / отв. ред. И.М. Гаджиев. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 277 с.
34. Authigenic and detrital minerals in peat environment of Vasyugan swamp, Western Siberia / M. Rudmin, A. Ruban, O. Savichev, A. Mazurov, A. Dauletova, O. Savinova // Minerals. – 2018. – № 8. – 13 p.

Поступила 14.11.2019 г.

Информация об авторах

Климова А.А., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Язиков Е.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Шайхиев И.Р., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер по охране труда и промышленной безопасности отдела охраны труда, промышленной и пожарной безопасности Управления производственной безопасности Общества с ограниченной ответственностью «Газпромнефть-Восток».

UDC 622.323'156(571.16)

MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL PARTICULARITY OF DRILL CUTTINGS FROM OIL FIELDS ON THE EXAMPLE OF OBJECTS OF THE TOMSK REGION

Alena A. Klimova¹,
klimovalena777@mail.ru

Egor G. Yazikov¹,
yazikoveg@tpu.ru

Ildar R. Shaikhiev²,
ildar.shaihiiev@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² OOO «Gazpromneft-Vostok»,
13a, bld. 1, Nakhimova street, Tomsk, 634045, Russia.

The relevance of the research is in poorly studied mineralogical, elemental composition and toxicity of drill cuttings formed during the construction of wells in oil fields.

The main aim of the research is to identify the geochemical and mineralogical particularity of drill cuttings, to determine the toxicity of this type of waste using modern research methods.

Methods: X-ray powder diffraction; inductively coupled plasma mass spectrometry; scanning electron microscope; bioassay.

Results. Common minerals, such as quartz, albite, muscovite and calcite, were determined in the studied samples of drill cuttings that indicates a similar composition of the original host rocks. The geochemical specificity of drill cuttings expressed in increased concentration of chemical elements such as Pb, Zn, Cu, was revealed. Mainly, the elements belong to heavy metals of I, II and III hazard class. The value of the total pollution indicator shows that most samples of drill cuttings are of low pollution. However, the samples from existing sludge pits are characterized by medium pollution. The identified mineral phases are represented by oxides of iron, lead, zinc, iron sulfide, barium sulfate. Spherical particles of iron and lead were discovered. In general, drill cuttings samples have not toxic effects on test objects: *Daphia magna*, *Scenedesmus quadricauda*, *Drosophila melanogaster*. At the same time, samples from existing sludge pits have an effect on the test organism *Daphia magna*. In this way, the studied samples of drill cuttings are low-hazardous, practically non-hazardous waste, and are not potentially toxic.

Key words:

Drill cuttings, sludge pits, well pad, oil field, elemental composition, heavy metals, bioassay.

The research was carried out with the use of scientific equipment of the Sharing centre at TPU.

REFERENCES

1. Moskovchenko D.V., Dozhorukova S.L. The consequences of drilling operations in the North of the Tyumen region. *Ecology and Industry of Russia*, 2002, no. 9, pp. 27–30. In Rus.
2. Soromotin A.V. *Vozdeystvie dobychi nefi na taezhnye ekosistemy Zapadnoy Sibiri* [Impact of oil production on taiga ecosystems of Western Siberia]. Tyumen, Tyumen state university Publ., 2010. 320 p.
3. Pashkevich M.A., Kulikova M.A. *Ekologicheskiy monitoring* [Environmental monitoring]. St-Petersburg, National Mineral Resources University «Gorny» Publ., 2013. 100 p.
4. Gendrin A.G., Nadokhovskaya G.A., Smirnova N.K., Seredina V.P., Nepotrebnny A.I., Kiselev A.G., Rusinova E.S., Khudobets A.M., Serykh A.A., Chemeris A.N. *Ekologicheskoe so-provozhdienie razrabotki neftegazovykh mestorozhdeniy. Vypusk 2. Monitoring prirodnoy sredy na obektakh neftegazovogo kompleksa: analiticheskiy obzor* [Environmental escort for exploitation oil and gas deposits. Iss. 2. Natural state monitoring on the objects of oil and gas complexes: analytical review]. Novosibirsk, State public science-technical library of Siberian branch of RAS; TomskNIPIneft VNK Publ., 2006. 123 p.
5. Savichev O.G., Bernatonis P.V., Bernatonis V.K. Geochemical conditions of disposal and utilization of drilling waste in the peat bog ecosystems of Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 375, no. 375, pp. 183–186. In Rus.
6. Bazanov V.A., Savichev O.G., Volostnov D.V., Egorov B.A., Krutovskiy A.O., Yazikov E.G. The influence of sludge pits on the geochemical state of wetland ecosystems in the Vasyugan river basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2004, vol. 30, no. 2, pp. 72–75. In Rus.
7. Savichev O.G., Matveenko I.A., Savchenko D.V. Changes in chemical composition of drilling waste water in taiga zone of Western Siberia (the Russian Federation) on the basis of thermodynamic approach. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016. 7 p.
8. Mikos-Szymańska M., Rusek P., Borowik K., Rolewicz M., Bogusz P., Characterization of drilling waste from shale gas exploration in Central and Eastern Poland. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, vol. 25, no. 36, pp. 35990–36001.
9. Kujawska J., Cel W. Mobility of metals from drill cuttings. *International Journal of Waste Resources*, 2017, vol. 7, pp. 1–3.
10. Onwukwe S.I., Nwakaudu M.S. Drilling wastes generation and management approach. *International Journal of Environmental Science and Development*, 2012, vol. 3, no. 3, pp. 252–257.
11. Breuer E., Stevenson A.G., Howe J.A., Carroll J., Shimmield G.B. Drill cutting accumulations in the Northern and Central North Sea: a review of environmental interactions and chemical fate. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, vol. 48, pp. 12–25.
12. Frost T.K., Neff J. Toxicity of drilling discharges. *Report Environmental Risk Management System*. Trondheim, SINTEF Publ., 2006, vol. 4, 214 p.
13. Ifeadi Ch.N. The treatment of drill cuttings using dispersion by chemical reaction (DCR). *Health, Safety & Environment (HSE) International Conference on Oil and Gas Industry*. Port Harcourt, 2004. pp. 1–12.

14. Neff J.M. Composition, environmental fates and biological effects of water based drilling muds and cuttings discharged to the marine environment: a synthesis and annotated bibliography. *Report to Petroleum Environmental Research Forum (PERF) and American Petroleum Institute*. Daksberi, Battelle Publ., 2005. 73 p.
15. Nader Nabhani, Esmael Khaje. Environmental aspect of oil and water-based offshore drilling muds and cuttings. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 2015, vol. 4, pp. 1–6.
16. Soromotin A.V., Pislegin D.V. Heavy metals in bottom sediments of sludge pits in exploration wells in the Western Siberia. *Geology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2015, no. 6, pp. 514–520. In Rus.
17. Matveenko V.V., Kuznetsov V.A., Tsekhanskiy M.V. K voprosu o sovremennykh metodakh pererabotki i utilizatsii otkhodov bureniya [On the issue of modern methods of processing and disposal of drilling waste]. *Neft i gaz Sibiri*, 2017, no. 3, pp. 146–151.
18. Babken M.B., Chudnova T.A., Shapovalov D.A. Environmental justification of the use of drill cuttings in the soil. *International agricultural journal*, 2019, no. 1, pp. 50–55.
19. Stuckman M., Lopano C.L., Hakala J.A. Trace metal distribution and mobility in drill cuttings from Marcellus shale gas extraction. *Office of Scientific and Technical Information*, 2016. Available at: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1344480> (accessed 23 July 2019).
20. Khaustov A.P., Redina M.M. *Okhrana okruzhayushchey sredy pri dobychi nefti* [Environmental protection in oil production]. Moscow, Delo Publ., 2006. 552 p.
21. Minigazimov N.S., Minigazimov R.Sh. The new information on the toxicity of oily waste. *Ecological bulletin of Ural*, 2014, no. 2, pp. 31–36. In Rus.
22. Pavlova E.Yu. Otsenka ekologicheskoy bezopasnosti razmeshcheniya burovogo shlama na territorii Khanty-mansiyskogo avtonomnogo okruga-Yugry [Assessment of the environmental safety of the placement of drill cuttings in the territory of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra]. *Mezhdunarodny studencheskiy nauchny vestnik*, 2015, no. 4, pp. 676–679.
23. Nehorosheva A.V., Kirzhakov I.F., Avdeeva I.I., Akhmedzhanov R.R. Cytotoxicity estimation of drilling slime sample, collected in the territory of barn, in nature of Khanty-Mansi autonomous district - Urga. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2015, vol. 17, no. 5, pp. 690–694. In Rus.
24. Pichugin E.A., Shenfeld B.E. To the issue of differences of drilling sludge and oil sludge. *Ecology and Industry of Russia*, 2017, vol. 21, no. 7, pp. 14–19. In Rus.
25. Balaba V.I. Ensuring environmental safety of wells construction on the sea. *Drilling and oil*, 2004, no. 1, pp. 18–21. In Rus.
26. Patin S.A. *Neft i ekologiya kontinentalnogo shelfa* [Oil and continental shelf ecology]. Moscow, VNIRO Publ., 2017, vol. 1, 326 p.
27. Murtazin D.G., Pishchuleva A.V., Gubaev A.R. Application of amplitude spectra clustering with 3d seismic data under conditions of difficult to forecast geological section. *PROneft. Professionals about oil*, 2018, no. 1, pp. 28–32. In Rus.
28. Danenberg E.E., Belozero V.B., Brylina N.A. *Geologicheskoe stroenie i neftegazonosnost verkhneyursko-nizhnemelovykh otlozheniy yugo-vostoka Zapadno Sibirskoy plity (Tomskaya oblast)* [Geological structure and oil and gas potential of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous sediments of the southeast of the West-Siberian Plate (Tomsk Region)]. Tomsk, TPU Publ., 2006. 291 p.
29. *PND F 12.1:2.2:2.3:3.2-03 Metodicheskie rekomendatsii. Otbor prob pochv, gruntov, donnykh otlozheniy, ilov, osadkov stochnykh vod, shlamov promyshlennykh stochnykh vod, otkhodov proizvodstva i potrebleniya* [Methodical recommendations. Sampling of soil, soil, sediment, silt, sewage sludge, industrial wastewater sludge, production and consumption waste]. Moscow, Federal State Institution Federal Center for Analysis and Assessment of Technogenic Impact Publ., 2014. 15 p.
30. Grigoriev N.A. *Raspredelenie khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinentalnoy kory* [Chemical element distribution in the upper continental crust]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2009. 382 p.
31. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P., Smirnova R.S., Basharkevich I.L., Onishchenko T.L., Pavlova L.N., Trefilova N.Ya., Achkasov A.I., Sarkisyan S.Sh. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Environmental geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.
32. Gershenzon S.M. *Osnovy sovremennoy genetiki* [Foundations of modern genetics]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1983. 560 p.
33. Syso A.I. *Zakonomernosti raspredeleniya khimicheskikh elementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh i pochvakh Zapadnoy Sibiri* [Patterns of distribution of chemical elements in soil-forming rocks and soils of Western Siberia.]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2007. 277 p.
34. Rudmin M., Ruban A., Savichev O., Mazurov A., Dauletova A., Savinova O. Authigenic and detrital minerals in peat environment of Vasyugan Swamp, Western Siberia. *Minerals*, 2018, no. 8, pp. 1–13.

Received: 14 November 2019.

Information about the authors

Alena A. Klimova, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Egor G. Yazikov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ildar R. Shaikhiev, Cand. Sc., leading engineer for labor protection and industrial safety, Gazpromneft-Vostok.

УДК 621.31

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 6(10) кВ С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Сидоров Сергей Владимирович¹,
sidorovsv@tyuiu.ru

Сушков Валерий Валентинович²,
sushkovvv@gray-nv.ru

Сухачев Илья Сергеевич¹,
suhachevis@tyuiu.ru

¹ Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

² Нижневартровский государственный университет,
Россия, 628600, г. Нижневартровск, ул. Ленина, 56.

Актуальность. Одной из основных причин высокой аварийности и отключений в распределенных системах электроснабжения 6(10) кВ кустов нефтяных скважин являются повреждения воздушных линий электропередачи вследствие однофазных замыканий на землю. Широко проводимые исследования по определению места возникновения однофазного замыкания на землю установили корреляцию между точностью определения и большим количеством изменяющихся факторов, таких как параметры режима работы, параметры воздушной линии электропередачи, вид повреждения, величина переходного сопротивления, сопротивление грунта и прочие, принимая их усредненные значения, не зависимо от изменения климатических условий. Нормирование технических средств определения места возникновения однофазного замыкания на землю по инструментальным погрешностям без учёта методической составляющей обуславливает погрешность определения места повреждения, достигающую 30 %. Таким образом, актуальны исследования, направленные на определение первичных параметров ЛЭП и минимизацию методической погрешности определения места повреждения ЛЭП с учётом климатических факторов.

Цель исследования заключается в повышении точности определения места возникновения однофазного замыкания на землю линии электропередачи 6(10) кВ путём разработки методики, учитывающей влияние климатических факторов.

Методы. Учтены основные физические процессы распространения электромагнитной волны в линии электропередачи. Используются основные положения теории электрических цепей и электромагнитного поля; алгоритмы пакета MATLAB Simulink.

Результаты. Разработан алгоритм, позволяющий определить расстояние от понижающих подстанций 6(10)/0,4 кВ до места возникновения однофазного замыкания на землю в распределительных сетях кустов нефтяных скважин с учетом конструктивных особенностей линии электропередачи и климатических факторов. Разработана в среде MATLAB Simulink имитационная модель распределительной сети 10 кВ, питающей кусты нефтяных скважин, учитывающая зависимость первичных параметров линии электропередачи от климатических факторов и удельного сопротивления грунта.

Ключевые слова:

Воздушная линия электропередачи, однофазное замыкание на землю, моделирование, климатические факторы, удельное сопротивление грунта.

Введение

Воздушные линии электропередачи (ЛЭП) являются основой электрической сети, в существенной степени определяющей бесперебойность электроснабжения. Согласно статистике распределения отка-

зов по видам оборудования в распределительных сетях нефтегазодобывающих компаний Западной Сибири, представленной на рис. 1, доля отказов воздушных линий электропередачи напряжений 6(10) кВ составляет 43 % [1–4].

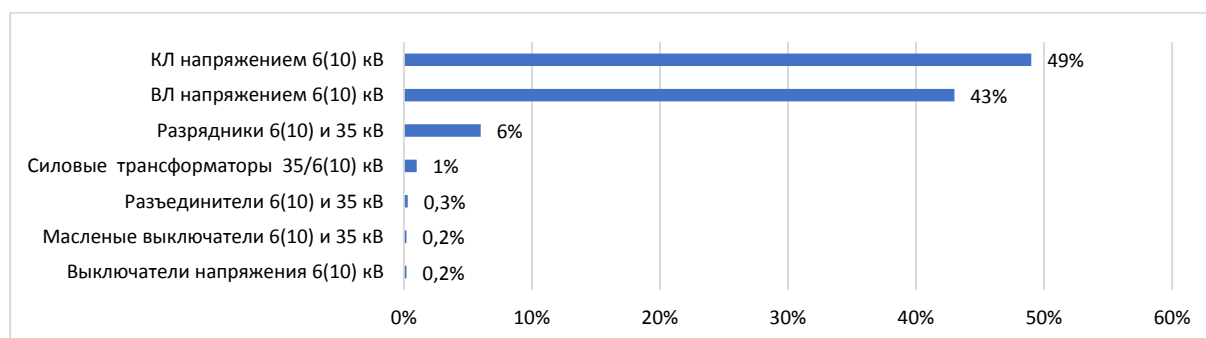


Рис. 1. Диаграмма распределения отказов по видам оборудования

Fig. 1. Diagram of failures distribution by equipment type

Широко проводимые исследования по определению места повреждения установили корреляцию между точностью определения и большим количеством изменяющихся факторов, таких как параметры режима работы, параметры воздушной линии электропередачи, вид повреждения, величина переходного сопротивления, сопротивление грунта и прочие [5–8]. На сегодняшний день разработано довольно большое количество дистанционных методов и технических средств определения мест повреждения линии электропередачи [2, 9–17]. Нормирование этих технических средств по инструментальным погрешностям без учёта методической составляющей обуславливает погрешность определения места повреждения, достигающую 30 %. Таким образом, актуальны исследования, направленные на определение первичных параметров ЛЭП и минимизацию методической погрешности определения места повреждения ЛЭП с учётом климатических факторов.

Задача исследования включает анализ климатических факторов, влияющих на первичные параметры воздушной линии электропередачи, уточнение методики места повреждения ЛЭП; проведение проверки разработанной методики на имитационной модели распределительной сети 6(10) кВ.

Как правило, существующие дистанционные методы определения места повреждения используют конструктивные и геометрические параметры ЛЭП, характеристики установленного линейного оборудования, переходное сопротивление в месте повреждения и удельную проводимость грунта, принимая их усреднённые значения, не зависимо от изменения климатических условий [15, 16, 18–20].

Согласно методу зеркальных изображений расчетная схема трехфазной ЛЭП изображена на рис. 2. Расстояния между проводами и поверхностью земли определяются параметрами опоры [21].

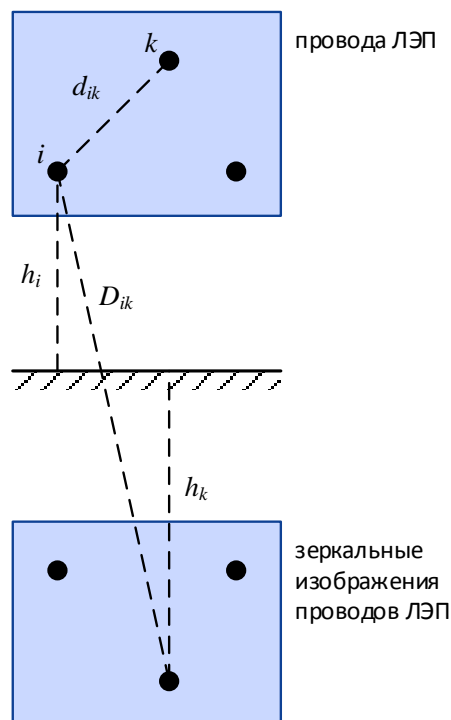


Рис. 2. Расчетная схема линии электропередачи: h_i , h_k – высота проводов i , k над поверхностью земли; d_{ik} – расстояние между проводами i и k ; D_{ik} – расстояние между проводом i и зеркальным изображением провода k

Fig. 2. Calculation scheme of power lines: h_i , h_k – height of wires i , k above the ground; d_{ik} – the distance between the wires i and k ; D_{ik} – the distance between the wire i and the mirror image of the wire k

Формулы расчета собственных и взаимных частичных сопротивлений, индуктивностей и емкостей схемы замещения ЛЭП приведены в табл. 1.

Таблица 1. Формулы расчета первичных параметров схемы замещения линии электропередачи

Table 1. Formulas of calculation of the primary parameters of the power line scheme

Собственные и взаимные частичные сопротивления (Ом/км) Self and mutual resistance terms (ohm/km)	Собственные и взаимные частичные индуктивности (Гн/км) Self and mutual inductance terms (H/km)	Собственные и взаимные частичные потенциальные коэффициенты (км/Ф) и ёмкости (Ф/км) Self and mutual potential coefficients (km/F) and capacity terms (F/km)
$R_{ii} = R_i + \Delta R_{ii}$ $R_{ik} = \Delta R_{ik}$	$L_{ii} = L_i + \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \lg \frac{2h_i}{r_i} + \Delta L_{ii}$ $L_{ik} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \lg \frac{D_{ik}}{d_{ik}} + \Delta L_{ik}$	$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \lg \frac{2h_i}{r_i}$ $P_{ik} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \lg \frac{D_{ik}}{d_{ik}}$ $[C] = [P]^{-1}$

В приведённых формулах влияние удельного сопротивления грунта учитывается поправочными интегралами Карсона 1926 г. ΔR_{ii} , ΔR_{ik} , ΔL_{ii} , ΔL_{ik} . Применение интегралов Карсона к расчёту электромагнитного состояния ЛЭП подробно изложено в работах В.Г. Гольдштейна [22–25].

Удельное активное сопротивление провода определяется его сечением и удельным сопротивлением материала. Данные, приводящиеся в справочной литературе, рассчитаны на температуру 20 °С и не учи-

тывают сезонные изменения температуры окружающей среды. Удельная индуктивность и удельная электрическая ёмкость провода определяются сечением провода и геометрическим расположением проводов ЛЭП относительно друг друга и поверхности земли.

Графики зависимостей относительных погрешностей первичных параметров ЛЭП от температуры и влажности окружающей среды, атмосферного давления и удельного сопротивления грунта приведены на рис. 3.

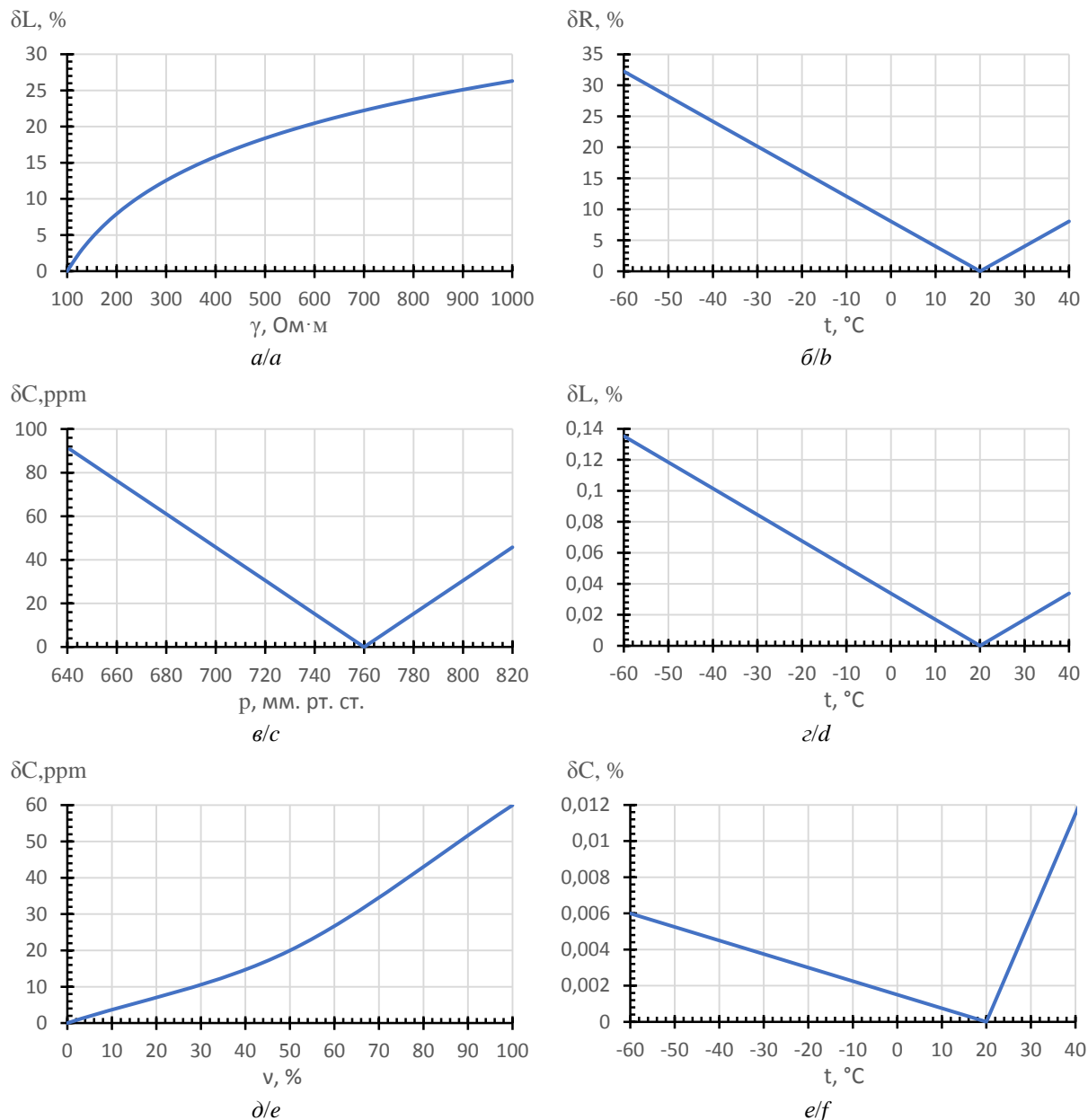


Рис. 3. Графики зависимостей относительных погрешностей: а) индуктивности провода ЛЭП от удельного сопротивления грунта; б) активного сопротивления провода ЛЭП от температуры окружающей среды; в) ёмкости провода ЛЭП от атмосферного давления (ppm=0,0001 %); г) индуктивности провода ЛЭП от температуры окружающей среды; д) ёмкости провода ЛЭП от влажности окружающей среды; е) ёмкости провода ЛЭП от температуры окружающей среды

Fig. 3. Plots of relative errors: а) inductance of power lines depending on the soil resistivity; б) active resistance of power lines depending on the environmental temperature; в) capacity of the power lines depending on the atmospheric pressure (ppm=0,0001 %); г) inductance of power lines depending on the environmental temperature; д) capacity of power lines depending on the environmental wetness; е) capacity of power lines depending on the environmental temperature

При этом относительная погрешность определения индуктивности петель провода трехфазной ЛЭП и земли может достигать 26 % при изменении величины полного сопротивления грунта со 100 до 1000 $\text{Ом}\cdot\text{м}$.

Зависимость удельной ёмкости ЛЭП от атмосферного давления и влажности окружающей среды незначительна и не превышает 91 и 60 ppm соответственно.

Температура оказывает существенное влияние на величину активного сопротивления ЛЭП, учёт этого фактора вносит в расчёт сопротивления относительную погрешность до 32 %. Температура несущественно влияет на индуктивность и ёмкость ЛЭП, относительные погрешности не превышают 0,13 и 0,012 % соответственно.

При этом необходимо учитывать влияние частотной зависимости электрических параметров грунта на си-

стему заземления ЛЭП (the effect of frequency dependence of soil electrical parameters on the grounding systems) [26].

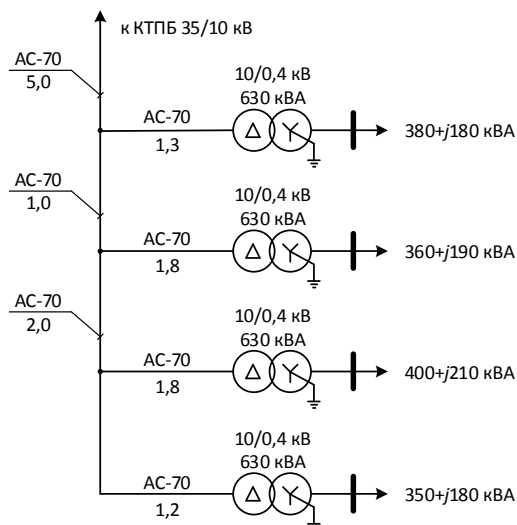


Рис. 4. Упрощённая схема распределительной сети 10 кВ кустов нефтяных скважин

Fig. 4. Simplified distribution network of 10 kV oil well clusters

Рассмотрим влияние построенных на рис. 3 зависимостей на расчёт первичных параметров участка распределительной сети 10 кВ кустов нефтяных скважин, упрощённая однолинейная схема электропитания которых приведена на рис. 4.

В соответствии со схемой электропитания в среде MATLAB Simulink разработана имитационная модель участка распределительной сети 10 кВ кустов нефтяных скважин, приведённая на рис. 5.

Параметры модели рассчитываются с учётом конструктивных и геометрических параметров линии.

Затем уточняются с учётом существенных климатических факторов и удельного сопротивления грунта.

Результаты расчёта первичных параметров модели распределительной сети 10 кВ с учетом и без учета климатических факторов сведены в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 показал, что климатические факторы вносят в результаты вычислений матрицы активных сопротивлений относительную погрешность в пределах 9 %, в результаты вычислений матрицы индуктивностей – в пределах 20 %. Относительная погрешность вычисления матрицы ёмкостей не превышает одного процента.

Согласно результатам вычислений, приведённых в табл. 3, при расчёте параметров схемы замещения ЛЭП прямой последовательности наибольшая относительная погрешность вычисления активного сопротивления составляет 2,32 %, при расчёте параметров схемы замещения ЛЭП нулевой последовательности максимальная относительная погрешность вычисления индуктивности составляет 12,36 %.

Полученные в процессе исследования величины относительных погрешностей вычисления первичных параметров ЛЭП (табл. 2, 3) приводят к искажению результатов дистанционных методов определения места повреждения воздушной линии.

В результате однофазных замыканий на землю воздушной линии электропередачи на электрооборудовании системы электроснабжения возникают напряжения, содержащие «резонансные» гармоники [27–29]. Параметры «резонансных» гармоник зависят от матриц активных сопротивлений, индуктивностей и ёмкостей линии и частотной зависимости электрических параметров грунта, что позволяет установить корреляционную функцию расстояния до места повреждения.

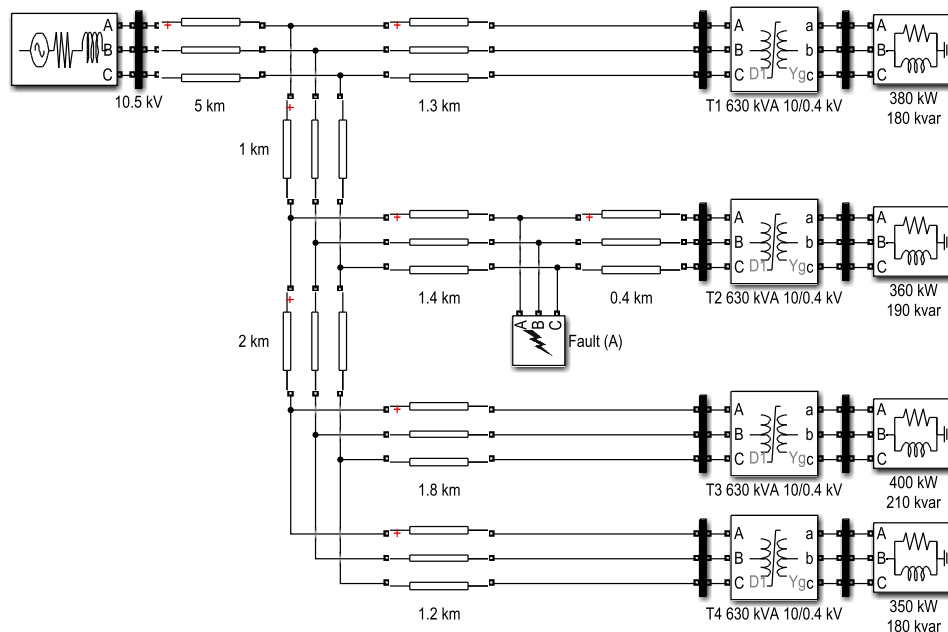


Рис. 5. Упрощённая схема распределительной сети 10 кВ кустов нефтяных скважин и соответствующая схема имитационной модели в MATLAB Simulink

Fig. 5. Simplified distribution network of 10 kV oil well clusters and the corresponding simulation model scheme in MATLAB Simulink

Таблица 2. Результаты расчёта первичных параметров имитационной модели

Table 2. Results of calculation of the primary parameters of the simulation model

С учётом климатических факторов Considering the climatic factors			Без учёта климатических факторов Not considering the climatic factors			Относительная погрешность расчёта Relative error of calculation		
Матрица активных сопротивлений, Ом/км/Active resistance matrix (ohm/km)						Сопротивления, %/Active resistance, %		
0,4961	0,0520	0,0521	0,4700	0,0482	0,0482	5,55	7,85	8,06
0,0520	0,4961	0,0527	0,0482	0,4702	0,0483	7,85	5,50	9,04
0,0521	0,0527	0,4961	0,0482	0,0483	0,4702	8,06	9,04	5,50
Матрица индуктивностей, мГн/км/Inductance matrix, mH/km						Индуктивности, %/Inductance, %		
2,6734	1,3809	1,4412	2,4460	1,1533	1,2135	9,29	19,74	18,76
1,3809	2,6731	1,4601	1,1533	2,4452	1,2322	19,74	9,32	18,50
1,4412	1,4601	2,6731	1,2135	1,2322	2,4452	18,76	18,50	9,32
Матрица ёмкостей, нФ/км/Capacity matrix, nF/km						Ёмкости, %/Capacity, %		
7,4916	-1,3092	-1,6880	7,4822	-1,3207	-1,6994	0,13	-0,87	-0,67
-1,3092	7,7093	-1,7280	-1,3207	7,6934	-1,7425	-0,87	0,21	-0,83
-1,6880	-1,7280	7,8609	-1,6994	-1,7425	7,8463	-0,67	-0,83	0,19

Таблица 3. Результаты расчёта параметров схемы замещения линии электропередачи прямой (ПП) и нулевой (НП) последовательностей фаз

Table 3. Results of calculation of the parameters of the power line scheme positive- (PS) and zero-sequence (ZS)

Параметры Parameters	С учётом климатических факторов Considering the climatic factors		Без учёта климатических факторов Not considering the climatic factors		Относительная погрешность расчёта, % Relative error of calculation, %	
	ПП/PS	НП/ZS	ПП/PS	НП/ZS	ПП/PS	НП/ZS
R, Ом/км (ohm/km)	0,4319	0,5989	0,4219	0,5667	2,32	5,38
L, мГн/км (mH/km)	1,2458	5,5280	1,2458	4,8448	0,00	12,36
C, нФ/км (nF/km)	9,2623	4,5372	9,2615	4,4989	0,01	0,84

Предполагается, что применение технических средств, реализующих предложенный способ определения места повреждения воздушной линии электропередачи, повысит технико-экономические показатели электроснабжения, увеличит надёжность работы воздушных линий, сократит ресурсы на поиск места повреждения. С целью повышения точности определения места возникновения однофазного замыкания на землю ЛЭП разработана методика, учитывающая влияние климатических факторов.

Алгоритм определения места повреждения при однофазном замыкании на землю с учётом климатических факторов включает в себя следующие составляющие:

1. Установка на стороне низкого напряжения каждой трансформаторной подстанции 6(10)/0,4 кВ распределительной сети 6(10) кВ технического средства регистрации сигналов фазных напряжений каждой фазы и преобразование их в цифровой вид с последующей передачей микропроцессорной системе определения места повреждения (МСОМП).
2. МСОМП выполняет спектральный анализ принятых цифровых сигналов с помощью быстрого преобразования Фурье. Появление высших гармонических составляющих, превышающих значения до аварийного режима работы ЛЭП, в сигналах с нескольких трансформаторных подстанций означает возникновение повреждения.
3. При обнаружении факта возникновения однофазного замыкания на землю МСОМП по запрограммированному алгоритму вычисляет место повреждения на основе данных спектрального анализа сигналов фазных напряжений и встроенной математической модели ЛЭП, параметры которой корректируются в соответствии с входными сигналами технических средств мониторинга температуры и удельного сопротивления грунта.

Рассмотрим на основе микропроцессорных устройств реализацию алгоритма определения места повреждения линии электропередачи на величинах резонансных гармоник в контуре «ЛЭП–место повреждения–земля». В рабочих условиях с терминалов релейной защиты получают требуемые для этого способа амплитудно-частотные характеристики, по которым определяются «резонансные» частоты. Величины резонансных частот зависят от погонных величин активного сопротивления, индуктивности и ёмкости контура, что позволяет по известным параметрам математической модели ЛЭП определить расстояние до места повреждения. При этом в случае применения недостоверных параметров математической модели расчетная «резонансная» частота контура (5950 Гц на рис. 6) отличается от данных терминалов релейной защиты, которые согласуются с результатами, полученными по предлагаемой методике (5730 Гц на рис. 6).

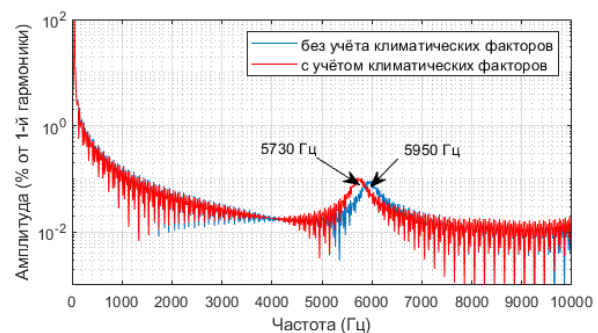


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика напряжения на стороне низкого напряжения трансформаторной подстанции с повреждённой подходящей линией (фаза а)

Fig. 6. Frequency response on the low voltage side of a transformer substation with a damaged suitable line (phase a)

Результаты моделирования работы распределительной сети 10 кВ кустов нефтяных скважин с учётом и без учёта влияния климатических факторов приведены на рис. 6.

Сокращение на 4 % методической погрешности вычисления «резонансных» гармоник, позволяющих установить расстояние до места повреждения, приводит к повышению точности определения места повреждения на 12 %.

Заключение

1. Выявлено, что температура окружающей среды в значительной степени влияет на величину активного сопротивления R провода линии электропередачи, относительная погрешность при вычислениях R может достигать 32 %. Величины индуктивности и ёмкости проводов линии электропередачи относительно друг друга и поверхности земли практически не зависят от температуры (относительная погрешность не более 0,13 и 0,012 % соответственно), влажности окружающей среды и атмосферного давления.
2. Установлено, что полное сопротивление грунта, изменяющееся в зависимости от температуры и влажности окружающей среды, оказывает суще-

ственное влияние на величину индуктивности «петли», включающей провод трехфазной линии электропередачи, место повреждения и землю; относительная погрешность этой индуктивности может достигать 26 %.

3. Разработана имитационная модель распределительной сети 6(10) кВ нефтяного месторождения, в результате моделирования получены амплитудно-частотные характеристики фазных напряжений на стороне низкого напряжения трансформаторных подстанций 6(10) кВ, которые показали наличие «резонансных» гармоник, позволяющих определить место возникновения повреждения линии электропередачи.
4. Предложена методика определения места однофазного замыкания на землю проводов воздушной линии электропередачи с учетом её конструктивных особенностей и климатических факторов на основе величин вторичных напряжений трансформаторных подстанций, что позволило повысить точность определения места повреждения на 12 %.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых (СП-829.2018.1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smart industrial substations / R.E. Cosse, J.E. Bowen, H.T. Combs, D.G. Dunn, M.A. Hildreth, A. Pilcher // IEEE Industry application magazine. – 2005. – № 11 (2). – P. 12–20.
2. Valdes M., Papallo T., Premerlani B. Finding fault: locating a ground fault in low-voltage, high-resistance grounded systems via the single-processor concept for circuit protection // IEEE Industry applications magazine. – 2007. – № 13 (5). – P. 24–30.
3. Оценка остаточного ресурса изоляции погружного электродвигателя установок электрических центробежных насосов добычи нефти при воздействиях импульсных перенапряжений / В.В. Сушков, В.В. Тимошкин, И.С. Сухачев, С.В. Сидоров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 10. – С. 74–80.
4. Sukhachev I.S., Gladkikh T.D., Sushkov V.V. An algorithm of the loss risk assessment in the oil production in case of electric submersible motor failure // IEEE conference 2016 dynamics of systems, mechanisms and machines. – Omsk, Russian Federation 15–17 November 2016. – № 7819089.
5. Козлов В.К., Киржацких Е.Р., Гиниятуллин Р.А. Исследование влияния переходного сопротивления на определение места однофазного замыкания на землю в распределительных сетях с изолированной нейтралью // Вестник Чувашии университета. – 2019. – № 1. – С. 39–46.
6. Иванов И.Е. Оценка влияния различных факторов на значения сопротивлений и проводимостей высоковольтной воздушной линии электропередачи // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2017. – № 3. – С. 30–39.
7. Nuthalapati B., Sinha U.K. Location detection of downed or broken power line fault not touching the ground by hybrid AD method // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2019. – V. 14 (2). – P. 483–489.
8. Мишулин Р.Г., Фардиев И.Ш. Физические основы диагностики повреждения воздушных линий распределительных электрических сетей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2004. – № 5–6. – С. 43–47.
9. Влияние режимных и климатических факторов на потери энергии при нестационарных тепловых режимах линий электропередачи / А.Я. Бигун, О.А. Сидоров, Д.С. Осипов, С.С. Гиршин, В.Н. Горюнов, Е.В. Петрова // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. – Т. 5. – № 3. – С. 8–17.
10. Солдатов В.А. Дистанционное определение места повреждения в распределительных электрических сетях 6–10–35 кВ // Вестник Кыргызского национального аграрного университета им. К.И. Скрябина. – 2018. – № 2 (47). – С. 391–397.
11. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.
12. Salim R.H. Extended fault-location formulation for power distribution systems / R.H. Salim, M. Resener, A.D. Filomena, K. Rezende Caino de Oliveira, A.S. Bretas // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2009. – № 24 (2). – P. 508–516.
13. Mirzai M.A., Afzal A.A. A novel fault-locator system; algorithm, principle and practical implementation // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2010. – № 25 (1). – P. 35–46.
14. Ferreira K.J., Emanuel A.E. A noninvasive technique for fault detection and location // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2010. – V. 25 (4). – P. 3024–3034.
15. Ahsae M.G., Sadeh J. New fault-location algorithm for transmission lines including unified power-flow controller // Controller. IEEE Transactions on Power Delivery. – 2012. – V. 27 (4). – P. 1763–1771.
16. Мишулин Р.Г., Закамский Е.В. Обнаружение повреждений в электрических распределительных сетях локационным методом. – Казань: ООО «ИЦ Энергопрогресс», 2004. – 207 с.
17. Федотов А.И., Вагапов Г.В., Чернова Н.В. Определение мест однофазных замыканий на землю воздушных линий электропередачи напряжением 6–35 кВ // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли: материалы Международной научно-практической конференции. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2018. – С. 16–21.
18. Fischer N., Hou D. Methods for detecting ground faults in medium-voltage distribution power systems. – Pullman, WA USA: White paper, 2006. – 15 p.
19. Judd M.R., Davis J.S. How sensitive is your ground fault protection? // IEEE Industry Applications Magazine. – 2006. – № 12 (5). – P. 49–55.
20. Абдуллизанов Р.Э., Зарипова С.Н., Федотов А.И. Работа электропередачи распределительной электрической сети напряжением 6–10 кВ в режиме длинной линии // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2012. – № 1–2. – С. 177–181.

21. Халилов Ф.Х., Хохлов Г.Г. Выбор модели опоры ВЛ 35–220 кВ при анализе грозовых перенапряжений // Труды Кольского научного центра РАН. – 2011. – № 1 (4). – С. 112–118.
22. Ramasamy Natarajan. Computer-aided power system analysis. – New York: Marcel Dekker, Inc., 2002. – 424 p.
23. Carson J.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell System Technical Journal. – 1926. – № 5 (4). – P. 539–554.
24. Гольдштейн В.Г., Сайдова Н.В., Танаев А.К. Математическое моделирование продольных токов смещения и поверхностного эффекта в многослойной земле и проводах линий электропередачи // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2004. – № 30. – С. 170–177.
25. Гольдштейн В.Г., Сайдова Н.В., Танаев А.К. Уточнённая математическая модель поверхностного эффекта в многослойной земле // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2003. – № 19. – С. 129–133.
26. A comprehensive analysis of the effect of frequency-dependent soil electrical parameters on the lightning response of wind-turbine grounding systems / R. Alipio, D. Conceição, A. De Conti, K. Yamamoto, R.N. Dias, S. Visacro // Electric Power Systems Research. – 2019. – V. 175 (105927). – P. 1–8.
27. Mardiana R., Motairy H.A., Su C.Q. Ground fault location on a transmission line using high-frequency transient voltages // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2011. – V. 26 (2). – P. 1298–1299.
28. Абдуллазянов Р.Э., Федотов А.И., Вагапов Г.В. Частотные характеристики воздушной линии // Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах: Труды 16-й Всероссийской научно-методической конференции. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2012. – Т. 2. – С. 133–135.
29. Экспериментальное исследование проявления высших гармоник напряжения на стороне 0,4 кВ потребительских подстанций как метода ранней диагностики однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью / Г.В. Вагапов, А.М. Амосов, Н.В. Чернова, Л.И. Абдуллин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 4. – С. 89–92.

Поступила 16.05.2019 г.

Информация об авторах

Сидоров С.В., старший преподаватель кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.
Сушков В.В., доктор технических наук, профессор кафедры энергетики Нижневартовского государственного университета.
Сухачев И.С., кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

UDC 621.31

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING THE LOCATION OF A SINGLE-PHASE GROUND FAULT OF AN OVERHEAD POWER LINE 6(10) kV VOLTAGE CONSIDERING CLIMATIC FACTORS

Sergey V. Sidorov¹,
sidorovsv@tyuiu.ru

Valery V. Sushkov²,
sushkovvv@gray-nv.ru

Ilya S. Sukhachev¹,
suhachevis@tyuiu.ru

¹ Tyumen Industrial University,
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

² Nizhnevartovsk State University,
56, Lenin street, Nizhnevartovsk, 628600, Russia.

Research relevance. One of the main causes of high accidents and outages in distributed power supply systems of 6(10) kV oil well clusters is damage to overhead power lines due to single-phase ground faults. Widely conducted researches to determine the location of a single-phase ground fault have established a correlation between the determination accuracy and a large number of changing factors, such as operating mode parameters, overhead power line parameters, damage type, transition resistance, soil resistance, and taking their average values, regardless of changing climatic conditions. Rationing of technical means for determining the location of a single-phase ground fault according to instrumental errors without taking into account the methodological component defines the error in determining the location of the damage, reaching 30 %. Thus, the relevant research is aimed at determining the primary parameters of transmission lines and minimizing the methodological error in defining the location of damage to transmission lines considering climatic factors.

The main aim of the research is to improve the accuracy of determining the location of a single-phase ground fault of a 6 (10) kV transmission line with developing a methodology that takes into account the influence of climatic factors.

Research methods. The basic physical processes of propagation of an electromagnetic wave in a power line are taken into account. The main principles of the theory of electrical circuits and the electromagnetic field are used; MATLAB Simulink package algorithms.

Research results. The authors have developed the algorithm that allows determining the distance from 6(10)/0,4 kV substations to the point of single-phase ground fault occurrence in distribution networks of oil well clusters taking into account climatic factors. A simulation model of a 10 kV distribution network supplying oil well clusters considering the dependence of the primary transmission line parameters on climatic factors and soil resistivity, was developed in MATLAB Simulink.

Key words:

Overhead power line, single phase ground fault, modeling, climatic factors, soil resistivity.

The research was carried out within the grant of the President of the RF for state support of young Russian scientists (SP-829.2018.1).

REFERENCES

1. Cosse R.E., Bowen J.E., Combs H.T., Dunn D.G., Hildreth M.A., Pilcher A. Smart industrial substations. *IEEE Industry application magazine*, 2005, no. 11 (2), pp. 12–20.
2. Valdes M., Papallo T., Premierlani B. Finding fault – locating a ground fault in low-voltage, high-resistance grounded systems via the single-processor concept for circuit protection. *IEEE Industry applications magazine*, 2007, no. 13 (5), pp. 24–30.
3. Sushkov V.V., Timoshkin V.V., Sukhachev I.S., Sidorov S.V. Evaluation of submersible electric motor insulation residual resource in oil production electric centrifugal pumps under the influence of impulse overvoltages. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 10, pp. 74–80. In Rus.
4. Sukhachev I.S., Gladkikh T.D., Sushkov V.V. An algorithm of the loss risk assessment in the oil production in case of electric submersible motor failure. *IEEE conference 2016 dynamics of systems, mechanisms and machines*. Omsk, Russian Federation 15–17 November 2016. No. 7819089.
5. Kozlov V.K., Kirzhatskikh E.R., Giniatullin R.A. Investigation of the effect of transient resistance on determining the location of a single-phase ground fault in distribution networks with isolated neutral. *Bulletin of the Chuvash University*, 2019, vol. 1, pp. 39–46. In Rus.
6. Ivanov I.E. Assessment of the influence of various factors on the values of resistances and conductances of a high-voltage overhead power line. *Bulletin of Ivanovo State Energy University*, 2017, no. 3, pp. 30–39. In Rus.
7. Nuthalapati B., Sinha U.K. Location detection of downed or broken power line fault not touching the ground by hybrid AD method. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2019, vol. 14, no. 2, pp. 483–489.
8. Minullin R.G. Fardiev I.Sh. Physical bases of diagnostics of damage to overhead lines of electrical distribution networks. *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems*, 2004, no. 5–6, pp. 43–47. In Rus.
9. Bigun A.Ya., Sidorov O.A., Osipov D.S., Girshin S.S., Goryunov V.N., Petrova E.V. Vliyaniye rezhimnykh i klimaticheskikh faktorov na poteri energii pri nestatsionarnykh teplovykh rezhimakh liniy elektropredachi [Influence of regime and climatic factors on energy losses during non-stationary thermal conditions of power lines]. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*, 2017, vol. 5, no. 3, pp. 8–17.
10. Soldatov V.A. Remote determination of the location of damage in distribution electrical networks 6–10–35 kV. *Bulletin of the Kyrgyz National Agrarian University. K.I. Scriabin*, 2018, vol. 2, no. 47, pp. 391–397. In Rus.

11. RD 153-34.0-20.527-98. *Rukovodyashchie ukazaniya po raschetu tokov korotkogo zamykaniya i vyboru elektrooborudovaniya* [Guidelines for the calculation of short-circuit currents and the selection of electrical equipment]. Moscow, SC ENAS Publ., 2002. 152 p.
12. Salim R.H., Resener M., Filomena A.D., Rezende Caino de Oliveira K., Bretas A. S. Extended Fault-Location Formulation for Power Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, no. 24 (2), pp. 508–516.
13. Mirzai M.A., Afzalian A.A. A novel fault-locator system; algorithm, principle and practical implementation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, no. 25 (1), pp. 35–46.
14. Ferreira K.J., Emanuel A. E. A noninvasive technique for fault detection and location. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, vol. 25, no. 4, pp. 3024–3034.
15. Ahsaei M.G., Sadeh J. New Fault-Location Algorithm for Transmission Lines Including Unified Power-Flow Controller. *Controller. IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, vol. 27 (4), pp. 1763–1771.
16. Minullin R.G., Zakamsky E.V. *Obnaruzhenie povrezhdeniy v elektricheskikh raspredelitelnykh setyakh lokatsionnym metodom* [Damage detection in electrical distribution networks by the location method]. Kazan, Energoprogress Publ., 2004. 207 p.
17. Fedotov A.I., Vagapov G.V., Chernova N.V. Opredelenie mest odnofaznykh zamykaniy na zemlyu vozdukhnykh liniy elektroperedachi napryazheniyem 6–35 kV [Identification of places of single-phase short circuits to earth of overhead power lines with voltage of 6–35 kV]. *Dostizheniya, problemy i perspektivy razvitiya neftegazovoy otrasli. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Achievements, problems and prospects for the development of the oil and gas industry: materials of the International Scientific and Practical Conference]. Almeteyevsk, Almeteyevsk State Oil Institute, 2018. pp. 16–21.
18. Fischer N., Hou D. *Methods for detecting ground faults in medium-voltage distribution power systems*. Pullman, WA USA, White paper, 2006. 15 p.
19. Judd M.R., Davis J.S. How sensitive is your ground fault protection? *IEEE Industry Applications Magazine*, 2006, no. 12 (5), pp. 49–55.
20. Abdullazyanov R.E., Zaripova S.N., Fedotov A.I. Power transmission distribution network voltage of 6–10 kV in long line mode. *News of universities. Energy problems*, 2012, no. 1–2, pp. 177–181. In Rus.
21. Khalilov F.KH., Hochlov G.G. Selection of transmission line 35–220 kV tower model for lightning surges analysis. *Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2011, no. 1 (4), pp. 112–118. In Rus.
22. Ramasamy Natarajan. *Computer-aided power system analysis*. New York, Marcel Dekler, Inc., 2002. 424 p.
23. Carson J.R. Wave propagation in overhead wires with ground return. *Bell System Technical Journal*, 1926, vol. 5, no. 4, pp. 539–554.
24. Goldstein V.G., Saidova N.V., Tanaev A.K. Matematicheskoe modelirovanie prodolnykh tokov smeshcheniya i poverkhnostnogo effekta v mnogosloynoy zemle i provodakh liniy elektroperedachi [Mathematical modeling of longitudinal bias currents and surface effects in multi-layered ground and power lines]. *Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Physics and mathematics*, 2004, no. 30, pp. 170–177.
25. Goldstein V.G., Saidova N.V., Tanaev A.K. Utochnennaya matematicheskaya model poverkhnostnogo effekta v mnogosloynoy zemle [Refined mathematical model of the surface effect in multi-layered ground]. *Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Physics and mathematics*, 2003, no. 19, pp. 129–133.
26. Alipio R., Conceição D., De Conti A., Yamamoto K., Dias R.N., Visacro S. A comprehensive analysis of the effect of frequency-dependent soil electrical parameters on the lightning response of wind-turbine grounding systems. *Electric Power Systems Research*, 2019, vol. 175 (105927), pp. 1–8.
27. Mardiana R., Motairi H.A., Su C.Q. Ground fault location on a transmission line using high-frequency transient voltages. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, vol. 26 (2), pp. 1298–1299.
28. Abdullazyanov R.E., Fedotov A.I., Vagapov G.V. Chastotnyye kharakteristiki vozdushnoy linii [Frequency characteristics of the overhead line]. *Fundamental'nyye issledovaniya i innovatsii v natsional'nykh issledovatel'skikh universitetakh: Trudy 16-y Vserossiyskoy nauchno-metodicheskoy konferentsii* [Proc. of the 16th All-Russian Scientific and Methodological Conference "Fundamental Research and Innovation in National Research Universities"], St. Petersburg, Polytechnic University Press, 2012, vol. 2, pp. 133–135.
29. Vagapov G.V., Amosov A.M., Chernova N.V., Abdullin L.I. Experimental study of the manifestation of higher voltage harmonics on the 0,4 kV side of consumer substations as a method for the early diagnosis of single-phase ground faults in networks with isolated neutral. *Proceedings of higher educational institutions. Electromechanics*, 2014, no. 4, pp. 89–92. In Rus.

Received: 16 May 2019.

Information about the authors

Sergey V. Sidorov, senior lecturer, Tyumen Industrial University.

Valery V. Sushkov, Dr. Sc., professor, Nizhnevartovsk State University.

Ilya S. Sukhachev, Cand Sc., senior lecturer, Tyumen Industrial University.

УДК 622.276.63

ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ ПЛАСТА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ

Дорфман Михаил Борисович¹,
m.dorfman@narfu.ru

Сентемов Андрей Алексеевич¹,
sentemov.a.a@yandex.ru

¹ Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,
Россия, 163002, г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17.

Актуальность. В настоящее время большой объем исследований по оптимизации интенсификации работы скважин связан с изучением влияния скорости закачки кислотных составов на характер образования каналов и определение оптимальных объемов закачки. Важным фактором является первоначальное состояние призабойной зоны скважины: первичная проницаемость; характер насыщения пласта пластовыми флюидами; объем внедрения и степень загрязнения буровой жидкостью.

Цель: оценка влияния начальных фильтрационных характеристик призабойной зоны скважины на эффективность соляно-кислотной обработки.

Методы. Были проведены опыты моделирующие соляно-кислотную обработку. Были использованы образцы с различными коллекторскими свойствами. В ряде экспериментов моделировалось загрязнение образцов буровым раствором.

Результаты. Эффективность кислотной обработки образцов низкопроницаемой породы выше, чем в опытах с высокопроницаемыми кернами. В низкопроницаемых образцах сквозные каналы образуются при прокачке большего количества поровых объемов кислотного раствора, чем в высокопроницаемых. Это связано с тем, что раствор преимущественно расходуется на формирование новых каналов. Низкопроницаемые образцы имеют большую эквивалентную площадь образовавшихся каналов, что подтверждает большую эффективность кислотной обработки низкопроницаемых кернах. При снижении проницаемости коллектора вследствие загрязнения буровой жидкостью воздействие кислотного раствора происходит аналогично воздействию на незагрязненный низкопроницаемый коллектор. Полученные результаты могут быть использованы при соляно-кислотной обработке на промысле с высокой вероятностью положительного эффекта. В дальнейшем необходимо дать экономическую оценку с учётом времени прорыва кислоты и необходимого количества соляной кислоты.

Ключевые слова:

Соляно-кислотная обработка, число Дамкеллера, пористость, проницаемость, скорость реакции, керн.

Введение

Главный процесс, протекающий при соляно-кислотной обработке (СКО) скважин, – растворение кислотой карбонатных пород коллектора. Кислотный состав, проникая в поровые каналы, расширяет их, образуя узкие длинные каверны. После СКО продукты реакции относительно легко удаляются из призабойной зоны пласта (ПЗС) при вызове притока, так как они растворимы в воде. Задача СКО – увеличение проницаемости системы каналов и микротрещин в ПЗС. Это приводит к увеличению дебита или приемистости скважины.

В настоящее время многие исследования, проводимые с целью оптимизации операций по интенсификации работы скважины, направлены на изучение кинетики реакции соляно-кислотных составов с карбонатными породами. Эти исследования связаны с изучением влияния скорости закачки кислотных составов, характера образования каналов, определение оптимальных объемов закачки и других параметров [1–11].

Стоит отметить, что существенное значение на эффективность соляно-кислотной обработки оказывает первоначальное состояние призабойной зоны пласта: первичная проницаемость; характер насыщения пласта пластовыми флюидами; объем внедрения и степень загрязнения буровой жидкостью. С целью определить влияние первоначальных фильтрацион-

ных характеристик ПЗС на эффективность СКО был проведен ряд экспериментов по воздействию кислотным раствором на карбонатный керн.

Экспериментальная часть

Эксперименты проводили на установке постоянного расхода, переоборудованной для работы с соляно-кислотными растворами. Применялись контейнеры и манифольд, изготовленные из нержавеющей стали. Для фиксации колебаний давления при фильтрации жидкостей применялся самопишущий манометр. Для замеров объема жидкостей, прошедших через образец, а также для предотвращения выбросов кислоты применялась автоматическая бюретка. Давление гидрообжима поддерживалось 10–20 МПа.

Всего было проведено шесть опытов по вытеснению пластовых флюидов из образцов известняка (карбонатность 80–100 %). В опытах № 1 и 2 первоначально моделировалось загрязнение ПЗС буровым раствором на основе 0,15 % раствора полиакриламида (ПАА). После чего на керн воздействовали соляно-кислотным раствором. В опытах № 3 и 5 воздействовали на высокопроницаемые образцы, насыщенные моделями пластовой воды и нефти соответственно. В опытах № 4 и 6 аналогичное воздействие производили на низкопроницаемые образцы керна.

В качестве модели пластовой воды использовали раствор NaCl плотностью 1100 кг/м³ (опыты № 1, 3, 4).

В качестве модели нефти – керосин плотностью 796 кг/м³ и вязкостью 1,24 мПа·с (опыты № 2, 5, 6).

Все флюиды прокачивались в одном направлении. В связи с малыми размерами образцов керна изменение проницаемости в таких образцах незначительно зависит от направления фильтрации. Поэтому изменение направления фильтрации не окажет существенного влияния на результаты. План эксперимента представлен в табл. 1.

Таблица 1. Дизайн эксперимента

Table 1. Design of the experiment

№ опыта experiment no.	1	2	3	4	5	6
Коэффициент пористости Porosity	0,08	0,09	0,09	0,07	0,010	0,06
Коэффициент проницаемости, мкм ² Permeability, μm ²	0,07	0,28	1,5	0,2	1,62	0,15
Модель насыщающего флюида Saturating fluid model	вода water	нефть oil	вода water	вода water	нефть oil	нефть oil
Образец загрязнён моделью бурового раствора Sample contaminated with mud model	+	+	–	–	–	–
Тип образца керна Type of core sample	–	–	Высокопроницаемый Highly permeable	Низкопроницаемый Low permeable	Высокопроницаемый Highly permeable	Низкопроницаемый Low permeable

В опытах № 1 и 2 первоначально определяли гидродинамическую подвижность насыщающего керна раствора при покачивании через образец с постоянной скоростью 1–3 поровых объемов пластовой жидкости до стабилизации. После чего прокачивали не менее 3 поровых объемов модели бурового раствора. Во всех опытах поддерживали постоянную скорость фильтрации, расход жидкости составлял 0,135 см³/мин. На следующей стадии подключали к керна-держателю контейнер с 12 % соляной кислотой и прокачивали кислоту при том же расходе до прорыва кислоты через образец и полного падения перепада давления на образце. Расход закачки кислоты подбирали таким образом, чтобы градиент давления не превышал градиент давления гидроразрыва. Во всех опытах фиксировали перепад давления с помощью образцовых манометров. Объем прокаченной жидкости определяли с помощью автоматической бюретки. По полученным данным, согласно закону Дарси, определяли гидродинамическую подвижность (к/μ) фильтрующихся через образец жидкостей.

В опытах № 3, 5 использовали высокопроницаемые образцы керна. Первоначально прокачивали модель пластовой воды и модель нефти соответственно. Далее проводили воздействие кислотным раствором и

проводили прокачку первоначальной жидкостью. Опыты № 4, 6 проводили аналогично опытам № 3, 5, только с использованием низкопроницаемых образцов керна. Результаты опытов приведены на рис. 1–4.

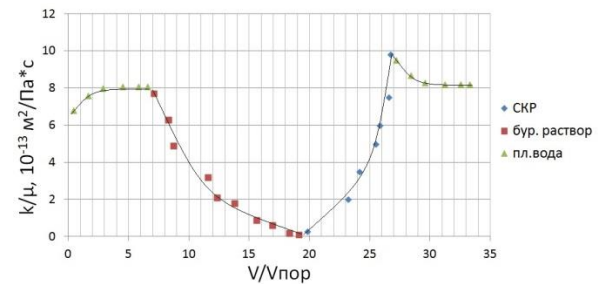


Рис. 1. Зависимость подвижности при фильтрации модели бурового раствора, пластовой воды и соляно-кислотного раствора (опыт № 1)

Fig. 1. Dependence of hydrodynamic mobility in filtration model of the drilling fluid, produced water and hydrochloric acid solution (experiment no. 1)

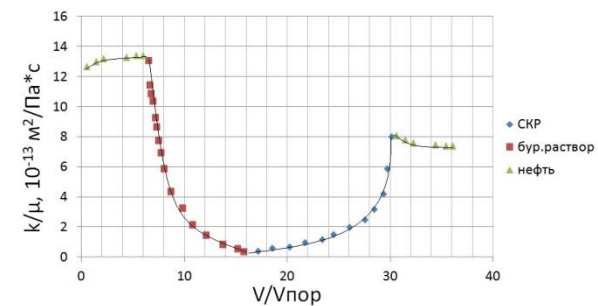


Рис. 2. Зависимость подвижности при фильтрации модели бурового раствора, нефти и соляно-кислотного раствора (опыт № 2)

Fig. 2. Dependence of hydrodynamic mobility in filtration model of the drilling fluid, oil and hydrochloric acid solution (experiment no. 2)

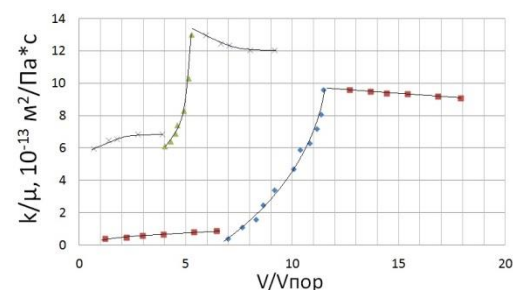


Рис. 3. Зависимость подвижности при фильтрации модели пластовой воды и соляно-кислотного раствора (без штриха высокопроницаемый образец, опыт № 3; со штрихом низкопроницаемый образец, опыт № 4)

Fig. 3. Dependence of hydrodynamic mobility when filtering a model of produced water and hydrochloric acid solution (without a stroke, a highly permeable sample, experiment no. 3; with a stroke, a low-permeability sample, experiment no. 4)

При покачивании через образец модели бурового раствора гидродинамическая подвижность снижается более чем в 10 раз по сравнению с начальной, что

объясняется адсорбцией пористой средой молекул полимера и уменьшением сечения каналов фильтрации, а также образованием в процессе фильтрации гелеобразного уплотняющего слоя ПАА на входном торце образца.

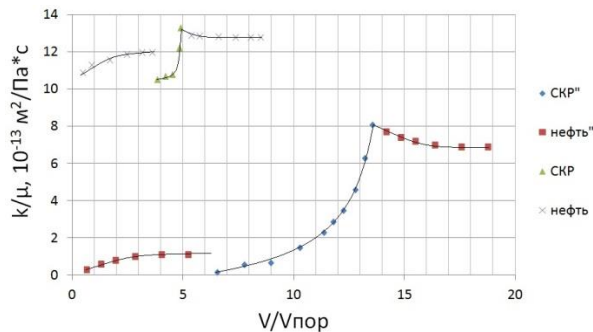


Рис. 4. Зависимость подвижности при фильтрации модели нефти и соляно-кислотного раствора (без штриха высокопроницаемый образец, опыт № 5; со штрихом низкопроницаемый образец, опыт № 6)

Fig. 4. Dependence of hydrodynamic mobility when filtering a model of oil and hydrochloric acid solution (without a stroke, a highly permeable sample, experiment no. 5; with a stroke, a low-permeability sample, experiment no. 6)

Такое снижение подвижности моделирует временную изоляцию пласта при загрязнении буровым раствором. Восстановление и увеличение проницаемости керна проводили 12 % раствором соляной кислоты. Как видно из рис. 1–4, при прокачке кислоты гидродинамическая подвижность постепенно увеличивалась и через некоторое время резко возрастала за счёт образовавшегося одного или нескольких сквозных каналов растворения. Причем, судя по форме линий, процесс взаимодействия кислоты с образцами, насыщенными моделями пластовой воды и нефти, различался. На рис. 1 крутой начальный подъем графика гидродинамической подвижности при закачке кислоты объясняется малым взаимным растворением кислотного и бурового составов. А на рис. 2 более пологий начальный подъем линии, вероятно, соответствует пробковому вытеснению двух не смешивающихся жидкостей.

Результаты и их обсуждение

По результатам экспериментов проведена оценка эффективности восстановления подвижности после обработки соляно-кислотным раствором. Как видно из рис. 5, степень возрастания подвижности тем выше, чем ниже первоначальная проницаемость, независимо от того, был ли это естественный низкопроницаемый керн или ухудшение коллекторских свойств произошло вследствие воздействия бурового раствора.

Отмечается также, что в водонасыщенном керне эффект роста подвижности выше по сравнению с нефтенасыщенным, что объясняется различным характером смачиваемости.

Эффективность кислотного воздействия оценивается и по необходимому количеству прокачиваемых поровых

объемов кислотного раствора для создания каналов. Впервые на это было обращено внимание в работах [10, 11]. По результатам проведенных опытов получено, что с ростом проницаемости относительное количество кислотного раствора, необходимое для создания сквозных каналов, снижается (рис. 6). Сравнение абсолютных объемов показывает, что сохраняется тенденция зависимости объемов соляно-кислотного раствора для образования сквозных каналов от проницаемости, как и для относительных объемов (рис. 7).

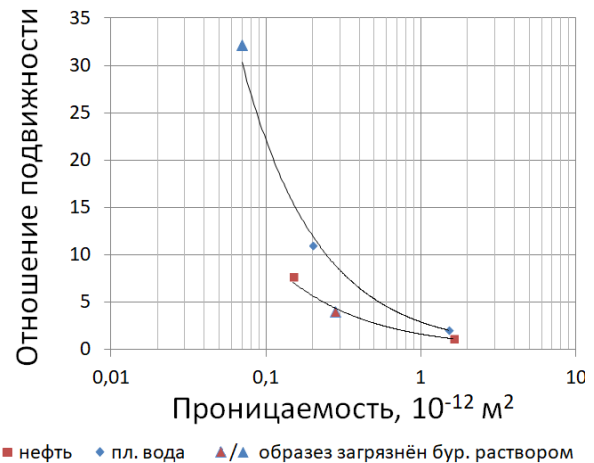


Рис. 5. Зависимость падения подвижности при обработке кислотным раствором от проницаемости

Fig. 5. Dependence of hydrodynamic mobility decrease during acidizing on permeability

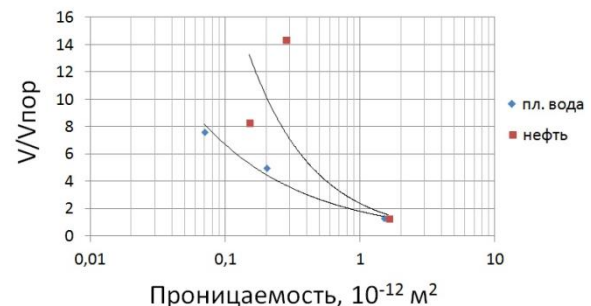


Рис. 6. Относительный объем кислотного раствора для образования сквозного канала

Fig. 6. Relative volume of acid solution for formation of a through channel

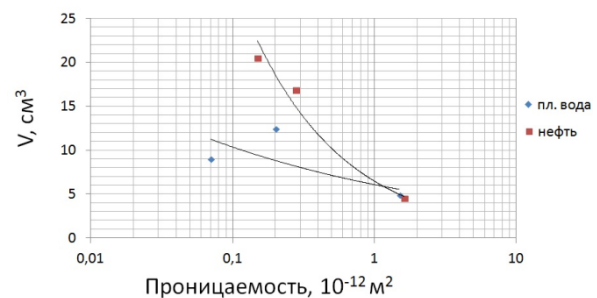


Рис. 7. Объем кислотного раствора для образования сквозного канала

Fig. 7. Volume of acidic solution for formation of a through channel

В работах [10–12] установлена зависимость прокаченных объемов ($V/V_{пор}$) от числа Дамкеллера, которое описывается уравнением (1):

$$Da = \frac{Sk}{Q}, \quad (1)$$

где S – эквивалентная площадь сквозных каналов, см^2 ; k – общая константа скорости реакции, $\text{см}^3/\text{мин}$; Q – расход закачиваемой кислоты, $\text{см}^3/\text{мин}$.

Для оценки эквивалентной площади сквозных каналов можно использовать зависимость объема прокачанного раствора кислоты до образования сквозного канала от обратного числа Дамкеллера, полученную экспериментально для подобных условий (рис. 8). Опыты, проведенные в ходе работы, происходили на режиме, относящемся к левой части графика ($1/Da < 2,45$). Правой же области ($1/Da > 2,45$) соответствуют режимы с относительно высокой скоростью подвода реагента, что в реальных условиях достигается при давлении, выше давления гидроразрыва [10].

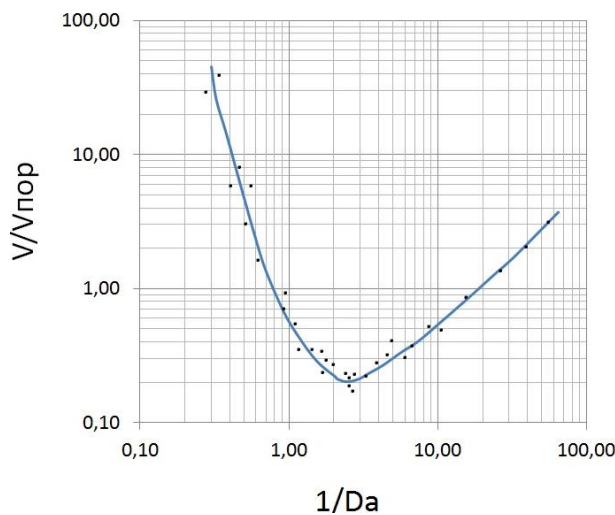


Рис. 8. Зависимость объема прокачанного раствора кислоты для прорыва на выходе из образца от обратного числа Дамкеллера

Fig. 8. Dependence of acid solution volume for a breakthrough on the inverse Damkeller number

Таблица 2. Результаты обработки

Table 2. Processing results

№ Опыта Experiment no.	1	2	3	4	5	6
$V/V_{пор}/V/V_{пор}$	7,63	14,36	1,38	5,02	1,30	8,29
$1/Da$	0,43	0,38	0,68	0,48	0,74	0,46
Da	2,33	2,63	1,4788	2,08	1,35	2,17
$S, \text{см}^2/S, \text{см}^2$	1,374	1,704	0,216	0,495	0,190	0,516

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов С.М., Андреев О.В., Киселев К.В. Влияние гелирующих агентов на реологические и фильтрационные характеристики соляной кислоты // Известия вузов. Нефть и газ. – 2014. – № 2. – С. 77–82.
2. Смирнов А.С., Федоров К.М., Шевелев А.П. О моделировании кислотного воздействия на карбонатный пласт // Известия РАН. Серия: МЖГ. – 2010. – № 5. – С. 114–121.
3. Солодовников А.О., Андреев О.В., Киселев К.В. Формирование червоточин кислотообразующими реагентами в модели

Исходя из объема прокачанного кислотного раствора до образования сквозного канала по графику (рис. 8), были определены число Дамкеллера и эквивалентная площадь поровых каналов для каждого опыта. Результаты обработки приведены в табл. 2 и на рис. 9.

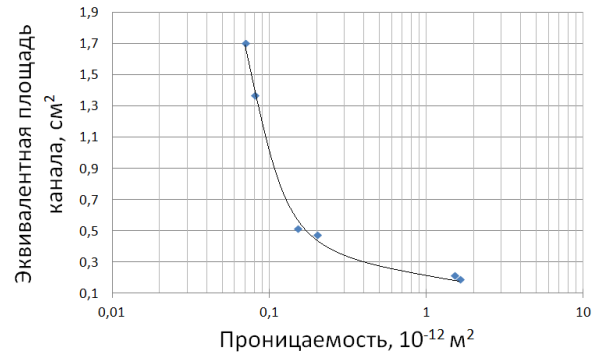


Рис. 9. Эквивалентная площадь сквозного канала в зависимости от первоначальной проницаемости

Fig. 9. Through channel equivalent area depending on initial permeability

Как видно из рис. 9, сквозные каналы, образующиеся при меньшей проницаемости, имеют большую эквивалентную площадь. Это связано с тем, что существует корреляция между проницаемостью и радиусом поровых каналов. Радиус каналов высокопроницаемых образцов больше. Поэтому в высокопроницаемых коллекторах большая часть кислотного раствора затрачивается на расширение уже существующих поровых каналов, а образование новых происходит с меньшей эффективностью в сравнении с низкопроницаемыми коллекторами [13–20].

Заключение

При равных условиях коллекторские свойства образцов керна с низкой проницаемостью улучшились в большей степени в сравнении с высокопроницаемыми. При обработке низкопроницаемых коллекторов требуется относительно больший объем соляно-кислотного раствора. Это обусловлено тем, что объем кислоты преимущественно затрачивается на образование новых каналов, а не на расширение уже существующих. Эквивалентная площадь позволяет оценить эффективность образования новых сквозных каналов. У низкопроницаемых образцов эквивалентная площадь значительно выше, что подтверждает большую эффективность кислотной обработки низкопроницаемых кернов.

карбонатного пласта // Известия вузов. Нефть и газ. – 2012. – № 6. – С. 59–63.

4. Солодовников А.О., Андреев О.В., Киселев К.В. Влияние скорости закачки растворов кислотообразующих реагентов на структуру каналов фильтрации // Башкирский химический журнал. – 2013. – № 1. – С. 135–137.
5. Andreev O.V., Antonov S.M., Kiselev K.V. Kinetics of reaction between gelled HCl and dolomite $\text{Ca}_{1,16}\text{Mg}_{0,84}(\text{CO}_3)_2$ and filtration of gelled acid in a reservoir core sample // International Journal of Oil, Gas and Coal Technology. – 2017. – V. 14. – № 4. – P. 369–379.

6. Van Hong L., Ben H. A preliminary screening and characterization of suitable acids for sandstone matrix acidizing technique: a comprehensive review Ministry of Higher Education // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2019. – V. 9 (1). – P. 753–778.
7. Rabbani E., Davarpanah A., Memariani M. An experimental study of acidizing operation performances on the wellbore productivity index enhancement // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2018. – V. 8 (4). – P. 1243–1253.
8. Combination flooding technology used in high temperature, high salinity heavy oil reservoirs of Shengli oilfield / J. Shi, X. Cao, H. Wang, S. Guo, X. Xia // *Special oil and gas reservoirs*. – 2018. – V. 25. – № 4. – P. 129–133.
9. Herianto M. Improving effective porosity of rocks with matrix acidizing stimulation on sand stone formation // *The International Journal of Innovative Research and Development*. – 2018. – V. 7 (9). – P. 282–292.
10. Fredd C.N., Fogler H.S. Influence of transport and reaction on wormhole formation in porous media // *American Institute of Chemical Engineers Journal*. – 1998. – V. 44. – № 9. – P. 1933–1949.
11. Fredd C.N., Fogler H.S. The kinetics of calcite dissolution in acetic acid solutions // *Chemical Engineering Science*. – 1998. – V. 53. – № 22. – P. 38–63.
12. Fredd C.N., Fogler H.S. Alternative stimulation fluids and their impact on carbonate acidizing // *Society of Petroleum Engineers Journal*. – 1998. – № 3. – P. 34–41.
13. Барковский Н.Н., Плотников В.В., Якимов О.И. Комплексные лабораторные исследования технологии кислотной обработки терригенного и карбонатного коллекторов, в том числе с применением самоотклоняющихся кислотных составов // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. – 2016. – № 7. – С. 36–43.
14. Гаджиев Г.К. Повышение эффективности обработки призабойной зоны пласта микроэмульсиями // *Нефтепромышленное дело*. – 2016. – № 2. – С. 33–35.
15. Андреев О.В., Антонов С.М., Киселев К.В. Взаимодействие вязких растворов HCl с кальцитом и доломитом в условиях высокой минерализации // *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета*. – 2016. – Т. 3. – № 61. – С. 321–330.
16. Медведева Н.А., Уваров С.Г., Береговой А.Н., Амерханов М.И., Рахимова Ш.Р., Зиятдинова Р.Ш., Андриянова О.М., Лакомкин В.Н. Методика выбора кислотной композиции для проведения успешной обработки низкопроницаемых карбонатных и терригенных коллекторов // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. – 2015. – № 5. – С. 21–24.
17. Мельникова Е.В., Нифантов В.И. Повышение эффективности освоения скважин на месторождениях Восточной Сибири // *Территория нефтегаз*. – 2015. – № 2. – С. 19–25.
18. Комплексный подход и опыт проведения кислотной обработки в сложных условиях карбонатных коллекторов Волго-Уральского региона / Р. Каюмов, А. Конченко, А. Клубин, О. Леванюк, К. Бурдин, А. Чикин, Е. Никульшин // *Время колтюбинга*. – 2015. – № 1. – С. 24–39.
19. Phase Diagram of the Y–Y₂Se₃ system, enthalpies of phase transformations / O.V. Andreev, V.B. Kharitontsev, A.A. Polkovnikov et al. // *Journal of Solid State Chemistry*. – 2015. – V. 230. – P. 186–190.
20. Совершенствование технологии кислотных обработок / А.А. Хакимов, Р.И. Сатаров, А.В. Качурин, А.В. Акимкин // *Нефтяное хозяйство*. – 2012. – № 3. – С. 53–54.

Поступила 24.01.2020 г.

Информация об авторах

Дорфман М.Б., кандидат технических наук, доцент кафедры бурения скважин, разработки нефтяных и газовых месторождений Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова.

Сентемов А.А., аспирант кафедры бурения скважин, разработки нефтяных и газовых месторождений Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова.

UDC 622.276.63

INFLUENCE OF RESERVOIR PROPERTIES OF THE BOTTOMHOLE ZONE ON ACIDIZING EFFICIENCY

Mikhail B. Dorfman¹,
m.dorfman@narfu.ru

Andrey A. Sentemov¹,
sentemov.a.a@yandex.ru

¹ Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,
17, Severnaya Dvina embankment, Arkhangelsk, 163002, Russia.

Relevance. Currently, a large amount of research is directed on optimization of well operation. It is associated with the study of the effect of injection rate of acidizing on the nature of formation of channels and determination of optimal injection volumes. One of the important factors is the initial state of the bottomhole zone: permeability, saturation of reservoir fluids, contaminate of the drilling fluid.

The main aim of this work is to assess the effect of the initial filtration characteristics of the bottomhole zone on acidizing efficiency.

Methods. Several experiments were performed simulating the acidizing. Samples with different reservoir properties were used. A number of experiments modeling contamination of samples with drilling mud were performed.

Results. It was found that under equal conditions the core samples with low permeability has better efficiency with acidizing in comparison with highly permeability cores. Larger amount of hydrochloric acid solution is required to create breakthrough channels in low-permeable reservoirs. The equivalent surface of the channels allows evaluating the effectiveness of acidizing. The equivalent surface of acid-formed channels is higher for the samples with low permeability. The effect of acidizing for cores contaminated with the drilling fluid and low-permeable cores is equal. The results obtained can be used in acidizing in the field with a high probability of a positive effect. In the future, it is necessary to give an economic assessment, taking into account the time of formation of breakthrough channels and the required amount of HCl acid.

Key words:

Acidizing, Damkeller number, porosity, permeability, reaction rate, core sample.

REFERENCES

- Antonov S. M., Andreev O. V., Kiselev K. V. Influence of gelling agents on filtration characteristics of hydrochloric acid. *The Journal «Oil and Gas Studies»*, 2014, no. 2, pp. 77–82. In Rus.
- Smirnov A.S., Fedorov K.M., Shevelev A.P. O modelirovani kislotoznoy vozdeystviya na karbonatny plast [About modeling of acid effects on carbonate formation]. *Fluid Dynamics*, 2010, no. 5, pp. 114–121.
- Solodovnikov A.O., Andreev O.V., Kiselev K.V. Generation of wormholes by acid-forming reagents in the carbonate reservoir model. *Oil and Gas Studies*, 2012, no. 6, pp. 59–63. In Rus.
- Solodovnikov A.O., Andreev O.V., Kiselev K.V. Influence of pumping rate of acid forming reagents solutions on channel filtration structure. *Bashkir Chemical Journal*, 2013, no. 1, pp. 135–137. In Rus.
- Andreev O.V., Antonov S.M., Kiselev K.V. Kinetics of reaction between gelled HCl and dolomite $\text{Ca}_{1.16}\text{Mg}_{0.84}(\text{CO}_3)_2$ and filtration of gelled acid in a reservoir core sample. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, 2017, vol. 14, no. 4, pp. 369–379.
- Hong L. Van, Ben H. A preliminary screening and characterization of suitable acids for sandstone matrix acidizing technique: a comprehensive review Ministry of Higher Education. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2019, vol. 9 (1), pp. 753–778.
- Rabbani E., Davarpanah A., Memariani M. An experimental study of acidizing operation performances on the wellbore productivity index enhancement. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2018, vol. 8 (4), pp. 1243–1253.
- Shi J., Cao X., Wang H., Guo S., Xia X. Combination flooding technology used in high temperature, high salinity heavy oil reservoirs of Shengli oilfield. *Special oil and gas reservoirs*, 2018, vol. 25, no. 4, pp. 129–133.
- Herianto M. Improving effective porosity of rocks with matrix acidizing stimulation on sand stone formation. *The International Journal of Innovative Research and Development*, 2018, vol. 7 (9), pp. 282–292.
- Fredd C.N., Fogler H.S. Influence of transport and reaction on wormhole formation in porous media. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 1998, vol. 44, no. 9, pp. 1933–1949.
- Fredd C.N., Fogler H.S. The kinetics of calcite dissolution in acetic acid solutions. *Chemical Engineering Science*, 1998, vol. 53, no. 22, pp. 38–63.
- Fredd C.N., Fogler H.S. Alternative stimulation fluids and their impact on carbonate acidizing. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1998, no. 3, pp. 34–41.
- Barkovsky N.N., Plotnikov V.V., Yakimov O.I. Kompleksnye laboratornye issledovaniya tekhnologii kislotoy obrabotki terri-gennogo i karbonatnogo kollektorov, v tom chisle s primeneni-em samootklonyayushchikhsya kislotoykh sostavov [Integrated laboratory studies of the technology of acid treatment of terrigenous and carbonate reservoirs, including using self-diverting acid formulations]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2016, no. 7, pp. 36–43.
- Gadzhiev G.K. Povyshenie effektivnosti obrabotki prizaboynoy zony plasta mikroemulsiyami [Improving the efficiency of the bottomhole formation zone treatment with microemulsions]. *Neftepromyslovoe delo*, 2016, no. 2, pp. 33–35.
- Andreev O.V. The interaction of viscous solutions of HCl with calcite and dolomite in conditions of high mineralization. *Vestnik of Saint-Petersburg University*, 2016, vol. 3, no. 61, pp. 321–330. In Rus.
- Medvedeva N.A., Uvarov S.G., Beregovoy A.N., Amerkhanov M.I., Rakhimova S.R., Ziatdinova R.S., Andriyanova O.M., Lakomkin V.N. Metodika vybora kislotoy kompozitsii dlya provedeniya uspekhnoy obrabotki nizkopronitsaemykh karbonatnykh i terri-gennykh kollektorov [Method for selecting an acid composition for successful treatment of low-permeable carbonate and terrigenous reservoirs]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*, 2015, no. 5, pp. 21–24.
- Melnikova E.V., Nifantov V.I. Efficiency increase of well development at Eastern Siberia deposits. *Oil and Gas Territory*, 2015, no. 2, pp. 19–25. In Rus.
- Kayumov R., Konchenko A., Klyubin A., Levanyuk O., Burdin K., Chikin A., Nikulshin E. An integrated approach and the experience of acidizing in the challenging Environment of carbonate reservoirs of the Volga-Ural region. *Coiled Tubing Times*, 2015, no. 1, pp. 24–39. In Rus.

19. Andreev O.V., Kharitontsev V.B., Polkovnikov A.A. Phase diagram of the Y–Y₂Se₃ system, enthalpies of phase transformations. *Journal of Solid State Chemistry*, 2015, vol. 230, pp. 186–190.
20. Khakimov A.A., Satarov R.I., Kachurin A.V., Akimkin A.V. Acid treatment technological advancement. *Oil Industry*, 2012, no. 3, pp. 53–54. In Rus.

Received: 24 January 2020.

Information about the authors

Mikhail B. Dorfman, Cand. Sc., associate professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov.

Andrey A. Sentemov, postgraduate student, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov.

УДК 622.24.051.64

РАЗРАБОТКА ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С РЕЗЦАМИ PDC

Нескоромных Вячеслав Васильевич¹,
sovair@bk.ru

Попова Марина Сергеевна¹,
alleniram83@mail.ru

Парахонько Елена Валерьевна¹,
89233499156@mail.ru

¹ Сибирский федеральный университет,
Россия, 660095, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95.

Актуальность. При разработке инструмента для бурения скважин различного назначения основными критериями оптимизации являются повышение механической скорости и его ресурса. Особенно это актуально для породоразрушающего инструмента, предназначенного для бурения в изменяющихся горно-геологических условиях глубоких и наклонных скважин. В последнее время все чаще поднимается вопрос повышения универсальности и проходки бурового инструмента. Возможности в области создания искусственных материалов позволили создать современные буровые инструменты, обладающие выдающимися характеристиками. А опыт научных исследований закономерностей работы бурового инструмента показал, что конструктивные параметры инструмента оказывают влияние на его производительность. Разработка нового бурового инструмента ведется с учетом возможностей производства и опыта последних научных исследований. В настоящее время наиболее востребованным является инструмент, армированный резцами PDC. Аномальный износ режущей кромки резцов PDC является причиной преждевременной отработки инструмента. Возможность вращения резцов PDC вокруг своей оси создает условия их равномерного износа и как следствие приводит к увеличению ресурса бурового инструмента.

Цель: разработка высоко ресурсного породоразрушающего инструмента.

Объекты: причины повышения износа инструмента; конструктивные параметры инструмента с вращающимися при бурении резцами.

Методы: аналитические исследования, анализ.

Результаты. Повышение ресурса породоразрушающего инструмента возможно при обеспечении вращения резцов PDC. Возможность размещения максимального числа вращающихся резцов достигается углом наклона торцевой поверхности долота в 45°. При этом достигается максимальное значение усилия прижатия и максимальное совпадение плоскости действия углубления долота в скважине. Для обеспечения активного вращения резцов при бурении следует повышать фрикционные характеристики их боковой поверхности.

Ключевые слова:

Породоразрушающий инструмент, резцы PDC, износ резца, проскальзывание резца, буровой инструмент, повышение ресурса, крутящий момент, передаваемый на резец.

Введение

Основной проблемой строительства скважин различного назначения является необходимость их бурения в разнообразных горно-геологических условиях с высокой механической скоростью и ресурсом. Вопрос повышения ресурса и универсальности бурового инструмента крайне актуален, особенно при проходке протяженных глубоких скважин и скважин с горизонтальным окончанием. Современные технологии в области производства сверхтвердых искусственных и композитных материалов позволили создать современные буровые инструменты, обладающие выдающимися характеристиками [1–21].

Для твердых горных пород это долота и коронки с импрегнированной породоразрушающей матрицей, насыщенной мелкими искусственными алмазами и оснащенные сверхтвердыми алмазосодержащими вставками, что позволяет создать универсальный и высокоресурсный буровой инструмент [1, 9, 12–15].

Для эффективного бурения горных пород средней твердости в настоящий момент наиболее высокие результаты получены при использовании долот и коронок с термостойкими (TSP) резцами типа PDC

(polycrystalline diamante cutters). Использование долот с термостойкими резцами PDC позволяет получить высокие результаты [2–4, 10, 11, 17, 18, 20, 21].

В 2012 г. в Эвенкии успешно прошла отработка матричного PDC долота 215,9 мм серии *Tornado* производства компании DDI, США. Бурение осуществлялось винтовым гидродвигателем и ротором. Проходка на долото при средней скорости бурения 20 м/ч составила 1150 м до первой реставрации, максимальная скорость бурения достигала 40 м/ч [6].

В настоящее время наиболее востребованными буровыми инструментами при бурении нефтяных и газовых скважин в мягких породах, при наличии в них прослоев твердых горных пород, и породах средней твердости являются долота и расширители с резцами PDC. В геологоразведочном бурении ведущими компаниями значительный объем буровых работ также выполняется коронками с резцами типа PDC [3, 10, 11, 17, 18, 20].

Основными достоинствами бурового инструмента с резцами PDC являются высокие ресурс и механическая скорость бурения, повышение выхода керна [2–4, 10, 11, 17, 18, 20, 21]. При использовании в породо-

разрушающем инструменте резцов PDC особое значение имеет размещение резцов [2–4, 10, 11, 17, 18]. Резцы PDC имеют круглую цилиндрическую форму, удобную для расположения их в инструменте под необходимым углом и по заданной схеме, которая существенно влияет на эффективность разрушения породы (рис. 2). Известные конструкции породоразрушающего инструмента с резцами типа PDC [2–4, 7, 17, 20], как правило, состоят из корпуса с зафиксированными в рабочей части резцами PDC. Такие долота и коронки отличаются ремонтопригодностью, износостойкостью, высокими показателями механической скорости бурения. Например, PDC долота, в отличие от шарошечных, разрушают породу резанием, что намного эффективнее дробления–скалывания при разрушении горных пород средней твёрдости [6, 10, 18].

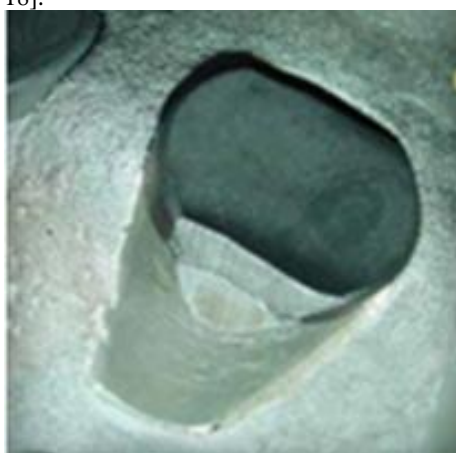


Рис. 1. Характер износа фиксированного резца PDC
Fig. 1. Wear pattern of the fixed PDC cutter



a/a



b/b

Рис. 2. Резцы ONYX 360 компании Smiht Bits: а) в долоте; б) до установки в долото в собранном и разобранном виде

Fig. 2. Smiht Bits ONYX 360 incisors: a) in drill bit; b) before installation in the drill bit assembled and disassembled

Методика

Исследование износа долот с резцами PDC показывают, что резцы изнашиваются только фрагментами. К моменту снятия долот с работы поверхность резцов изношена в основном не более чем на четверть. При работе фиксированного резца PDC изнашиванию подвергается только нижняя, обращенная к забою, режущая кромка (рис. 1). По данным компании Smiht Bits, более 60 % долот типа PDC выходят из строя именно из-за сколов и износа нижней кромки резцов.

Компания Smiht Bits провела анализ причины выхода из строя и износа долот PDC с целью повышения ресурса бурового инструмента, учитывая отмеченную особенность износа пластин PDC, разработала долота с резцами ONYX 360 и ONYX II. Такие резцы установлены в наиболее нагруженных частях торца долота с возможностью вращения в процессе бурения на 360° (рис. 2).

При бурении долотами ONYX 360 по абразивному песчанику рост ресурса долота составил 57 %, а скорости бурения – 26 % [6, 8].

Сравнительные испытания резцов ONYX на износ показали, что по сравнению с фиксированными резцами аналогичной формы и размеров данные резцы существенно повышают возможности эффективной работы по разрушению горной породы. Например, установлено, что резцы ONYX могут выполнить 600 проходов по породе, тогда как фиксированные резцы – только около 100.

Исследование износа резцов долот типа PDC компанией Smiht Bits показало, что максимальный износ резцов долота происходит на интервале удаления от геометрического центра долота, который близок к внешнему диаметру долота, а точнее на интервале $0,77R_n$ от центра долота (рис. 3).

Аномальный износ связан с наиболее высокими сопротивлениями со стороны забоя, вызванными наибольшей и возрастающей от центра вращения долота к периферии линейной скоростью резцов долота.

Исходя из схемы размещения резцов, предложенной компанией Smiht Bits, на режущей лопасти долота размещаются два резца ONYX (рис. 4).

Резцы ONYX у долота диаметром 6 дюймов располагаются на расстоянии 1,8 и 2,3 дюйма от центра торца долота, что соответствует значениям $0,77R_n$ и $0,9R_n$ (рис. 3, 4). Данный интервал установки резцов соответствует отметке максимальной величины износа периферийных резцов долота, а вот интервал расстановки резцов от $0,77R_n$ в направлении к центру долота оказывается защищенным только фиксированными резцами. При расстановке вращающихся резцов в этом интервале можно добиться еще более существенного повышения ресурса долот.

Причины повышения износа резцов долота в направлении от центра к периферии состоят в росте сопротивления резанию–скалыванию горной породы резцами по мере повышения линейной скорости перемещения резцов, которая определяется зависимостью $v_{\text{л}} = 2\pi\omega R_d$, где ω – частота вращения долота, мин^{-1} ; R_d – размер радиуса торца долота от центра (0) к периферии (R_n).

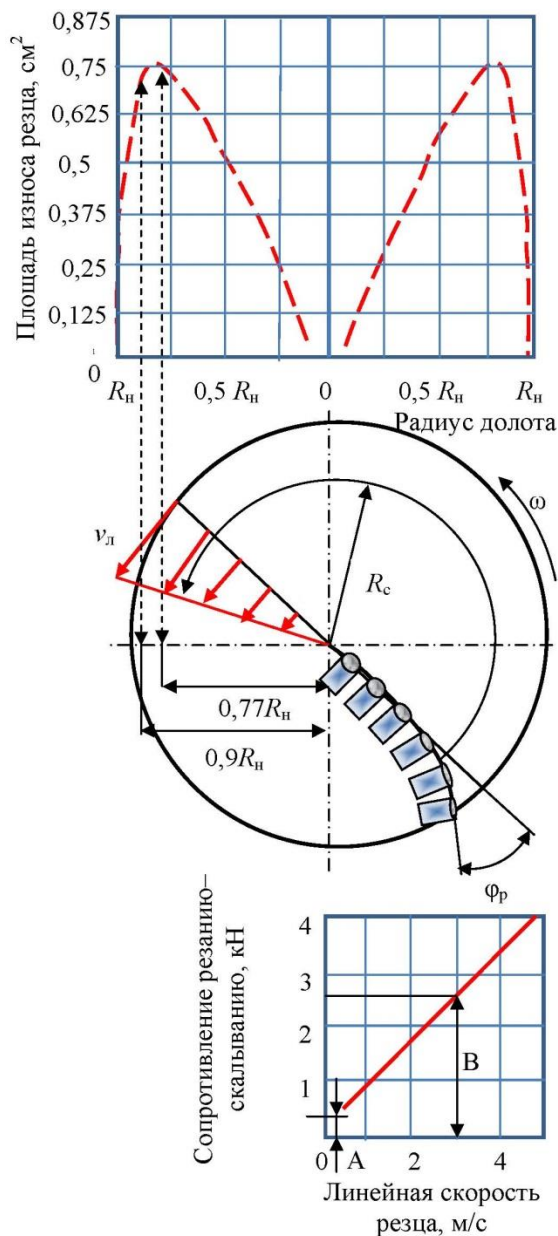


Рис. 3. Схема установки резцов на торце долота с учетом скоростей резания–скалывания породы и интенсивности изнашивания резцов

Fig. 3. Diagram of installation of incisors at the end of the bit, taking into account cutting speeds of spalling and the wear rate of incisors

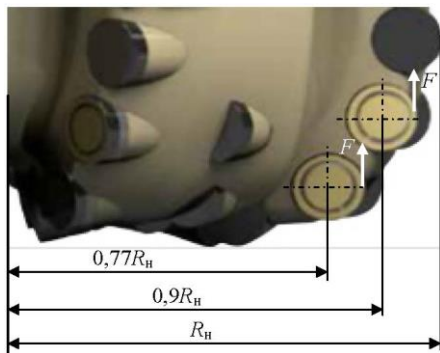


Рис. 4. Торцевая часть долота с резцами ONYX
Fig. 4. End part of the bit with cutters ONYX

Уравнение для расчета величины R_d , полученное при обработке экспериментальных данных, выглядит следующим образом:

$$R_d = 0,258 + 0,664 v_d + 0,021 v_d^2. \quad (1)$$

В соответствии с зависимостью (1) на рис. 3 представлен график, отражающий связь величины сопротивления резанию–скалыванию породы резцами по мере повышения линейной скорости резания и интенсивности изнашивания резцов, размещенных на различном расстоянии от центра торца долота.

Глубину резания–скалывания породы H можно определить формуле [6]:

$$H = \sqrt[3]{\frac{P_{oc} \sin \gamma_{ск} (1 - \mu \operatorname{tg} \gamma_n)}{\pi K_n \sigma_{ск} \cos \varphi_n \operatorname{tg} \gamma_n \sqrt{d} (1 - \operatorname{tg} \varphi_n)}}, \quad (2)$$

где $\gamma_{ск}$ – угол скалывания породы на передней грани резца, град; μ – коэффициент трения резцов о породу; γ_n – передний угол установки резца, град; $\sigma_{ск}$ – предел прочности горной породы на скалывание, Па; K_n – коэффициент, определяющий рост сопротивления резанию–скалыванию со стороны горной породы при повышении частоты вращения долота; φ_n – угол внутреннего трения в слоях деформируемой при разрушении горной породе, град; d – диаметр резца, м.

Как следует из формулы (2), изменчивость предела прочности горной породы на скалывание $\sigma_{ск}$ вследствие повышения линейной скорости перемещения резца может учитываться коэффициентом K_n , который в свою очередь определяется из графика на рис. 3.

Например, если изначально при линейной скорости 0 м/с значение сопротивления резанию–скалыванию равно А, а при линейной скорости 3 м/с – В, то коэффициент $K_n = B/A$. В соответствии со значениями на графике рис. 3 $K_n = 2,7/0,4 = 6,75$.

При повышении частоты вращения долота и линейной скорости резания–скалывания породы сопротивление резанию–скалыванию (предел прочности) будет увеличиваться, а значит, глубина резания–скалывания породы H снижаться.

Полученная зависимость (2) может использоваться при проектировании буровых долот с резцами PDC.

Возможность установки вращающихся при бурении резцов на удалении от внешнего радиуса долота является проблематичной при стандартной конструкции и форме торца долота, поскольку размещение вращающихся при бурении резцов на периферии торца связано с механизмом привода вращения резцов. Рассмотрим данный механизм с целью оптимизации формы торцевой части долота для размещения большего числа вращающихся резцов.

При углублении ствола скважины происходит продольное перемещение долота вдоль стенки ствола, что приводит к взаимодействию боковых резцов долота и резцов, размещенных на наклонной части торца долота, с горной породой.

Таким образом, продольное перемещение долота может привести к вращению резцов. Например, если механическая скорость бурения долотом типа PDC

равна v_6 , то при условии, что не происходит проскальзывания резца без вращения, частота вращения резца будет равна

$$\Omega = \frac{v_6}{2\pi r} K, \quad (3)$$

где r – радиус резца; K – коэффициент проскальзывания резца.

Учитывая высокую вероятность проскальзывания резца при продольном перемещении, частота вращения Ω может меняться от нуля до максимального значения, рассчитанного по формуле (3).

На рис. 5 показана возможная конструкция вращающегося при бурении резца PDC. Резец – 1 устанавливается внутри корпуса – 2 с фиксацией оси резца – 3 стопорными упругими кольцами – 4 в канавках на оси – 3 и внутренней поверхности корпуса – 2.

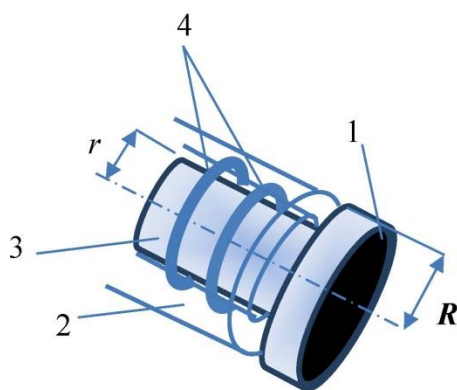


Рис. 5. Конструкция вращающихся вокруг своего центра резцов типа PDC: 1 – резец PDC; 2 – корпус; 3 – ось; 4 – стопорные упругие кольца

Fig. 5. Design of PDC type cutters rotating around its center: 1 – PDC cutter; 2 – housing; 3 – axis; 4 – lock elastic rings

Вращение резца происходит под действием крутящего момента, который можно определить по формуле (4)

$$M_{кр} = R \cdot F, \quad (4)$$

где R – радиус резца; F – усилие, проворачивающее резец при бурении, ориентированное вертикально вверх из точки контакта резца с боковой поверхностью ствола скважины.

Усилие F (рис. 4, 6) определяется усилием прижатия резца к боковой поверхности ствола скважины (стенке или участка забоя скважины) и коэффициентом трения (зацепления) резца о породу боковой поверхностью:

$$F = P_{oc} \cdot \mu \cdot \cos \alpha / N, \quad (5)$$

где P_{oc} – осевая нагрузка на долото, кН; N – число резцов на торцевой части долота, воспринимающих осевую нагрузку; μ – коэффициент трения резцов о породу; α – угол наклона боковой поверхности торца долота, град.

Крутящий момент при этом будет равен:

$$M_{кр} = R \cdot P_{oc} \cdot \mu \cdot \cos \alpha / N. \quad (6)$$

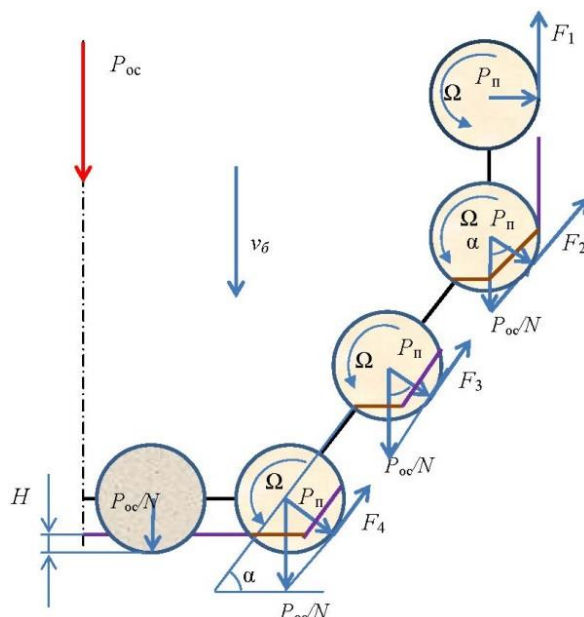


Рис. 6. Расчетная схема для определения условий вращения резцов типа ONYX: P_{oc} – осевая нагрузка на долото; N – число резцов на торце долота; H – глубина резания-скалывания породы; v_6 – скорость бурения; P_n – усилие прижатия резца к породе в стенке скважины или забоя; α – угол наклона торца долота

Fig. 6. Design scheme for determining the conditions of rotation of ONYX type cutters: P_{oc} – axial load on the bit; N – number of incisors at the bit face; H – depth of cutting-spallation of the rock; v_6 – drilling rate; P_n – the force of pressing the tool to the rock in the wall of the well or bottom hole; α – the angle of the bit face

Из формулы (6) следует, что для повышения вероятности проворачивания резца вокруг собственной оси можно улучшить фрикционные свойства боковой поверхности резца, например, за счет выполнения боковой поверхности резцов с насечкой или металлическим напылением, что позволит существенно поднять значение коэффициента трения резца о породу.

Проворачиванию резца вокруг своей оси будет препятствовать момент сопротивления, значение которого определяется по формуле (7):

$$M_c = r f F, \quad (7)$$

где r – радиус оси резца, м (рис. 5); f – коэффициент трения оси резца в корпусе резца.

Коэффициент проскальзывания резца может определяться через соотношение $M_{кр}/M_c$.

Из этого вытекает следующее. Для снижения проскальзывания резца следует повышать соотношение следующих параметров:

$$R\mu/rf \rightarrow \max. \quad (8)$$

Исходя из формулы (8) вращение резцов будет более эффективным при максимальном коэффициенте трения резца – 1 о породу (μ) и минимальном коэффициенте трения между осью – 3 и корпусом резца – 2 (f) (рис. 5). В данном случае за счёт более рациональной конструкции взаимодействующих при вращении резца элементов и повышенных фрикционных

свойств наружной поверхности резца можно получить лучший результат, а именно равномерное вращение резца вокруг своей продольной оси.

Для вращения резца вокруг собственной оси важнейшим параметром является скорость углубления долота (1).

При действии усилия F_i , где i – номер резца в соответствии со схемой на рис. 6, вдоль направления вектора скорости углубления v_6 наступают условия, максимально благоприятные с точки зрения реализации углубления (F_1). При этом величина усилия P_n будет минимальна, а значит условия для вращения резца все же неблагоприятные, поскольку усилие P_n может определяться только поперечными смещениями и прижатиями долота к стенке скважины.

При расположении резца на наклонной поверхности торца направление углубления долота v_6 и направление действия усилия F_i определяются через $\sin \alpha$.

Усилие прижатия резца к стенке скважины определяется через $\cos \alpha$ (5).

Таким образом, наиболее рациональным углом наклона торцевой части долота α будет поверхность, наклоненная под углом 45° . Именно при таком угле наклона поверхности долота будут максимальными: усилие прижатия P_n , усилие F , а также степень совпадения плоскости действия углубления долота в скважине и усилия F_i (рис. 7).

На рис. 8, а представлена схема бурового долота с вращающимися при бурении резцами типа PDC. Торцевая поверхность долота имеет наклон относительно оси корпуса 45° , что обеспечивает эффективную работу режущей части долота и позволяет размещать вращающиеся резцы по всей его рабочей поверхности. Вращение резцов при работе долота обеспечивается взаимодействием резцов – 3 со стенкой скважины, а резцов – 4 – с наклонным участком забоя. Для повышения вероятности проворачивания резца вокруг собственной оси боковая поверхность резцов выполнена с повышенными фрикционными характеристиками за счет напыления твердого пористого металла, например карбида вольфрама, и оснащения

ребристой насечкой, ориентированной вдоль продольной оси резца.

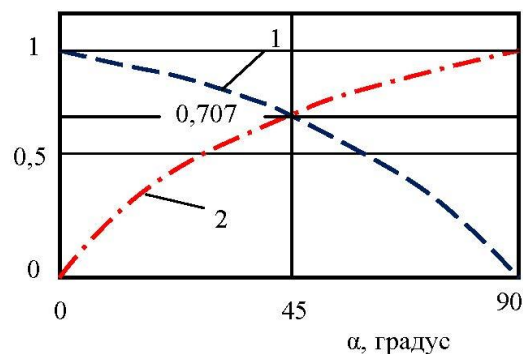


Рис. 7. Зависимость значений усилия F (линия 1), проворачивающего резец, под действием усилия прижатия резца к породе забоя и стенке скважины и вектора поступательного перемещения долота при углублении (линия 2)

Fig. 7. Dependence of the values of force F (line 1), turning the cutter, under the action of pressing the cutter to the rock face and the borehole wall and the vector of translational movement of the bit during recess (line 2)

Идею повышения ресурса породоразрушающего инструмента за счет обеспечения возможности вращения резцов PDC вокруг своей оси имеет смысл реализовать и при конструировании колонкового инструмента. Коронки такого типа (рис. 8, б) могут армироваться вращающимися круглыми резцами PDC за счет крепления на осях – 4 и 5, выполненных в форме кольца по периметру корпуса коронки. Для обеспечения формирования керна и разработки стенок скважины резцы устанавливаются на двух осях, расположенных по внешнему и внутреннему радиусу матрицы коронки. При бурении коронкой вращение скважинообразующих резцов – 1 будет обеспечиваться при взаимодействии их боковой поверхности со стенкой скважины, а вращение кernoобразующих резцов – 2 – с формируемым керном.

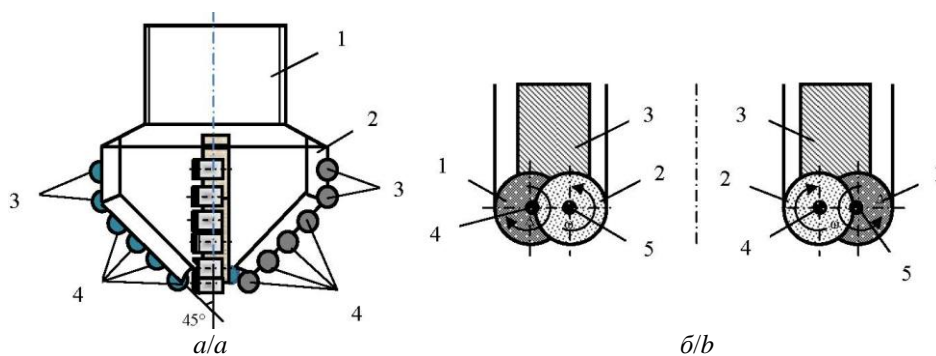


Рис. 8. Породоразрушающий инструмент с вращающимися при бурении резцами типа PDC: а) буровое долото: 1 – корпус с резьбой; 2 – матрица; 3 и 4 – вращающиеся резцы; б) буровая коронка: 1 – наружный скважинообразующий резец; 2 – внутренний кernoобразующий резец; 3 – матрица коронки; 4 – ось вращения наружных скважинообразующих резцов; 5 – ось вращения внутренних кernoобразующих резцов; 6 – элементы каркаса осей вращения резцов

Fig. 8. Rock cutting tool with PDC rotary cutters: а) drill bit: 1 – case with thread; 2 – matrix; 3 and 4 – rotating cutters; б) drilling crown: 1 – external cutter, that forms the walls of the borehole; 2 – internal cutter, that forms core; 3 – drill bit matrix; 4 – axis of rotation of the outer cutters; 5 – axis of rotation of the internal cutter; 6 – frame elements axes of rotation of the cutters

Предложенные конструкции обеспечивают активное проворачивание резцов вокруг своей оси в процессе углубления скважины, что снижает их износ и как следствие повышает ресурс породоразрушающего инструмента.

Выводы

1. Возможность вращения резцов PDC в процессе бурения вокруг продольной оси позволяет повысить ресурс породоразрушающего инструмента и среднюю механическую скорость бурения, поскольку более рационально используется режущая поверхность резцов, установленных в самой нагруженной части торца бурового инструмента, подвергающихся максимально интенсивному изнашиванию.
2. Наиболее рациональным углом наклона торцевой поверхности долота с вращающимися резцами, обеспечивающим максимальное значение усилия

прижатия и максимальное совпадение плоскости действия углубления долота в скважине, является угол в 45°, при котором имеется возможность размещения максимального числа вращающихся резцов в долоте.

3. Для снижения проскальзывания резца следует повышать фрикционные характеристики боковой поверхности резцов, что обеспечит возможность более активного вращения резцов при бурении, расположенных как на торцевой части долота, так и на боковой его поверхности. Последнее обстоятельство позволяет применить вращающиеся резцы также при разработке буровых коронок, у которых скважинообразующие резцы могут вращаться при взаимодействии со стенкой скважины, а кернаобразующие резцы – при взаимодействии с керном, поступающим внутрь коронок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2011. – V. 48 (3). – P. 434–442.
2. Буровые долота с опорными элементами, обеспечивающими уменьшение выступания режущих элементов: пат. Рос. Федерация № 2421589; заявл. 14.12.06; опубл. 20.06.11, Бюл. № 17. – 23 с.
3. Режущие элементы бурового инструмента с закрепленными резцами, выполненные из синтетических алмазов, сформированных химическим осаждением из паровой фазы: пат. Рос. Федерация № 2638220; заявл. 18.11.13; опубл. 12.12.17, Бюл. № 35. – 22 с.
4. Placement of non-planar cutting element: Pat. U.S. № 20180320449A1; Filed: 30.04.18. Pub. Date: 08.11.18, Appl. No 16/009, 294. – 31 p.
5. Drill bit body construction: Pat. U.S. № 20180291691A1; Filed: 15.06.18. Pub. Date: 11.10.18; Appl. No 15/966,004. – p. 31.
6. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2015. – 336 с.
7. Product Catalog. Smith Bits. A Schlumberger Company. 17-BDT-310907 Copyright 2018 Schlumberger. URL: <https://www.slb.com/-/media/files/smith/catalogs/bits-catalog> (дата обращения 18.01.2020).
8. Интегрированные системы и технологии. Каталог компании Schlumberger. URL: https://www.slb.ru/services/ipm/integratedservices_management/ (дата обращения 18.01.2020).
9. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design / Z. Ai, Y. Han, Y. Kuang, Y. Wang, M. Zhang // Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – № 10 (6). – P. 1–12.
10. Нескоромных В.В., Борисов К.И. Аналитическое исследование процесса резания-скалывания горной породы долотом с резцами PDC // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 191–195.
11. Чулкова В.В. Метод выбора долот PDC для перемежающихся по твердости горных пород // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. – 2015. – № 2. – С. 17–19.
12. Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: rock cutting // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2013. – № 37 (13). – P. 1913–1929.
13. Dong G., Chen P. 3D numerical simulation and experiment validation of dynamic damage characteristics of anisotropic shale for percussive-rotary drilling with a full-scale PDC bit // Energies. – 2018. – № 11 (6). – P. 1285–1287.
14. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – № 39 (1). – P. 41–58.
15. Teale R. The concept of specific energy in rock drilling // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1965. – № 2 (1). – P. 57–73.
16. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А.Я. Третьяк, В.В. Попов, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 8. – С. 225–230.
17. Шарипов А.Н., Храмов Д.Г., Ковалевский Е.А. Оптимизация конструкций долот PDC, направленная на снижение времени бурения секции под эксплуатационную колонну // Бурение и нефть. – 2013. – № 6. – С. 42–43.
18. Борисов К.И. Актуальные научные и прикладные вопросы развития нового научного метода оценки свойств и эффективности динамического разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего типа «PDC» // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. – 2010. – № 3. – С. 8–14.
19. Жентичка М.В. Применение PDC долот SmithBits (Schlumberger) при бурении скважин на Ванкорском месторождении // Инженерная практика. – 2012. – № 10. – С. 54–56.
20. Каматов К.А. Снижение торсионных колебаний буровой колонны с помощью новой конструкции долота PDC // Нефть и газ 2014: Сборник тезисов докладов 68-й международной молодежной научной конференции. – М., 14–16 апреля 2014. – М.: Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, 2014. – С. 146–147.
21. Ртищев К.М., Шарипов А.Н., Лозуков А.В. Принципы подбора долот PDC // Oil and Gas Eurasia. – 2009. – № 6. – С. 112–114.

Поступила 24.01.2020 г.

Информация об авторах

Нескоромных В.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Попова М.С., старший преподаватель кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Парахонько Е.В., студент кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

UDC 622.24.051.64

DEVELOPMENT OF ROCK CUTTING TOOL WITH PDC CUTTERS

Vyacheslav V. Neskoromnykh¹,
sovair@bk.ru

Marina S. Popova¹,
alleniram83@mail.ru

Elena V. Parakhonko¹,
89233499156@mail.ru

¹ Siberian Federal University,
95, Krasnoyarskiy rabochiy avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia.

Relevance. When developing a tool for drilling wells for various purposes, the main optimization criteria are the increase in mechanical speed and its resource. This is especially true for rock cutting tools intended for drilling in changing geological conditions of deep and inclined wells. Recently, the issue of increasing versatility and operation time of drilling tools has been increasingly raised. Opportunities in the field of creating artificial materials made it possible to develop modern drilling tools with outstanding characteristics. And the experience of scientific research on the patterns of operation of a drilling tool has shown that the design parameters of the tool affect its performance. By combining production capabilities and the experience of the latest scientific research, a new drilling tool is being developed. At present, the PDC tool is the most sought-after tool. Abnormal wear of the cutting edge of the PDC cutters causes deterioration tool cutting. The possibility of rotation of PDC cutters around its axis creates the conditions for their uniform wear and, as a result, leads to an increase in the life of the drilling tool.

The aim of the research is to develop a highly resource rock cutting tool.

Objects: causes of increased tool wear; tool design parameters with cutters that rotate.

Methods: simulation modeling, analytical studies, analysis.

Results. Increasing the resource of a rock-cutting tool is possible while ensuring the rotation of the cutters of the PDC. The possibility of placing the maximum number of rotating incisors is achieved by the 45° inclination angle of the bit end surface. This helps achieve the maximum value of the pressing force and the maximum coincidence of the plane of action of recess tool in the well. To ensure the active rotation of the incisors during drilling, the frictional characteristics of their lateral surface should be increased.

Key words:

Rock cutting tool, PDC cutters, cutter wear, cutter slippage, drilling tools, resource increase, cutter torque.

REFERENCES

1. Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, vol. 48 (3), pp. 434–442.
2. Ganc T. *Burovye dolota s opornymi elementami, obespechivayushchimi umenshenie vystupaniya rezhushchikh elementov* [Drill bits with support elements to reduce the protrusion of the cutting elements]. Patent RF, no. 2421589, 2006.
3. Chzhan G., Nikson M.S. *Rezhushchie elementy burovogo instrumenta s zakreplennymi reztsami, vypolnennye iz sinteticheskikh almazov, sformirovannykh khimicheskimi osazhdeniyami iz parovoy fazy* [Cutting elements of the drilling tool with fixed cutters, made of synthetic diamonds, formed by chemical vapor deposition]. Patent RF, no. 2638220, 2011.
4. Youhe Zhang, Huiming Song. *Placement of non-planar cutting element*. Pat. U.S., no. 20180320449A1, 2018.
5. Youhe Zhang, Xiaoge Gan, Huiming Song. *Drill bit body construction*. Pat. U.S., no. 20180291691A1, 2018.
6. Neskoromniy V.V. *Razrushenie gornykh porod pri burenii skvazhin* [Rock destruction during drilling]. Moscow, INFRA-M Publ.; Krasnoyarsk, SFU Publ., 2015. 336 p.
7. *Product Catalog. Smith Bits*. A Schlumberger Company. 17-BDT-310907 Copyright 2018 Schlumberger. Available at: <https://www.slb.com/-/media/files/smith/catalogs/bits-catalog> (accessed 18 January 2020).
8. *Integrirovannye sistemy i tekhnologii. Katalog kompanii Schlumberger* [Integrated systems and technologies. Schlumberger company catalog]. Available at: https://www.slb.ru/services/ipm/integratedservices_management/ (accessed 18 January 2020).
9. Ai Z., Han Y., Kuang Y., Wang Y., Zhang M. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, no. 10 (6), pp. 1–12.
10. Neskoromnykh V.V., Borisov K.I. Analytical study of rock cutting-spallation with chisels with PDC cutters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 191–195. In Rus.
11. Chulkova V.V. The method of selecting PDC bits for intermittent hard rock. *Bulletin of the Association of Drilling Contractors*, 2015, no. 2, pp. 17–19. In Rus.
12. Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, vol. 37 (13), pp. 1913–1929.
13. Dong G., Chen P. 3D numerical simulation and experiment validation of dynamic damage characteristics of anisotropic shale for percussive-rotary drilling with a full-scale PDC bit. *Energies*, 2018, vol. 11 (6), pp. 1285–1287.
14. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, vol. 39 (1), pp. 41–58.
15. Teale R. The concept of specific energy in rock drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1965, vol. 2 (1), pp. 57–73.
16. Tretyak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to the design of highly efficient rock cutting tools. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2017, no. 8, pp. 225–230. In Rus.
17. Sharipov A.N., Khramov D.G., Kovalevsky E.A. Optimization of PDC bits design, aimed at reducing the drilling time of the section under the production string. *Drilling and oil*, 2013, no. 6, pp. 42–43. In Rus.
18. Borisov K.I. Actual scientific and applied issues of the development of a new scientific method for assessing the properties and efficiency of dynamic destruction of rocks with cutting-cleaving type PDC tools. *Bulletin of the Association of Drilling Contractors*, 2010, no. 3, pp. 8–14. In Rus.

19. Zhentichka M.V. mithbits (Schlumberger) PDC bit application in well drilling at the Vankor field. *Oilfield engineering*, 2012, no. 10, pp. 54–56. In Rus.
20. Kamatov K.A. Snizhenie torsionnykh kolebaniy burilnoy kolonny s pomoshchyu novoy konstruktssii dolota PDC [Reduction of torsional vibrations of the drill string with the help of a new PDC bit design]. *Sbornik tezisev dokladov 68 mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii. Neft i gaz 2014* [Collection of abstracts of reports of the 68th International Youth Scientific Conference. Oil and Gas 2014]. Moscow, April 14–16, 2014. Moscow, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2014. pp. 146–147.
21. Rtishchev K.M., Sharipov A.N., Lozukov A.V. Printsipy podbora dolot PDC [PDC bits selection principles]. *Oil and Gas Eurasia*, 2009, no. 6, pp. 112–114.

Received: 24 January 2020.

Information about the authors

Vyacheslav V. Neskoromnykh, Dr. Sc., professor, head of the department of technology and equipment of investigation, Siberian Federal University.

Marina S. Popova, senior teacher, Siberian Federal University.

Elena V. Parakhonko, student, Siberian Federal University.

УДК 622.7+541.183+66-5

УСТАНОВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ РАБОТЫ КОНЦЕНТРАТОРА KC-CVD6 С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ГРУППОВОГО УЧЕТА АРГУМЕНТОВ

Пелих Владислав Вадимович¹,
salov@istu.edu

Салов Валерий Михайлович²,
salov@istu.edu

Бурдонов Александр Евгеньевич²,
slimbul@inbox.ru

Лукьянов Никита Дмитриевич²,
Lukyanov.n@gmail.com

¹ ООО «ФЛСмидт Рус» в г. Иркутске,
Россия, 664007, г. Иркутск, ул. Октябрьской Революции, 1/4.

² Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Актуальность исследования обусловлена получением новых знаний об оптимизации технологических параметров работы центробежных концентраторов, эксплуатируемых по технологии Knelson CVD, а именно: настройка частоты открытия клапанов и время, в течение которого клапаны остаются открытыми.

Цель: статистический анализ результатов полупромышленных исследований применимости технологии Knelson CVD на различных продуктах фабрики с помощью метода группового учета аргументов для получения зависимостей между выходом концентрата и настраиваемыми параметрами, позволяющими проводить предварительные расчеты по эффективности внедрения данной технологии на обогащательных предприятиях.

Объекты: продукты, полученные в результате работы гидроциклонов, а также технологические параметры работы центробежных концентраторов.

Методы: общие методы математической статистики, в частности методы регрессионного анализа, направленные на построение статистически значимых моделей, описывающих зависимость какой-либо переменной от множества регрессоров. Также, наряду с классическим аппаратом регрессионного анализа, применяется метод группового учета аргументов, основная идея которого заключается в построении множества моделей заданного класса и выборе среди них оптимальной.

Результаты. Разработана эффективная методика обработки результатов тестов, проведенных на обогащательном оборудовании, базирующаяся на методе группового учета аргументов. На основании полученных данных построены статистически значимые модели, описывающие зависимость содержания в хвостах и концентратах по ценным компонентам от различных настраиваемых параметров оборудования, обоснована их эффективность, позволяющая применять данные модели в дальнейших исследованиях по применению CVD технологии. Продемонстрировано применение метода группового учета аргументов на примере построения полиномиальных регрессионных моделей, содержащих нелинейные комбинации регрессоров.

Ключевые слова:

Knelson CVD, гравитационное обогащение, золото, свинец, извлечение, хвосты, технология.

Введение

Как уже отмечалось во многих публикациях [1–5], связанных с горно-обогащательной отраслью, минерально-сырьевая база в нашей стране и в мире постоянно меняется в связи с развитием научно-технического прогресса. В связи с переработкой полезных ископаемых, в том числе полиметаллических руд, с применением устаревшего оборудования, используемого на многих обогащательных предприятиях, становится нерентабельной.

Обеднение и снижение качества руд стимулирует применение все более сложных технико-технологических процессов, видов оборудования, реагентов, в результате чего увеличивается себестоимость перерабатываемой продукции, опережая рыночные цены на конечные изделия, снижая конкурентоспособность и инвестиционную привлекательность предприятия. Оптимальным решением возникшей проблемы является изменение схем переработки руд

и включение в них современного, высокоэффективного оборудования [6–8].

Одним из предприятий, требующих нового технологического подхода, является Ново-Широкинский комбинат, работающий на золотополиметаллическом месторождении в Восточном Забайкалье.

Основными производственными продуктами организации являются цинковый и свинцовый концентраты с годовым объемом выпуска в 9 и 25 т соответственно. Кроме того, «Новоширокинский рудник» по итогам января–июня 2018 г. произвело 61,027 тыс. унций золотого эквивалента. В первом полугодии 2018 г. коэффициент извлечения металла из руды был на уровне 80,3 %. В тот же период прошлого года коэффициент составлял 85,2 %.

Тем не менее существующая схема гравитационного обогащения на отсадочных машинах показывает низкую эффективность, по имеющимся данным:

- первая стадия отсадки (цикл измельчения в мельнице мокрого полусамоизмельчения – МПСИ) при выходе 5–7 % дает среднее извлечение золота 8 %, содержание 1,5–2 г/т, извлечение свинца 5–6 %, содержание свинца 2,5 %.
- вторая стадия МОТ (цикл измельчения в шаровой мельнице с центральной разгрузкой – МШЦ) при выходе 30 % дает среднее извлечение золота 39 %, содержание 6–10 г/т, извлечение свинца 28–30 %, содержание свинца 1,3–3 %.

Представленные результаты схемы гравитационного обогащения на отсадочных машинах показывают высокий выход концентрата и низкую концентрацию целевых компонентов. Анализ мирового опыта переработки руд показывает, что использование современных технологий, в частности технологии CVD, может повысить технологические показатели и увеличить эффективность работы фабрики. Комплекс проведенных лабораторных исследований в НИиПИ ТОМС (Институт) показал хорошие перспективы для внедрения данной технологии [9].

Необходимо отметить, что постоянные работы по настройке и оптимизации работы горно-обогатительного оборудования являются дорогостоящими [10–12]. Тем самым, получение значений и статистических зависимостей позволяет проводить предварительные расчеты по эффективности внедрения новых технологий на таких предприятиях.

Целью данной статьи является статистический анализ результатов полупромышленных исследований применимости технологии Knelson CVD на различных продуктах фабрики с помощью метода группового учета аргументов.

Методика и результаты проведения полупромышленных испытаний

Полупромышленные исследования проводились на нескольких продуктах фабрики: вторичный цикл

измельчения на сливе МШЦ, слив гидроциклона второй стадии измельчения перед флотацией и на хвостах цинковой флотации. Данное решение принято с целью получения наиболее полной и объективной информации касательно эффективности использования данного типа оборудования.

В работе рассматривались результаты, полученные только на сливе гидроциклона.

Методика проведения испытаний строилась на нескольких этапах: один этап общий подготовительный и три этапа для каждого.

Методика проведения полупромышленных испытаний при подработке каждого технологического потока строилась на трёх этапах:

1. Определение оптимального расхода флюидизационной воды путём отбора проб на каждом режиме подачи флюидизационной воды.
2. Определение извлечения и степени концентрации золота и свинца при различных режимах выхода концентрата, значениях времени закрытия пережимных клапанов, при отборе проб технологических потоков, с определением фактического массового выхода концентрата.
3. Проведение серии испытаний на оптимальных настройках концентратора, определённых в ходе двух предыдущих этапов. Отбор всего объёма концентрата, отбор проб для подтверждения результатов предыдущих испытаний.

Подробное описание методики проведения испытаний представлено в работе [13].

При проведении испытаний на сливе гидроциклона подготовка питания осуществлялась по схеме, изображённой на рис. 1. Из ёмкости слива гидроциклона питание насосом перекачивалось по трубопроводу на тройник, один поток которого направлялся в схему фабрики и регулировался задвижкой, второй поток уходил в схему питания установки, тем самым обеспечивалась приемлемая стабильность питания.

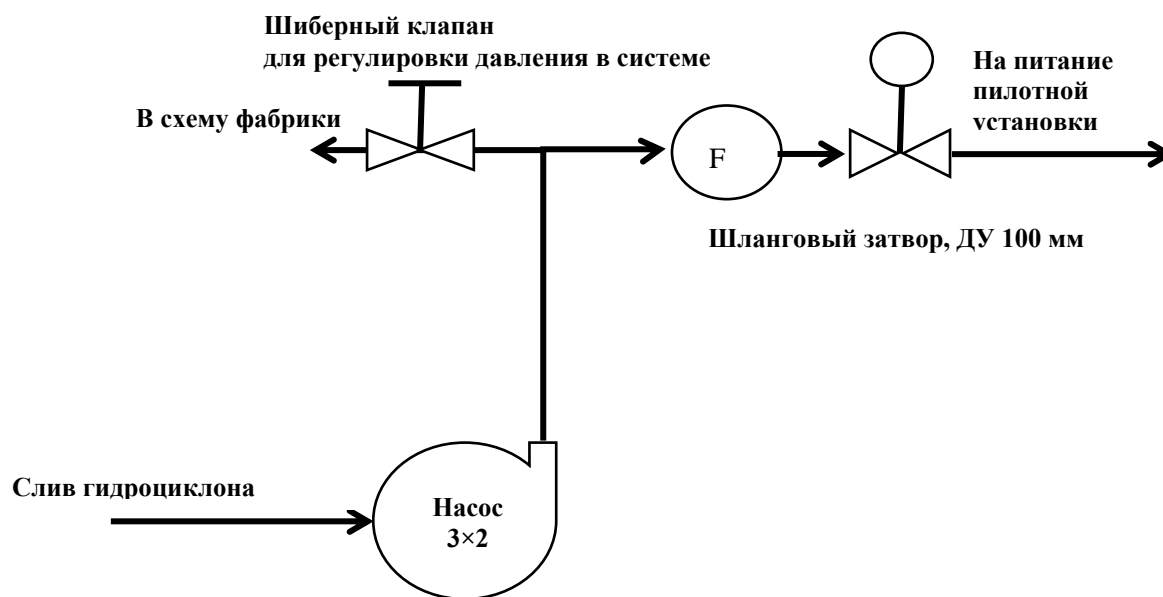


Рис. 1. Схема подготовки питания
Fig. 1. Nutrition training scheme

Первый этап проведения испытаний

Целью первого этапа испытаний был подбор параметров расхода флюидизационной воды на основе оценки содержания ценного компонента в продуктах концентратора. Эксперимент (Этап 1) проходил при следующих условиях: расход флюидизационной воды варьировался от 25 до 40 л/м (интервал 5 л/м), скорость вращения ротора 920 об/мин/75G, время «открытия клапана» 0,325 с, время «закрытия клапана» 6 с, Давление воздуха в пережимных клапанах 55 PSI, Длительность эксперимента 1 час. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты определения оптимального расхода флюидизационной воды на сливе гидроциклона

Table 1. Results of determining the optimal flow rate of fluidized water at the sink of a hydrocyclone

По золоту/By gold					
Расход флюид. воды л/мин Flow rate of fluidization water, liter/min	Средний объёмный поток питания, м ³ /ч Average feed volume flow, m ³ /h	Среднее содержание твёрдого, % Solid average content, %	Содержание золота, г/т Gold content, g/t		
			Питание Nutrition	Хвосты Tails	Концентрат Concentrate
25	4	30	1,6	1,2	2,4
30	4	30	2,4	1,8	2,8
35	3,5	31	1,6	1,2	2,4
40	5	32	1,8	1,4	3,2
По свинцу/By lead					
Расход флюид. воды л/мин Flow rate of fluidization water, liter/min	Средний объёмный поток питания, м ³ /ч Average feed volume flow, m ³ /h	Среднее содержание твёрдого, % Solid average content, %	Массовая доля свинца, % Lead mass fraction, %		
			Питание Nutrition	Хвосты Tails	Концентрат Concentrate
25	4	30	0,79	0,77	2,16
30	4	30	0,57	0,49	1,83
35	3,5	31	0,58	0,5	1,77
40	5	32	0,61	0,55	1,95

Второй этап проведения испытаний

Целью второго этапа являлось установление зависимостей выход–концентрат и выход–извлечение, на основании данных, полученных в результате эксперимента с различным выходом концентрата, а также выбор наиболее эффективных режимов для длительных испытаний. Длительность каждого эксперимента составляла 1 час. Варьировалось значение времени закрытия пережимных клапанов. Эксперимент проходил при тех же условиях.

На рис. 2, 3 представлены графики, иллюстрирующие зависимости, полученные в результате испытаний (табл. 3).

Таблица 2. Определение выхода концентрата на сливе гидроциклона в зависимости от настроек пережимных клапанов

Table 2. Determination of concentrate output at hydrocyclone discharge depending on the pinch valve settings

По золоту/By gold				
Время «открытия клапана», с PV open time, s	Время «закрытия клапана», с PV closing time, s	Содержание золота, г/т Gold content, g/t		
		Питание Nutrition	Хвосты Tails	Концентрат Concentrate
0,325	4	2	1,6	3,4
0,325	8	1,8	1,4	4,6
0,325	12	1,8	1,6	6
0,325	16	2,2	1,8	5,8
0,325	24	2	1,6	5,4
0,325	32	1,4	1,3	4,3
По свинцу/By lead				
Время «открытия клапана», с PV open time, s	Время «закрытия клапана», с PV closing time, s	Массовая доля свинца, % Lead mass fraction, %		
		Питание Nutrition	Хвосты Tails	Концентрат Concentrate
0,325	4	0,63	0,34	1,4
0,325	8	0,65	0,4	2,11
0,325	12	1,3	0,94	4,75
0,325	16	0,41	0,25	2,45
0,325	24	0,35	0,28	2,15
0,325	32	0,35	0,27	2,6

Таблица 3. Определение выхода и извлечения Au и Pb концентратов на сливе гидроциклона в зависимости от настроек пережимных клапанов

Table 3. Determination of the yield and extraction of Au and Pb concentrates at hydrocyclone discharge depending on the settings of the pinch valves

Производительность по твёрдому Productivity on solid	Производительность по концентрату Capacity concentrate	Выход концентрата, % Concentrate yield, %	Извлечение в концентрат, %, Extraction in concentrate, %		Коэффициент концентрации Concentration ratio	
			Au	Pb	Au	Pb
т/ч/t/h						
1981,72	541,0	27,3	46,4	60,61	1,7	2,2
1928,16	281,1	14,6	37,2	47,31	2,51	3,2
2035,28	189,8	9,34	31,1	34,1	3,31	3,6
2035,28	143,3	7,1	18,6	42,1	2,61	5,9
1928,16	96,2	4,9	13,5	30,6	2,7	6,1
2229,435	72,4	3,2	9,9	24,1	3,1	7,4

Третий этап проведения испытаний

Целью третьего этапа являлось подтверждение полученных в результате предыдущих испытаний значений, а также накопление концентрата для проведения последующих испытаний по доводке (табл. 4, 5).

Длительность эксперимента 3 часа. Средний объёмный поток питания 5 м³/ч.

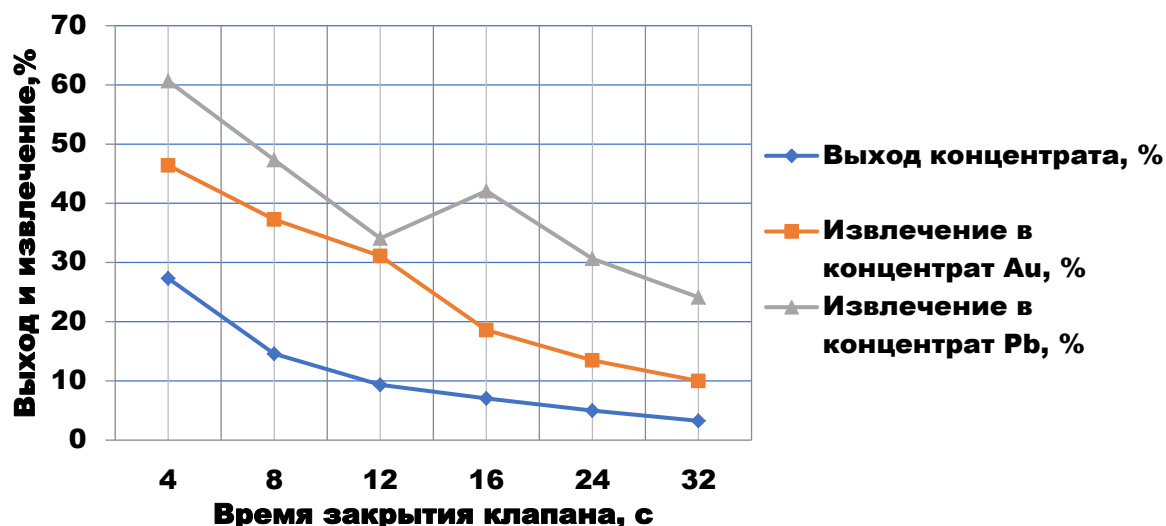


Рис. 2. Кривая выхода концентрата/извлечения

Fig 2. Concentrate yield/extraction curve

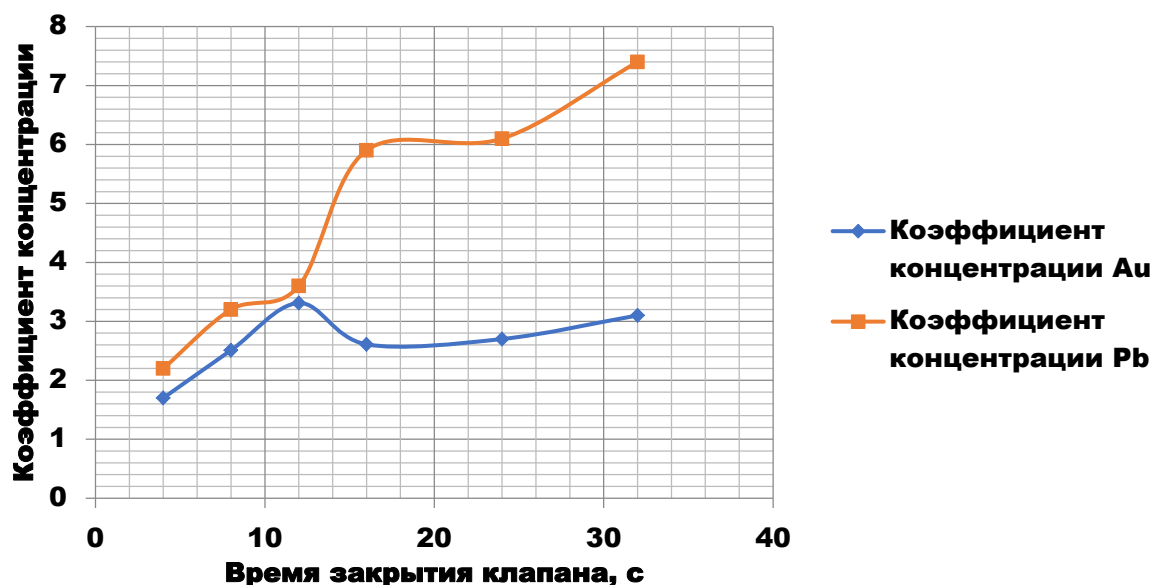


Рис. 3. Кривые коэффициентов концентрации

Fig. 3. Concentration curves

Таблица 4. Результаты испытаний по накоплению концентрата на выбранных режимах

Table 4. Test results on concentrate accumulation on the selected modes

По золоту/By gold					
Время «открытия клапана», с PV open time, s	Время «закрытия клапана», с PV closing time, s	Содержание золота, г/т Gold content, g/t			Масса накопленного концентрата, кг Mass of accumulated concentrate, kg
		Питание Nutrition	Хвосты Tails	Концентрат Concentrate	
0,325	4	2,1	1,1	5,6	477
0,325	12	2,2	1,3	8,98	387
0,325	24	2,2	1,8	9,6	180
По свинцу/By lead					
Время «открытия клапана», с PV open time, s	Время «закрытия клапана», с PV closing time, s	Массовая доля свинца, % Lead mass fraction, %			Масса накопленного концентрата, кг Mass of accumulated concentrate, kg
		Питание Nutrition	Хвосты Tails	Концентрат Concentrate	
0,325	4	0,41	0,23	1,73	477
0,325	12	0,19	0,23	1,94	387
0,325	24	0,26	0,17	1,66	180

Таблица 5. Результаты испытаний по извлечению концентрата

Table 5. Test results on concentrate extraction

Время «открытия клапана», с PV open time, s	Время «закрытия клапана», с PV closing time, s	Производительность по твёрдому, т/ч Productivity on solid, t/h	Производительность по концентрату, т/ч Capacity concentrate, t/h	Выход концентрата, % Concentrate yield, %	Извлечение в концентрат, % Extraction into concentrate, %		Коэффициент концентрации, Concentration ratio	
					Au	Pb	Au	Pb
0,325	4	2148,12	477	22,2	59,21	93,69	2,66	4,21
0,325	12	1652,48	193,5	11,7	47,79	119,5	4,08	10,2
0,325	24	1755,76	90	5,1	22,36	32,72	4,36	6,38

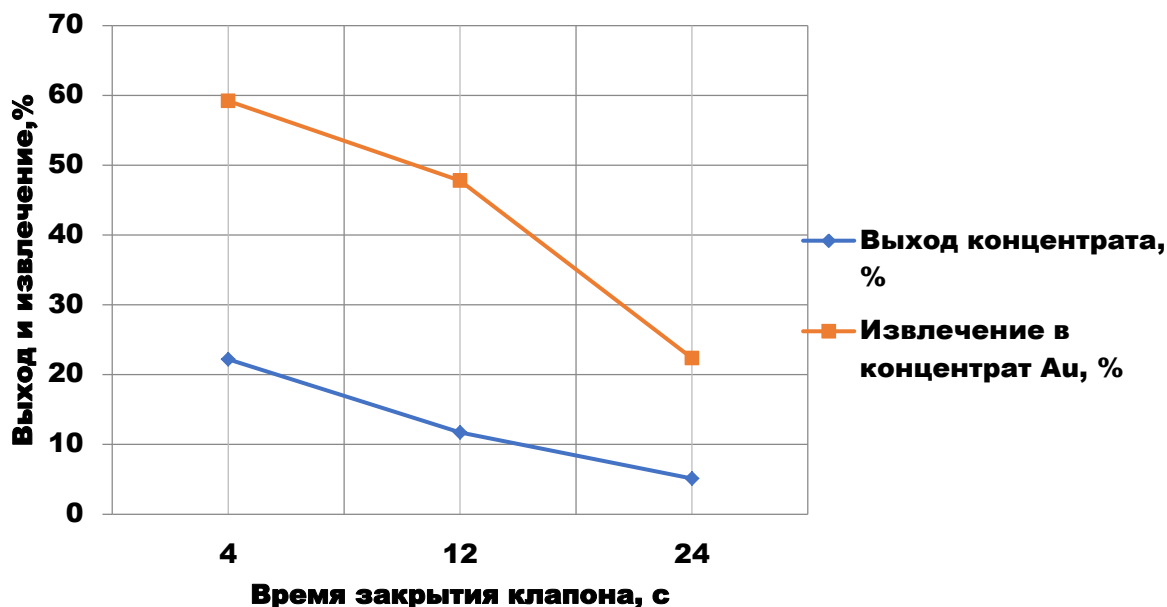


Рис. 4. Кривая выхода концентрата/извлечения

Fig. 4. Concentrate yield/extraction curve



Рис. 5. Кривая коэффициента концентрации

Fig. 5. Concentration ratio curve

Во время проведения эксперимента все отсасочные машины фабрики были отключены. Плотность питания дополнительно не регулировалась, в ходе экспериментов производился отбор разгрузок концентратора с целью определения массового вы-

хода концентрата. Отбор проб для определения содержания в технологических потоках пилотной установки осуществлялся через равные промежутки времени в течение всего теста, а также для каждого теста.

Проведение тестов на сливе гидроциклона характеризовалось стабильными характеристиками плотности питания, что было обусловлено подачей питания под давлением. Поскольку вся гравитационная схема фабрики была отключена, плотность слива гидроциклона повысилась на 8 до 37 %, тем не менее это значение осталось в пределах приемлемой плотности питания концентратора KC-CVD6. Для повышения точности получаемых данных замеры плотности происходили каждые 20 минут, после чего рассчитывался средний показатель. Учёт объёма производился по сумматору расходомера.

Установлено, что извлечение золота носит более предсказуемый характер по сравнению с тестами на сливе мельницы [14] и имеет практически прямую зависимость от выхода концентрата. В первую очередь это связано с более узким гранулометрическим составом и отсутствием циркуляционных нагрузок, а также с тем, что большая часть зёрен несущих целых минералов уже вскрыта.

Укрупнённая оценка показала, что при выходе концентрата 10–20 % извлекается 30–50 % золота. Коэффициент концентрации варьируется от 1,5 до 4. Результаты, полученные по свинцу в финальных (накопительных) тестах, нельзя принять как представительные, вероятно, на низких концентрациях процедура определения содержания по технологии лаборатории не даёт достаточной точности. Тем не менее, первичные часовые тесты выглядят представительными. Это связано с более высоким содержанием ценных компонентов в питании, что снижало погрешность. Установлено, что динамика извлечения по зависимости от выхода схожа с поведением золота, но по всем тестам в среднем выше на 15 %.

Обработка результатов с помощью метода группового учета аргументов

Проведем обработку полученных результатов, используя аппарат математической статистики. Для этого определим множество регрессоров (т. е. факторов, которыми можно управлять) и множество зависимых переменных. В нашем случае регрессорами являются: расход флюидизационной воды, обозначим как x_1 , и время закрытия пережимного клапана, обозначим как x_2 . В качестве зависимых переменных примем содержание концентрата по Au, хвостов по Au, содержание концентрата по Pb и хвостов по Pb, обозначим данные величины как y_1, y_2, y_3 и y_4 соответственно.

Представим результаты проведенных тестов слива гидроциклона (табл. 6).

Таблица составлена из всех промежуточных таблиц и отсортирована по переменной x_2 . Для повторяющихся значений регрессоров значения зависимых переменных взяты как среднее арифметическое.

Составим линейную регрессионную модель, описывающую зависимость какой-либо зависимой переменной от регрессоров по методике [14].

Будем искать зависимость параметра y_1 в виде линейной функции от настраиваемых параметров x_1 и x_2 :

$$y_1 = b_0 + \sum_{i=1}^2 b_i x_i.$$

Таблица 6. Сводная таблица результатов теста слива гидроциклона

Table 6. Summary of the results of the hydrocyclone discharge test

x_1	x_2	y_1	y_2	y_3	y_4
35	4	4,5	1,35	1,565	0,285
25	6	2,4	1,2	2,16	0,77
30	6	2,8	1,8	1,83	0,49
35	6	2,4	1,2	1,77	0,5
40	6	3,2	1,4	1,95	0,55
35	8	4,6	1,4	2,11	0,4
35	12	7,49	1,45	3,345	0,585
35	16	5,8	1,8	2,45	0,25
35	24	7,5	1,7	1,905	0,225
35	32	4,3	1,3	2,6	0,27

Найдем с помощью метода наименьших квадратов, что такая зависимость описывается следующей формулой:

$$y_1 = -0,846 + 0,124x_1 + 0,092x_2.$$

При этом коэффициент детерминации R^2 для данной модели равен 0,31, что не позволяет её использовать даже для проведения грубых, предварительных расчётов. Аналогичные исследования, проведенные для переменных y_2, y_3 и y_4 , дают R^2 , равный 0,037, 0,48 и 0,162, соответственно. Полученные результаты позволяют выдвинуть две конкурирующих статистических гипотезы:

1. Указанные переменные не состоят в статистически значимой зависимости от регрессоров.
2. Статистически значимая зависимость присутствует, но носит нелинейный характер.

Попытаемся подтвердить вторую гипотезу, используя метод группового учета аргументов (МГУА) [15], применение которого в данной работе обусловлено следующими причинами:

1. Ограниченное количество наблюдений ($N = 10$);
2. Доказательство отсутствия линейной зависимости между регрессорами и зависимыми переменными;
3. Отсутствие априорной информации о структуре искомой зависимости [16–18];
4. Простая реализация данного метода.

Опишем алгоритм применения МГУА для данной задачи. Основная идея данного метода заключается в построении множества моделей заданного класса, после чего происходит выбор наилучшей из них по определенному критерию. В данном случае будем рассматривать полиномиальные модели, общая формула которых записывается в следующем виде:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m b_{ij} x_i x_j + \dots, \quad (1)$$

где параметр m определяет порядок модели.

Рассмотрим основные этапы МГУА. Главная идея метода заключается в разбиении экспериментальных данных на две части – обучающую и проверочную

выборки, обозначаемые как N_A и N_B (количество наблюдений в каждой из частей обозначим как n_A и n_B соответственно).

На основании обучающей выборки N_A строятся выражения по типу формулы (1), и затем при помощи метода наименьших квадратов определяются коэффициенты b_i . После чего для каждой модели рассчитывается один или несколько внешних критериев, смысл которых оценить её адекватность и работоспособность путем испытания на проверочной части экспериментальных данных N_B . В литературе, посвященной МГУА [14–17, 19–22], исследуется достаточно большое количество критериев, но наиболее распространёнными из них являются критерии регулярности K_{reg} и несмещённости K_{unb} .

Критерий регулярности K_{reg} показывает, насколько построенная зависимость отклоняется от экспериментальных данных на проверочной части выборки, и описывается следующей формулой:

$$K_{reg} = \sum_{i=1}^{n_B} (Y_i(N_B) - Y_i^*(N_B))^2, \quad (2)$$

где $Y_i(N_B)$ – экспериментальные значения зависимой переменной, попавшие в проверочную часть данных; $Y_i^*(N_B)$ – значения, полученные путем подстановки значений регрессоров из множества N_B в построенную модель.

Для расчёта критерия несмещённости K_{unb} строится вспомогательная модель того же порядка, что и проверяемая, но коэффициенты этой модели проверяются на основании выборки N_B . Таким образом, значение K_{unb} определяется по следующей формуле:

$$K_{unb} = \sum_{i=1}^{n_B} (Y_i^*(N_B) - \tilde{Y}_i(N_B))^2, \quad (3)$$

где $\tilde{Y}_i(N_B)$ – значения зависимой переменной, полученные из вспомогательной модели путем подстановки значений регрессоров из множества N_B .

На практике обычно используют следующий подход для выбора оптимальной модели из имеющихся: сперва производят расчет критерия регулярности для всех проверяемых моделей, после чего отбирают несколько имеющих наименьшее значение K_{reg} , затем производят вычисление K_{unb} для отобранных моделей; модель, имеющая минимальное значение K_{unb} , определяется как оптимальная [14]. Одним из замечательных свойств МГУА является то, что значения критериев (2) и (3) достигают минимума при определенной сложности моделей и далее начинают возрастать [15], что позволяет определить оптимальный порядок модели на основании имеющихся данных.

Как показывает практика применения данного метода [15], в ряде случаев необходимо ввести дополнительные переменные x_{m+1}, \dots, x_{m+k} , которые являются какой-либо нелинейной комбинацией регрессоров, не учитываемой в модели (1). В нашем случае, исходя из предварительных исследований, введем переменные

$$x_3 = \frac{x_1}{x_2} \text{ и } x_4 = \sqrt{\frac{x_1}{x_2}}.$$

Исходя из малого количества наблюдений, ограничимся рассмотрением моделей не выше второго порядка. Также при построении будем оперировать только тремя переменными, а именно использовать набор $(x_1; x_2; x_3)$, либо $(x_1; x_2; x_4)$. Таким образом, методика применения МГУА к задаче построения регрессионной модели в данной работе выглядит следующим образом:

- 1) выбор зависимой переменной y ;
- 2) выбор набора регрессоров, на которых будет строиться модель;
- 3) разбиение табл. 1 на две части N_A и N_B ;
- 4) назначение порядка m , определяющего сложность модели (начиная от $m = 0$);
- 5) вычисление коэффициентов модели по методу наименьших квадратов на основании выборки N_A ;
- 6) вычисление коэффициентов сопряженной модели по методу наименьших квадратов на основании выборки N_B ;
- 7) расчёт критериев (2) и (3) для данной модели;
- 8) увеличение порядка модели на 1 и переход к п. 5;
- 9) после обработки всех исследуемых моделей сортировка полученных результатов по критерию K_{reg} ;
- 10) выбор среди пяти лучших моделей по критерию K_{reg} минимальной по критерию K_{unb} .

Данная методика обработки результатов была реализована в среде Matlab с использованием встроенных инструментов данной среды.

На рис. 2 приведен фрагмент листинга кода разработанной программы.

Основным инструментом в данном случае является встроенная функция `fitlm()` [20], которая осуществляет расчет коэффициентов искомой модели по методу наименьших квадратов. Отметим также, что в данном случае сложность модели определяется тремя переменными i, j, k , каждая из которых задает максимальную степень соответствующего регрессора, задействованного в модели. Например, значениям $i = 1, j = 1, k = 2$ будет соответствовать модель

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_3^2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3.$$

Представим результаты обработки в виде табл. 7.

Таблица 7. Результаты обработки

Table 7. Processing results

Исследуемая переменная Study variable	Набор регрессоров Set of regressors	Оптимальный порядок модели (i, j, k) Optimal order of the model (i, j, k)
Выход концентрата по Au, y_1 Au concentrate output y_1	$(x_1; x_2; x_3)$	(1, 0, 2)
Выход хвостов по Au, y_2 Au tails output y_2	$(x_1; x_2; x_3)$	(1, 0, 0)
Выход концентрата по Pb, y_3 Pb concentrate output, y_3	$(x_1; x_2; x_4)$	(1, 1, 1)
Выход хвостов по Pb, y_4 Pb tails output, y_4	$(x_1; x_2; x_4)$	(2, 0, 0)

Таким образом, для каждой из переменных можно написать модель регрессии и определить коэффициенты по методу наименьших квадратов с помощью встроенной функции `fitlm()` языка MatLab.

```

yk1 = y(1:3*size(y)/5);
xk1 = x(1:3*length(x)/5, 1:3);
yk2 = y(3*size(y)/5:size(y));
xk2 = x(3*length(x)/5:length(x), 1:3);
kreg1=0;kreg2=0;kbais1=0;kbais2=0;
for k=0:2
    for i=0:2
        for j=0:2
            str = strcat('poly',num2str(j),num2str(i),num2str(k));
            mdl1=fitlm(xk1, yk1, str);
            mdl2=fitlm(xk2, yk2, str);
            progn1= predict(mdl1, xk2);
            progn2 = predict(mdl2, xk1);
            kreg1(end+1)= [sum((yk2-progn1).^2)];
            kreg2(end+1)= [sum((yk1-progn2).^2)];
            kunb1(end+1)=[sum((progn2-predict(mdl1, xk1)).^2)];
            kun2(end+1)=[sum((progn1-predict(mdl2, xk2)).^2)];
        end;
    end;
end;

```

Рис. 6. Фрагмент кода в среде Matlab

Fig. 6. Code snippet in Matlab

Так, для содержания в концентрате по Au имеем, что искомая зависимость имеет вид:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= b_0 + b_1x_1 + b_2x_3 + b_3x_3^2 + b_4x_1x_3 = \\
 &= b_0 + b_1x_1 + b_2\frac{x_1}{x_2} + b_3\left(\frac{x_1}{x_2}\right)^2 + b_4\frac{x_1^2}{x_2}.
 \end{aligned}$$

Или, конкретизируя параметры b_i , получим:

$$y_1 = -48,85 + 1,6x_1 + 21,9\frac{x_1}{x_2} - 0,65\left(\frac{x_1}{x_2}\right)^2 - 0,16\frac{x_1^2}{x_2}.$$

Из вышесказанного можно заключить, что содержание в концентрате по Au на данной установке прямо пропорционально расходу и квадрату расхода флюидизационной воды и имеет обратную зависимость от времени открытия пережимных клапанов.

Для содержания в хвостах зависимость принимает вид:

$$y_2 = b_0 + b_1x_1 = 1,31 + 0,004x_1.$$

Содержание в хвостах по Au слабо зависит от настраиваемых параметров, что позволяет сделать вывод об их постоянной величине для данной установки.

Содержание концентрата по Pb:

$$\begin{aligned}
 y_3 &= b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_4 = \\
 &= b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3\sqrt{\frac{x_1}{x_2}}.
 \end{aligned}$$

После расчета параметров b_i имеем:

$$y_3 = 7,2 + 0,04x_1 - 0,06x_2 - 3,99\sqrt{\frac{x_1}{x_2}}.$$

Полученная регрессионная модель показывает, то содержание концентрата по свинцу слабо зависит от самих настраиваемых параметров x_1 и x_2 , однако имеет чётко выраженную обратно пропорциональную зависимость от их комбинации.

Для выхода хвостов по свинцу имеем:

$$y_4 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_1^2 = 6,26 - 0,34x_1 + 0,005x_1^2.$$

Полученный результат для содержания в хвостах по Pb достаточно хорошо согласуется с аналогичным итогом для хвостов по Au и также слабо зависит от настраиваемых параметров, что позволяет судить о постоянстве данной величины для данной установки.

Выводы

На основании проведенных исследований установлена принципиальная возможность эффективного применения технологии CVD в качестве гравитационного обогащения. Результаты концентратора CVD значительно превосходят в эффективности отсадочные машины.

В результате работы сформирована простая и эффективная методика обработки результатов тестов обогатительного оборудования, базирующаяся на методе группового учета аргументов, реализованная в среде MatLAB.

На основании многочисленных вычислительных экспериментов построены статистически значимые модели, описывающие зависимость содержания Au и Pb в хвостах и концентрате от различных настраиваемых параметров оборудования, обоснована их эффективность, позволяющая применять данные модели в дальнейших исследованиях по применению CVD

технологии. Установленная статистически значимая зависимость между содержанием в концентре и настраиваемыми параметрами позволяет проводить предварительные расчеты по эффективности внедрения CVD технологии на горно-обогатительных предприятиях.

На основании разработанных моделей установлен факт отсутствия зависимости между содержанием в хвостах на обеих установках и временем открытия пережимных клапанов.

Анализ полученных данных показал, что наиболее эффективной схемой применения технологии Knelson CVD является установка данных концентраторов во вторичном цикле измельчения. В результате проведения тестов на сливе мельницы были получены более высокие показатели извлечения, коэффициента концентрации и содержания целевых металлов в концентрате, в сравнении с показателями, полученными на сливе гидроциклона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чмыхалова С.В. Влияние снижения качества и изменчивости руды на ресурсноэкологические показатели горного производства (на примере АО «Апатит») // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 2. – С. 73–80.
2. Агабалян А.Ю. Техничко-экономическое обоснование полноты извлечения металлов в концентрат // Вестник Национального политехнического университета Армении. Металлургия, материаловедение, недропользование. – 2016. – № 2. – С. 97–108.
3. Шумилова Л.В., Костинова О.С. Анализ влияния вещественного состава руды серебро-полиметаллического месторождения «Гольцовое» на показатели обогащения // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2015. – № 5 (120). – С. 46–55.
4. Gibson B., Wonyen D.G., Chehreh Chelgani S. A review of pretreatment of diasporic bauxite ores by flotation separation // Minerals Engineering. – 2017. – № 114. – P. 64–73.
5. Chanturiya V.A. Innovation-based processes of integrated and high-level processing of natural and technogenic minerals in Russia // IMPC 2018 – 29th International Mineral Processing Congress. – Moscow, Russia, 2019. – P. 2–12.
6. Мязин В.П., Литвинцева В.И. Изыскание новых селективных реагентов для повышения эффективности флотации свинцово-цинковых руд Ново-широкинского месторождения // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2017. – Т. 23. – № 2. – С. 4–15.
7. Investigation of two-stage depressing by using hydrophilic polymer to improve the process of fluorite flotation / C. Zhang, W. Sun, Y. Hu, Q. Guan, J. Gao // Journal of Cleaner Production. – 2018. – V. 193. – P. 228–235.
8. The current state and future directions of percolation leaching in the Chinese mining industry: Challenges and opportunities / I.M.S.K. Plankoon, Y. Tang, Y. Ghorbani, X. Deng, D. McBride // Minerals Engineering. – 2018. – V. 125. – P. 206–222.
9. Исследование обогатимости полиметаллической руды месторождения Забайкальского края / П.К. Федотов, А.Е. Сенченко, К.В. Федотов, А.Е. Бурдонов // Обогащение руд. – 2019. – № 3. – С. 4–15.
10. IT enabled platforms for integrated design and optimization of mining operations and mineral processing plants / B.P. Pradip Gautham, S. Reddy, B. Rai, V. Runkana // IMPC 2018 – 29th International Mineral Processing Congress. – Moscow, Russia, 2019. – P. 3475–3488.
11. Montiel L., Dimitrakopoulos R. Simultaneous stochastic optimization of production scheduling at Twin Creeks Mining Complex, Nevada // Mining Engineering. – 2018. – V. 70 (12). – P. 48–56.
12. Optimization of gold ore Sumbawa separation using gravity method: Shaking table / A.D. Ferdana, H.T.B.M. Petrus, I.M. Bendiyasa, F. Hamada, T. Sachiko // AIP Conference Proceedings. – 2018. – 020070.
13. Применение Knelson CVD-технологии для обогащения золото-свинцовой руды / В.В. Пелих, В.М. Салов, А.Е. Бурдонов, Н.Д. Лукьянов // Обогащение руд. – 2019. – № 1. – С. 3–11.
14. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации сложных систем. – Киев: Наукова думка, 1982. – 296 с.
15. Ивахненко А.Г., Мюллер Й.А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. – Киев: Техніка, 1985. – 223 с.
16. Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М. Сравнительный анализ методов регрессии и метода группового учета аргументов при моделировании процессов переработки полезных ископаемых // Известия Томского политехнического университета. – 2016. – Т. 327 – № 4. – С. 23–34.
17. Баласанян С.Ш. Метод стратифицированной формализации сложных технологических систем со многими состояниями // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 1. – С. 6–18.
18. Стрижов В.В., Крымова Е.А. Методы выбора регрессионных моделей. – М.: ВЦ РАН, 2010. – 60 с.
19. Application of GMDH and variable co-integration theory in powerload forecasting / J. Gu, L.L. Chu, Y.J. Zhang, W.G. Shi // Power Syst. Prot. Control. – 2010. – № 38. – P. 80–85.
20. Onwubolu G. GMDH-methodology and implementation in MATLAB. 1st ed. – London, UK: Imperial College Press, 2016. – 74 p.
21. Najafzadeh M., Saberi-Movhed F., Sarkamaryan S. NF-GMDH-based self-organized systems to predict bridge pier scour depth under debris flow effects // Mar. Georesour. Geotechnol. – 2017. – № 36. – P. 589–602.
22. Сергеев В.И., Нгуен Т.Х.Ф. Модели и алгоритмы адаптивной интерпретации результатов комбинированных газогидродинамических исследований интеллектуальных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 10. – С. 67–75.

Поступила 24.01.2020 г.

Информация об авторах

Пелих В.В., инженер по наладке систем управления и монтажу технологического оборудования ООО «ФЛСмидт Рус» в г. Иркутске.

Салов В.М., кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизации технологических процессов, Иркутский национальный исследовательский технический университет.

Бурдонов А.Е., кандидат технических наук, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых и охраны окружающей среды, Иркутский национальный исследовательский технический университет.

Лукьянов Н.Д., кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем, Иркутский национальный исследовательский технический университет.

UDC 622.7+541.183+66-5

ESTABLISHMENT OF TECHNOLOGICAL DEPENDENCE OF KC-CVD6 CONCENTRATOR OPERATION BY MEANS OF THE ARGUMENT GROUP ACCOUNTING METHOD

Vladislav V. Pelikh¹,
salov@istu.edu

Valery M. Salov²,
salov@istu.edu

Alexander E. Burdonov²,
slimbul@inbox.ru

Nikita D. Lukyanov²,
Lukyanov.n@gmail.com

¹ FLSmidt Rus in Irkutsk,
1/4, Oktyabrskoy revolyutsii street, Irkutsk, 664007, Russia.

² Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

The relevance of the research is caused by the acquisition of new knowledge on optimization of the technological parameters of centrifugal concentrator operation using the Knelson CVD technology, namely: setting the frequency of opening the valves and the time during which the valves remain open.

The aim of the research is a statistical analysis of the results of semi-industrial studies of the Knelson CVD technology applicability on various products of the factory, using the method of group accounting of arguments, to derive dependencies between the concentrate yield and tunable parameters, which allow preliminary calculations of the effectiveness of implementation of this technology at the processing enterprises.

Objects: products obtained as a result of hydrocyclone operation, as well as the technological parameters of the centrifugal concentrators.

Methods: general methods of mathematical statistics, in particular, regression analysis methods aimed at constructing statistically significant models describing the dependence of a variable on the set of regressors. Also, along with the classical apparatus of regression analysis, the method of group accounting of arguments was used. The main idea of the method is to build a set of models of a given class, and to select optimal one among them.

Results. The authors have developed the effective method for processing the results of tests carried out on the processing equipment, based on the method of group accounting of arguments. Based on the obtained data, statistically significant models were constructed, describing the dependence of the content in tails and the concentrate on valuable components on various adjustable equipment parameters, and their effectiveness was justified, which makes it possible to apply these models in further studies on the application of CVD technology. The paper demonstrates the application of the method of group accounting of arguments using the example of constructing polynomial regression models containing non-linear combinations of regressors.

Key words:

Knelson CVD, gravity concentration, gold, lead, extraction, tails, technology.

REFERENCES

- Chmykhalova S.V. The impact of reducing the quality and variability of ore on resource-environmental indicators of mining production (for example, JSC «Apatite»). *Mining informational and analytical bulletin*, 2018, no. 2, pp. 73–80. In Rus.
- Agabalyan A.Yu. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie polnoty izvlecheniya metallov v kontsentrat [A feasibility study on the complete extraction of metals into concentrate]. *Herald of the National Polytechnic University of Armenia. Metallurgy, materials science, subsoil use*, 2016, no. 2, pp. 97–108.
- Shumilova L.V., Kostikova O.S. Analysis of the influence of the material composition of the ore of the silver-polymetallic deposit «Goltsovoe» on the enrichment indicators. *Transbaikalian State University Journal*, 2015, no. 5 (120), pp. 46–55. In Rus.
- Gibson B., Wonyen D.G., Chehreh Chelgani S. A review of pre-treatment of diasporic bauxite ores by flotation separation. *Minerals Engineering*, 2017, no. 114, pp. 64–73.
- Chanturiya V.A. Innovation-based processes of integrated and high-level processing of natural and technogenic minerals in Russia. *IMPC 2018 – 29th International Mineral Processing Congress*. Moscow, Russia, 2019, pp. 3–12.
- Myazin V.P., Litvintseva V.I. Search for new selective reagents to increase the efficiency of flotation of lead-zinc ores of the Novoshirokinsky deposit. *Transbaikalian State University Journal*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 4–15. In Rus.
- Zhang C., Sun W., Hu Y., Guan Q., Gao J. Investigation of two-stage depressing by using hydrophilic polymer to improve the process of fluorite flotation. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 193, pp. 228–235.
- Ilankoon I.M.S.K., Tang Y., Ghorbani Y., Deng X., McBride D. The current state and future directions of percolation leaching in the Chinese mining industry: Challenges and opportunities. *Minerals Engineering*, 2018, vol. 125, pp. 206–222.
- Fedotov P.K., Senchenko A.E., Fedotov K.V., Burdonov A.E. Study of the enrichment of polymetallic ore deposits of the Trans-Baikalian Territory. *Obogashchenie Rud*, 2019, no. 3, pp. 4–15. In Rus.
- Pradip, Gautham, B.P., Reddy S., Rai B., Runkana V. IT enabled platforms for integrated design and optimization of mining operations and mineral processing plants. *IMPC 2018 – 29th International Mineral Processing Congress*. Moscow, Russia, 2019, pp. 3475–3488.
- Montiel L., Dimitrakopoulos R. Simultaneous stochastic optimization of production scheduling at Twin Creeks Mining Complex, Nevada. *Mining Engineering*, 2018, vol. 70 (12), pp. 48–56.
- Ferdana A.D., Petrus H.T.B.M., Bendiyasa I.M., Hamada F., Sachiko T. Optimization of gold ore Sumbawa separation using

- gravity method: Shaking table. *AIP Conference Proceedings*, 2018, 020070.
13. Pelikh V.V., Salov V.M., Burdonov A.E., Lukyanov N.D. Application of Knelson CVD technology for beneficiation of gold-lead ore. *Obogashchenie Rud*, 2019, no. 1, pp. 3–11. In Rus.
 14. Ivakhnenko A.G. *Induktivny metod samoorganizatsii slozhnykh sistem* [Inductive method of self-organization of complex systems]. Kiyev, Naukova dumka Publ., 1982. 296 p.
 15. Ivakhnenko A.G., Muller Y.A. *Samoorganizatsiyya prognoziruuyushchikh modeley* [Self-organization of forecasting models]. Kiev, Tekhnika Publ., 1985. 233 p.
 16. Balasanyan S.Sh., Gevorgyan E.M. Comparative analysis of the regression methods and the method of group accounting of arguments in the modeling of mineral processing processes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2016, vol. 327, no. 4, pp. 23–34. In Rus.
 17. Balasanyan S.Sh. The method of stratified formalization of complex technological systems with many states. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 1, pp. 6–18.
 18. Strizhov V.V., Krymova E.A. *Metody vybora regressionnykh modeley* [Methods for choosing regression models]. Moscow, VTS RAN Publ., 2010. 60 p.
 19. Gu J., Chu L.L., Zhang Y.J., Shi W.G. Application of GMDH and variable co-integration theory in power load forecasting. *Power Syst. Prot. Control*, 2010, vol. 38, pp. 80–85.
 20. Onwubolu G. *GMDH-methodology and implementation in MATLAB*. 1st ed. London, UK, Imperial College Press, 2016. 74 p.
 21. Najafzadeh M., Saberi-Movhed F., Sarkamaryan S. NF-GMDH-based self-organized systems to predict bridge pier scour depth under debris flow effects. *Mar. Georesour. Geotechnol.*, 2017, vol. 36, pp. 589–602.
 22. Sergeev V.L., Nguyen T.H.F. Models and algorithms for adaptive interpretation of the results of combined gas-hydrodynamic studies of intelligent wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 10, pp. 67–75.

Received: 24 January 2020.

Informaton about the authors

Vladislav V. Pelikh, engineer for control system adjustment and technological equipment installation, FLSmidt Rus in Irkutsk.

Valery M. Salov, Cand. Sc., professor, Irkutsk National Research Technical University.

Alexander E. Burdonov, Cand. Sc., associate professor, Irkutsk National Research Technical University.

Nikita D. Lukyanov, Cand. Sc., associate professor, Irkutsk National Research Technical University.

УДК 550.832.54

ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛЕРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОН-НЕЙТРОННОГО КАРОТАЖА

Фоменко Николай Евгеньевич¹,
fnegeophyskohle@yandex.ru

Попов Виктор Владимирович²,
viktor_popov_34@mail.ru

Коваленко Андрей Сергеевич³,
a_kovalenko_77@mail.ru

¹ Южный федеральный университет,
Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40.

² Южно-Российский политехнический университет,
Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

³ АО «Всероссийский научно-исследовательский геологоразведочный институт угольных месторождений»,
Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 3.

Актуальность работы определяется необходимостью оптимизации комплекса геофизических исследований углеразведочных скважин посредством импульсного нейтрон-нейтронного каротажа. Постановка проблемы обусловлена современными тенденциями развития угольной отрасли и новыми аппаратными и техническими разработками в разведочной и промышленной геофизике.

Цель: показать возможности и результативность импульсного нейтрон-нейтронного каротажа в углеразведочных скважинах на материалах опытно-экспериментальных работ в Восточном Донбассе.

Объект: каротажные диаграммы импульсного нейтрон-нейтронного каротажа, зарегистрированные в углеразведочных скважинах Восточного Донбасса.

Методы: анализ каротажных кривых импульсного нейтрон-нейтронного каротажа на предмет результативности использования метода в стандартном комплексе для решения задач, поставленных геологической службой по выделению: 1) целевых объектов, т. е. угольных пластов с определением их положения в разрезе; 2) пород, вмещающих угольные пласты.

Результаты. Выполнено обоснование применения импульсного нейтрон-нейтронного каротажа для изучения геологических разрезов угольных скважин. Изучены качественные и количественные характеристики времени жизни тепловых нейтронов в породах угленосной толщи. Показаны возможности метода по оценке марочного состава углей и их зольности. Произведено сопоставление каротажных диаграмм, зарегистрированных на различных временных задержках и с различной скоростью подъёма скважинного прибора, на предмет выбора оптимальных условий геофизических работ этим методом. Установлено, что все литологические разности, включая тонкие угольные пласты, однозначно выделяются методом импульсного нейтрон-нейтронного каротажа. Выполнен анализ разрешающей способности импульсного нейтрон-нейтронного каротажа на фоне каротажных кривых поискового комплекса геофизических исследований скважин, включая методы электрического, радиоактивного, акустического каротажа и калориметрию. Сделан акцент на положительных сторонах и недостатках метода гамма-гамма каротажа с мягким источником (ГГК-С). Предложено при наличии организационно-технических сложностей заменять исследования ГГК-С импульсным нейтрон-нейтронным каротажем.

Ключевые слова:

Импульсный нейтрон-нейтронный каротаж, углеразведочная скважина, время жизни тепловых нейтронов, рациональный комплекс каротажа, пласты аргиллитов, алевролитов, песчаников и известняков, Восточный Донбасс.

Введение

Импульсный нейтронный каротаж (ИНК) получил развитие в отечественной практике геофизических исследований скважин в начале 60-х гг. минувшего столетия. За прошедшее время созданы современная аппаратура и интерпретационное обеспечение. Метод широко применяется в настоящее время в РФ и за рубежом, особенно в нефтегазовой геологии [1–6]. Физико-геологическими предпосылками возникновения и становления ИНК, как известно, является наличие водородосодержания в горных породах за счёт их пористости, нефте-, газо- и водонасыщенности. Наиболее прогрессивной технологией ИНК является импульсный нейтрон-нейтронный каротаж (ИННК), в котором горные породы, пересечённые скважиной, облучаются кратковременными потоками быстрых нейтронов, следующих через определённые промежутки времени. В этом случае соотношение плотностей тепловых нейтронов в пластах горных пород зависит преимущественно от поглощающих свойств этих пород. Существенное преимущество ИННК состоит в: 1) отсутствии стационарных источников нейтронов, требующих содержания в специальных контейнерах; 2) создании значительно большей (до 15 МэВ) энергии нейтронов, испускаемых скважинным генератором нейтронов, что позволяет исследовать околоскважинное пространство в радиусе до 0,8 м; 3) многоканальности регистрирующей аппаратуры с соответствующим выбором времени задержки (τ_d) [7, 8].

В 70–80-х гг. двадцатого столетия были выявлены предпосылки использования ИННК и осуществлено

первое опробование метода на угольных месторождениях [9, 10]. Результаты исследований показали, что угли и вмещающие их породы, несмотря на низкое в них водородосодержание, можно безошибочно разделять по средним временам жизни тепловых нейтронов. Также предложена методика определения по данным ИННК зольности углей в скважинах [11]. Однако, в отличие от массового использования ИННК в нефтяной отрасли, на угольных месторождениях эти исследования не являлись систематическими. В те годы существующими поисковым и детализационным комплексами геофизических исследований скважин (ГИС) на угольных месторождениях (методы КС, БК, ГК, ГГК-П, ГГК-С, АК, каверно- и инклинометрия) [12] положительно решались геологические задачи по определению глубины залегания, мощности, структуры, зольности углей, физико-механических свойств вмещающих пород и др. Применение ИННК в этих комплексах требовало до- и переоборудования серийных каротажных станций, имеющих ограниченное число регистрирующих каналов и стендовых ниш для размещения новых аппаратурных панелей.

В настоящее время в РФ геологоразведочные работы ориентированы на поиски энергетических и коксующихся углей особо ценных марок и выполняются в ограниченных объёмах в Южно-Якутском бассейне (республика Саха), Печорском бассейне (республика Коми), Кузнецком и Ом-сукчанском бассейнах (Кемеровская и Магаданская области), месторождениях угля на о. Сахалин, в Приморском крае и республике Бурятия. Геофизические исследования скважин часто выполняются урезанным комплексом методов, в том числе из-за отсутствия возможностей хранения и перевозки радиоактивных источников. В существующих единичных каротажных отрядах в большинстве случаев ещё не осуществлён переход на освоение и производственное применение новых агрегатированных каротажных комплексов и технических средств, позволяющих выполнять исследования в отдалённых друг от друга регионах, несмотря на наличие современных прогрессивных разработок в нефтяной и других отраслях [13–19]. Всё это предопределяет необходимость оптимизации комплекса геофизических исследований углеразведочных скважин, в том числе и за счёт метода ИННК. Угольный каротаж должен представляться в виде многоканальной цифровой компьютеризированной каротажной станции с комплексными скважинными приборами [20].

Физико-геологические предпосылки применения импульсных нейтронных методов на угольных месторождениях

Угли, в ряду их метаморфизма (бурые, каменные, антрациты), отличаются от вмещающих пород веществным составом и физическими свойствами [21]. Для ИННК основным показателем является время жизни тепловых нейтронов τ . Для этого в породах изучается временная зависимость распределения плотности тепловых нейтронов. На рис. 1, а приведены рассчитанные кривые вероятностного распределения (Р) среднего времени жизни нейтронов в породах угленосной толщи Восточного Донбасса. Из рисунка следует, что все литологические разности уверенно разделяются по показателю τ , что создаёт предпосылки для успешного приме-

нения ИННК на угольных месторождениях. Наибольший размах вариации имеют кривые песчаников, углей и известняков, что обусловлено изменениями их вещественно-петрографического состава и текстурно-структурных особенностей. Песчаники, например, различаются между собой по крупности зерна и микрослоистости в зависимости от речной, переходной или морской групп фаций; известняки могут «переходить» в мергелистую группу, а углям свойственны колебания зольности, вызванной примесными включениями глинистых и др. минералогических фракций.

На рис. 1, б представлен осреднённый элементный состав углей для условий Восточного Донбасса. Заметим при этом, что, согласно теоретическим основам ИНК, для показателя τ определяющим является параметр отношения сечения захвата ($\sigma_{\text{з}}$) к массовому числу элемента (A_i), т. е. $\sigma_{\text{з}}/A_i$. Этот параметр максимален для водорода и, по отношению к нему, меньше для азота в 2 раза, для серы – в 20 раз, для углерода – в 1000 раз и для кислорода – в 26000 раз. Следовательно, время жизни тепловых нейтронов для органической части угля ($\tau_{\text{орг}}$) определяется в основном содержанием водорода (H), азота (N), серы (S), и почти не зависит от содержания углерода (C) и кислорода (O). Наибольшее влияние на $\tau_{\text{орг}}$, соответственно, оказывает содержание водорода, а изменение процентного содержания N и S мало сказывается на $\tau_{\text{орг}}$ (рис. 1, в). В практических целях, если снять значения $\tau_{\text{угл}}$ с каротажной диаграммы, можно по графику, приведенному на рис. 1, г, определить $\tau_{\text{орг}}$ и далее по графику 1, в оценить процентное содержание водорода. Максимальная ошибка, которая может быть при определении $\tau_{\text{орг}}$, составляет 100 мкс. Это приводит к ошибке оценки водородосодержания 0,2 %. Следовательно, зная содержание H в органической части угля, можно определить марку угля (содержание H характеризует степень метаморфизма углей).

Расчёты и построения показали возможность оценки по данным ИННК зольности углей (A). С этой целью был взят постоянный состав органической части угля и золы для марок А1 и А2. Пористость этих марок не превышает первых процентов, поэтому расчёты графиков зависимости среднего времени жизни тепловых нейтронов в углях различной зольности произведены для нулевой, пяти и десяти процентной пористости (рис. 2, а).

Значения скорости счёта можно определять по результатам каротажа. Коэффициент пористости известен по результатам лабораторных определений. Удовлетворительная точность достигается, если процентное содержание водорода в органической части угля колеблется в пределах от 1,1 до 1,6 %. Время жизни тепловых нейтронов τ рассчитывается по формуле:

$$\tau = \frac{t_{32} - t_{31}}{\ln N(t_{\text{пл.31}}) - \ln N(t_{\text{пл.32}})},$$

где t_1, t_2 – временные задержки, на которых производится снятие скорости счёта (N) в анализируемом пласте.

Другой, не менее точный, способ определения τ – графический. Для этого на прямолинейном участке кривой спада плотности тепловых нейтронов или на касательной к ней, в правой части, находят точки, в которых скорость счёта отличается на единицу, т. е. $(\ln N(t_1) - \ln N(t_2)) = 1$. При этом τ соответствует отрезку $(t_1 - t_2)$ на оси абсцисс (рис. 2, б). Разработаны и другие способы определения зольности углей по данным ИНК [11].

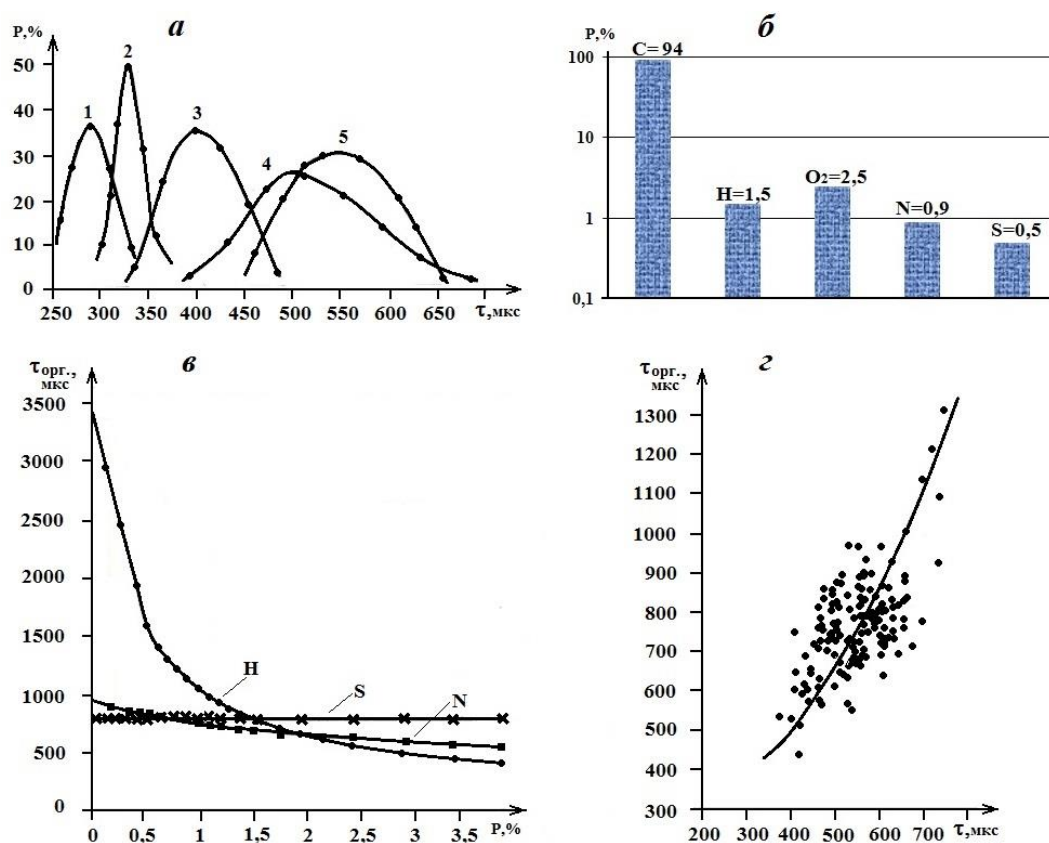


Рис. 1. Нейтронные свойства угленосной толщи: а) среднее время жизни нейтронов (1 – аргиллит, 2 – алевролит, 3 – песчаник, 4 – уголь, 5 – известняк); б) элементный состав углей марки А1 и А2; в, г) среднее время жизни тепловых нейтронов в органической части угля при различном содержании водорода, серы и азота (в) и при увеличении зольности (г)

Pic. 1. Neutron properties of coal-bearing stratum: а) mean neutron lifetime (1 – argillite, 2 – aleurolite, 3 – sandstone, 4 – coal, 5 – limestone); б) element composition of coals of A1 and A2 marks; в, г) thermal neutron lifetime in organic part of coal at different content of hydrogen, sulfur and nitrogen (в) and by increasing ash content (г)

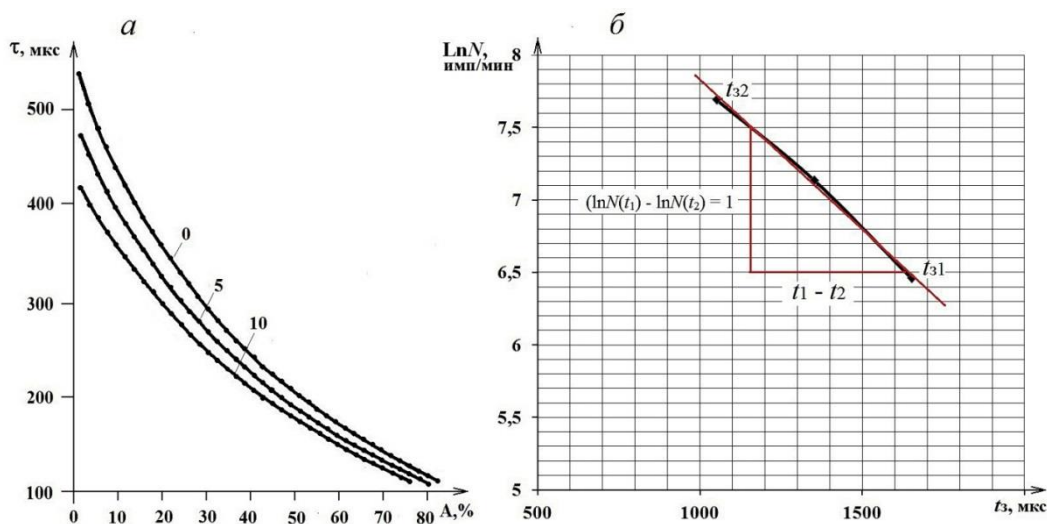


Рис. 2. Зависимость среднего времени жизни тепловых нейтронов углей марки А1 и А2 от их зольности (а) и пример определения плотности тепловых нейтронов графическим способом (б). Шифр кривых на фрагменте а соответствует коэффициенту пористости

Pic. 2. Dependence of mean thermal neutron lifetime of A1 and A2 mark coals on their ash content (а) and example of density thermal neutron definition through graphic method (б). The cipher of curves on the fragment а corresponds to the porosity coefficient

Выбор оптимальных условий регистрации диаграмм ИННК

Эксперименты в углеразведочных скважинах проводились аппаратурой ИГН-6, где источником возбуждения нейтронов служила нейтронная трубка НТ-16 с частотой посылок импульсов нейтронов 20 Гц и длительностью импульсов нейтронов 3 мкс (выход 5×10^7 нейтр./с). Детектором служил гелиевый счетчик

СНМ-18-1. Задачи исследований состояли в регистрации каротажных кривых на различных временных задержках (t_z) и при разной скорости подъема скважинного прибора (V).

На рис. 3, 4, а сопоставлены диаграммы ИННК на различных задержках, зарегистрированные в углеразведочной скважине в интервалах разреза с мощными пластами известняка и песчаника.

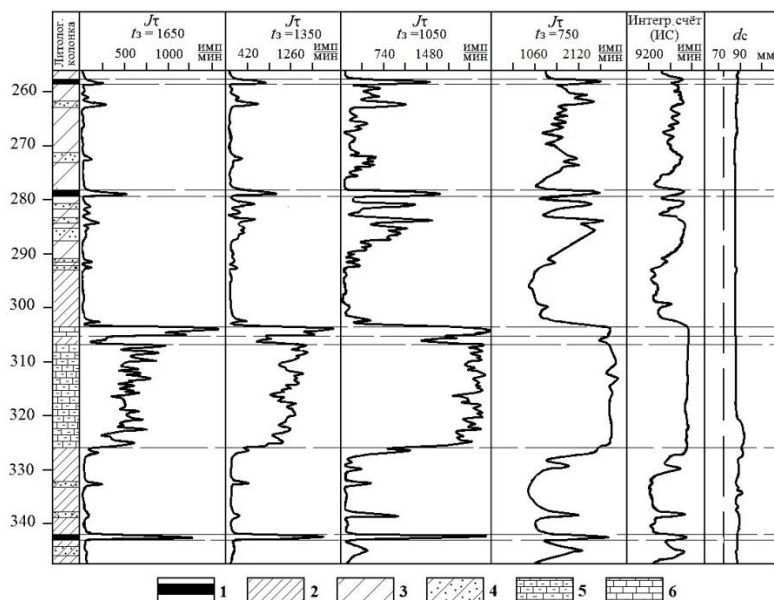


Рис. 3. Сопоставление диаграмм ИННК, зарегистрированных в углеразведочной скважине на различных задержках в Восточном Донбассе: 1 – уголь; 2 – аргиллит; 3 – алевролит; 4 – алевролит крупнозернистый (песчаный); 5 – известняк глинистый (мергель); 6 – известняк

Fig. 3. Matching the Pulsed Neutron-Neutron Logging logging (PNNL) diagrams registered in the coal exploration wells with different time delays in the Eastern Donbass: 1 – coal; 2 – argillite; 3 – aleurolite; 4 – aleurolite coarse-grained (sandy); 5 – limestone clayey (marl); 6 – limestone

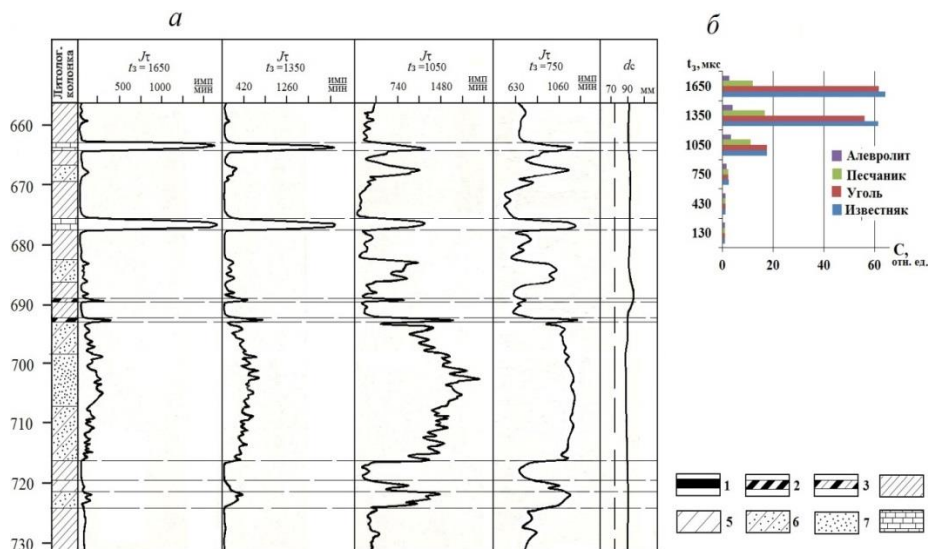


Рис. 4. Сопоставление диаграмм ИННК, зарегистрированных в углеразведочной скважине на различных задержках (а) и гистограмма соотношения амплитудных значений кривых ИННК для углей и вмещающих пород (б) в Восточном Донбассе: 1 – уголь, 2 – сланец углистый, 3 – сланец углисто-глинистый, 4 – аргиллит, 5 – алевролит, 6 – алевролит крупнозернистый (песчаный), 7 – песчаник, 8 – известняк

Fig. 4. Matching the PNNL diagrams registered in the coal exploration well at different delays (a) and a histogram of the ratio of the amplitude values of the PNNL curves for coals and host rocks (b) in the Eastern Donbass: 1 – coal, 2 – shale coal, 3 – shale carbonaceous-argillaceous, 4 – argillite, 5 – aleurolite, 6 – aleurolite coarse-grained (sandy), 7 – sandstone, 8 – limestone

Из приведенных данных следует, что метод ИННК обладает высокой разрешающей способностью в интервале задержек 700–2000 мкс. На этих задержках все пересекающиеся скважиной литологические разности, включая тонкие пласты углей, углистых сланцев и известняков, выделяются однозначно. Это следует и из диаграммы значений скорости счёта тепловых нейтронов для пластов известняков, углей, песчаников и алевролитов по отношению к аргиллитам, в которых поглощение этих нейтронов максимально (рис. 4, б). Полученные результаты соответствуют расчётным значениям (рис. 1, а). Здесь следует отметить, что современные аппаратные разработки и компьютерное обеспечение каротажа позволяют производить одновременную регистрацию сколь угодно количества кривых на различных задержках, что предопределяет возможности внутриметодного комплексирования. Например, на задержках 750 и 1050 мкс проявляется общая ситуационная картина литологической характеристики угленосной толщи, а на более высоких временных задержках – 1350 и 1650 мкс – создаются предпосылки разделения близких по описательным признакам и минералогическому составу литотипов (песчаники и пес-

чаные алевролиты, а также уголь и углистые сланцы). Разрешающая способность ИННК в определении мощности (толщины) пластов и пропластков оценивается величиной порядка 0,06–0,08 м при длине каротажного зонда $L=0,4$ м. Это подтверждается теоретическими расчётами, согласно которым мощность выделяемых пропластков очень мало зависит от длины зонда, поскольку максимальное влияние на детектор оказывает только небольшая область, непосредственно прилегающая к нему (детектору) [7]. Существует оптимальный зонд, для которого плотность тепловых нейтронов выходит на асимптоту при минимальной задержке. Было подсчитано, что оптимальная длина зонда ($L_{\text{опт.}}$) для антрацита равна 32 см. На рис. 5, а сопоставлены кривые ИННК и бокового каротажа (БК) в интервале мощного пласта известняка сложного строения. Как видно из рисунка, тонкий слой чистого известняка, оконтуренный в центральной части пласта двумя слоями мергеля, можно однозначно выделить методом ИННК при $L_{\text{опт.}}=0,4$ м в комплексе с методом БК. Это же относится и к пропластку алевролита в пласте аргиллита на глубине 303,4 м.

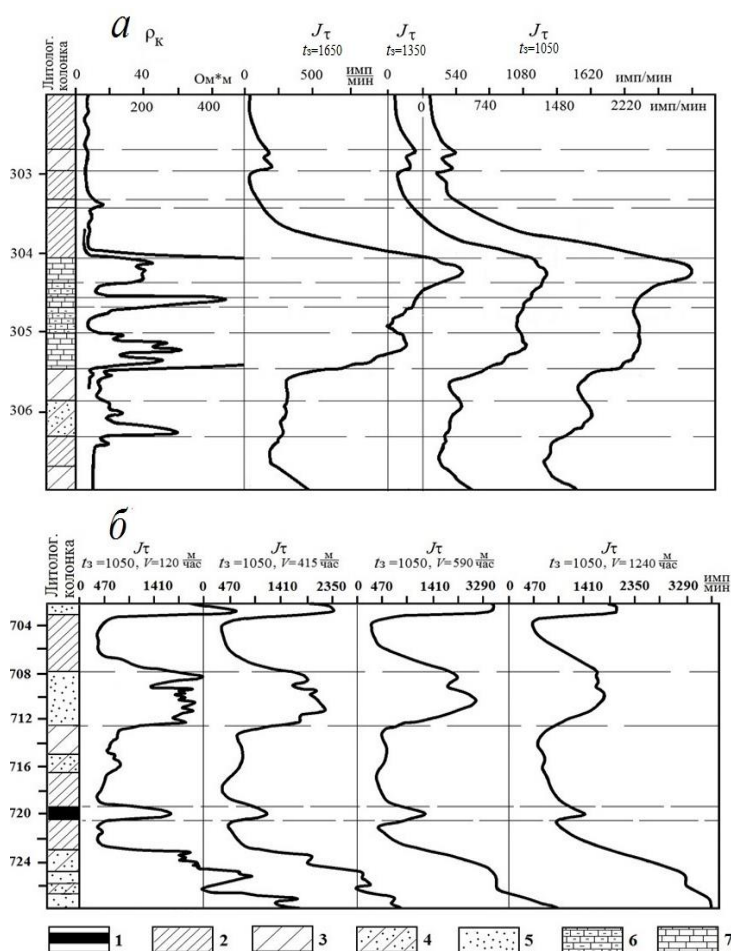


Рис. 5. Литологическое расчленение по диаграммам ИННК и БК пласта известняка сложного строения (а) и демонстрация изменения формы кривых ИННК, зарегистрированных с различной скоростью подъёма каротажного зонда (б): 1 – уголь, 2 – аргиллит, 3 – алевролит, 4 – алевролит крупнозернистый (песчаный), 5 – песчаник, 6 – известняк глинистый (мергель), 7 – известняк

Pic. 5. Lithological dismemberment through PNNL and Lateral Logging (LL) curves of the complex structured limestone layer (а) and demonstration of change in shapes of curves registered with different velocity of logging zond lifting (б): 1 – coal, 2 – argillite, 3 – aleurolite, 4 – aleurolite coarse-grained (sandy), 5 – sandstone, 6 – limestone clayey (marl), 7 – limestone

Рис. 5, б иллюстрирует кривые ИННК, зарегистрированные с различной скоростью подъёма каротажного зонда (V). Проведенный эксперимент показывает, что с увеличением V , соответственно, происходит сдвиг каротажных диаграмм. Можно заключить, что оптимальная величина V не должна превышать 250 м/ч, а при детализации угольных пластов V целесообразно уменьшать до 100 м/ч. Этот показатель соответствует скорости записи и в других методах радиоактивного каротажа на угольных месторождениях (гамма-гамма и гамма каротаж) [21].

Применение ИННК в рациональном комплексе каротажа на угольных месторождениях

Нормативными требованиями Государственной комиссии запасов Российской Федерации (ГКЗ РФ) геофизические исследования в угольных скважинах могут быть использованы для: 1) определения последовательности залегания и литологической принадлежности пород угленосной толщи; 2) выявления в разрезах скважин угольных пластов и их стратиграфических признаков; 3) получения сведений о толщинах и структурно-текстурных особенностях угольных пластов; 4) определения отдельных качественных и количественных показателей углей; 5) характеристики тектонических разрывных нарушений, а также крепости и упруго-деформационных свойств углей и вмещающих пород; 6) изучения геотермического состояния угленосной толщи и пространственного положения (угол наклона и азимут) осей скважин. Геофизические измерения выполняются в скважине в цифровом виде с помощью аппаратно-методических комплексов (АМК) и комплексными скважинными приборами. Детальность и разрешающая способность геофизических исследований определяются размерами скважинных датчиков и шагом квантования, который выбирается в зависимости от мощности и строения угольных пластов на месторождении и необходимости их детальных исследований. Шаг квантования для месторождений с тонкими и маломощными пластами (до 3,5 м) выбирается в пределах 0,02–0,03 м. Для месторождений с пластами средней и большой мощности (свыше 3,5 м) этот шаг может быть увеличен до 0,04–0,05 м. По всему стволу скважины выполняются измерения в масштабе глубин 1:200, а по интервалам угольных пластов – в масштабе 1:20 или 1:50. Масштаб 1:20 применяется на месторождениях с тонкими угольными пластами (до 3,5 м), при больших мощностях используется масштаб 1:50.

Согласно нормативным документам [12], рациональный комплекс методов каротажа угольных скважин состоит из основной части, которая выполняется во всех скважинах, и дополнительной, вводимой в этот комплекс в определенных условиях для решения геологических задач. Необходимость, состав и решаемые задачи дополнительной части обосновываются в проекте. На рис. 6 приведенный комплекс включает БК, метод кажущихся сопротивлений потенциал-зондом (КС-ПЗ), акустический каротаж (АК), радиоактивные методы гамма-гамма каротажа (ГГК), гамма каротажа

(ГК), ИННК и кавернометрию (КМ). Перечисленным комплексом полностью решаются задачи по детальному изучению стратиграфии геологического разреза скважины, выявлению в нём целевых объектов (угольных пластов), установлению соответствия последних положению в нормативном кластере. Анализ кривых показывает, что пласты углей как основной объект поисков и разведки однозначно выделяются всеми перечисленными методами. Следовательно, выполняются нормативные требования для угольного каротажа, согласно которым угольный пласт должен чётко устанавливаться по данным не менее трех каротажных кривых различных методов [12].

Здесь следует отметить, что в стандартном комплексе ведущим (основным) методом выделения угольных пластов является каротаж ГГК, в частности ГГК-С (селективный гамма-гамма каротаж с применением «мягких» источников гамма-квантов). Применение метода требует наличия радиоактивного источника с соответствующим его хранением и перевозкой в специальных свинцовых контейнерах. Эти условия могут быть реализованы только в стационарных геофизических партиях, функционирующих на территориях угольных бассейнов или месторождений, где планируются и выполняются регулярные геолого-разведочные работы. В других случаях, когда объёмы таких работ предельно ограничены и территориально разрознены, использование радиоактивных источников не оправдывается экономическими затратами и следует искать альтернативную замену методу ГГК. Таким методом может являться ИННК. Поэтому целесообразно выполнить сравнительную оценку ГГК и ИННК на примере каротажных кривых, сопоставленных на рис. 6. Для этого первым порядком произведём анализ кривой ГГК-С. Эта модификация ГГК имеет преимущество перед другой модификацией ГГК-П (плотностной гамма-гамма каротаж с использованием «жестких» источников гамма-квантов) за счёт наличия прижимного зонда, что существенно снижает влияние на показания интенсивности рассеяния гамма-излучения ($J_{\gamma\gamma}$) бурового раствора, особенно в области каверн. Прижим прибора к стенке скважины позволяет наряду с низкоплотностными углями выделять и относительно высокоплотностные пласты известняков, которые больше по плотности аргиллито-песчаных отложений примерно на величину $0,25 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$. Последние слабо дифференцированы между собой по плотности (разница не превышает $0,10 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$) и поэтому на диаграммах ГГК практически не разделяются. Большим недостатком метода ГГК-С является вероятность прихвата прибора в кавернах за счёт конструктивных особенностей прижимного устройства с соответствующим обрывом прибора и последующими затратными экономическими, административными и технологическими действиями по извлечению, а часто и «захоронению», радиоактивного источника. Учитывая этот факт, перейдём к рассмотрению кривых ИННК и подчеркнём позитивные стороны этого метода при совокупном анализе всего комплекса каротажа в угольной сква-

жине. Начнём с факта возможностей регистрации методом ИННК всех имеющихся в разрезе угольных пластов и вероятности их однозначного истолкования посредством регистрации кривых в достаточно широком диапазоне временных задержек и представлению результатов в различных масштабах напряжений (имп/мин на 1 см). Из рассмотрения приведенных на рис. 6 кривых ИННК можно констатировать, что угольные пласты на этих диаграммах отмечаются положительными аномалиями при отношении $N_{уг-ля}/N_{арг}>60$ (рис. 4, б). Для однозначного выделения угольного пласта необходимо пользоваться комплексом геофизических методов. Это же требование применимо и к методу ГТК. Например, при сравнении кривых ГТК-С и кавернометрии (d_c), имеет место их

почти строгая идентичность, что наталкивает на мысль о регистрации методом ГТК-С объёма бурового раствора в том или ином интервале, хотя в действительности кривая ГТК-С отображает дифференциацию пород по плотности, исключая действие бурового раствора за счёт прижима зондовой установки к стенке скважины. Учитывая вышеприведенное нормативное требование об установлении угольного пласта не менее тремя каротажными кривыми различных методов, замена ГТК-С методом ИННК может вполне иметь место, при том что второй альтернативой ГТК-С является метод АК в режиме записи кривой интервального времени (ΔT). К третьему методу, однозначно разделяющему низкоомные антрациты и высокоомные известняки, относятся модификации КС.

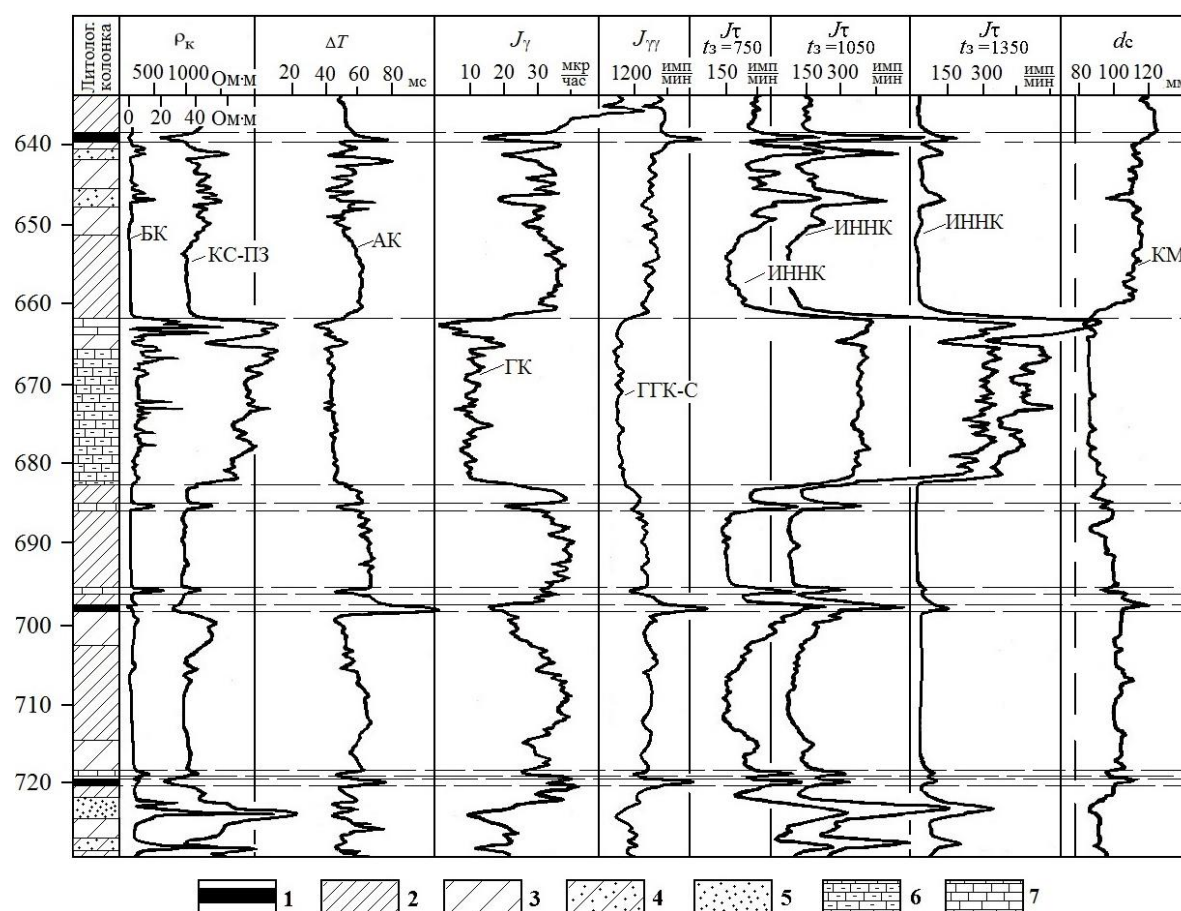


Рис. 6. Сопоставление каротажных кривых поискового комплекса и диаграмм ИННК. Восточный Донбасс. Участок Калиновский-Восточный: 1 – уголь, 2 – аргиллит, 3 – алевролит, 4 – алевролит крупнозернистый (песчаный), 5 – песчаник, 6 – известняк глинистый (мергель), 7 – известняк

Pic. 6. Matching of well logging curves of the seeking complex and RINK diagrams. Eastern Donbass. Kalinovsky-Eastern site: 1 – coal, 2 – argillite, 3 – aleurolite, 4 – aleurolite coarse-grained (sandy), 5 – sandstone, 6 – limestone clayey (marl), 7 – limestone

Заключение

Обзор литературных источников показывает, что интерес к исследованиям по разработке и применению импульсных генераторов нейтронов в геологической отрасли, теоретическому обоснованию возникающих физико-геологических, геохимических и др. явлений весьма высок [1–6, 8, 13–19]. По данным А.П. Поляченко и Л.Б. Поляченко [1] этот этап является вторым всплеском

по отношению к бурному периоду становления и развития ИННК в плане теоретических и методических его основ, который пришёлся на 60–70-е гг. минувшего столетия с последующим широким практическим применением в нефтегазовой отрасли и в значительно меньшей мере газовой, урановой, рудной и угольной геологии.

Россия располагает большими ресурсами и разведанными запасами углей. В перспективе промышлен-

ное освоение этих запасов, особенно в сложных горно-геологических условиях и на больших глубинах, потребует выполнения геологоразведочных работ. На нефтегазовых месторождениях скважины также часто пересекают угленосные толщи и по углям оценивается степень эпигенетического преобразования всей толщи пород. Изучение и ввод в эксплуатацию углегазовых и газугольных месторождений также требует новых методических решений и технологических подходов [20]. Поэтому появление новых задач, которые необходимо решать в процессе разведки угольных месторождений, в первую очередь связанных с безопасностью проведения горных работ и прогнозом опасных явлений: газоносности, выбросоопасности, устойчивости пород кровли и почвы угольных пластов, вызывает необходимость пересмотра существующего устаревшего комплекса геофизических исследований скважин (ГИС) на угольных месторождениях. Включение ИННК в стандартный комплекс исследования скважин на угольных месторождениях позволит существенно повысить результативность геологоразведочных работ на угольных и газугольных месторождениях. В настоящей статье это подтверждается опытно-экспериментальными исследованиями углеразведочных скважин методом ИННК в Восточном Донбассе. Таким образом, можно заключить:

1. Современная элементная база и прогрессивное развитие компьютерных технологий дают мощный толчок новому витку развития методов ИНК в геологоразведочных и эксплуатационных скважинах. Об этом свидетельствует широкий спектр научных публикаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляченко А.Л., Поляченко Л.Б. Развитие теоретико-интерпретационного обеспечения импульсного нейтронного каротажа // *Геофизика*. – 2014. – № 3. – С. 32–40.
2. Велижанин В.А. Информационный потенциал обработки данных импульсного нейтронного каротажа // *Каротажник*. – 2017. – № 278. – С. 101–111.
3. Выделение продуктивных интервалов в засоленных коллекторах Чаиндинского месторождения по результатам исследований комплексом LITHO SCANNER / С.Г. Крекнин, К.В. Пушкинов, Р.Р. Сафин, Е.А. Карпекин, А.Ю. Филимонов, Г.С. Сардаров // *Каротажник*. – 2017. – № 282. – С. 30–41.
4. Estimation of the presence of coal using at the Soma Basin / Karavul Can, Karaman Hamza, Demi A. Serhat, Demirkol Askin // *Asia Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress 2015: APCCHE 2015, incorporating Chemeca 2015*. – Melbourne: Engineers Australia, 2015. – P. 1029–1041.
5. Statistical analysis of pulsed-neutron well logs in monitoring injected carbon dioxide / A. Nicholas, N.W. Azzolina, M.E. Bosshart, J.A. Burton-Kelly, W. Hamling, D. Peck // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. – 2018. – V. 75. – P. 125–133.
6. A method for evaluating gas saturation with pulsed neutron logging in cased holes / Juntao Liu, Shuai Li, Feng Zhang, Bo Su, Haijun Yang, Yongzong Xu, Bin Miao, Hu Li // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2018. – V. 59. – P. 354–362.
7. Физические основы импульсных нейтронных методов исследования скважин / Ю.С. Шимелевич, С.А. Кантор, А.С. Школьников и др. – М.: Изд-во «Недра», 1976. – 160 с.
8. Бортасевич В.С., Емельянов А.В., Черменский В.Г. Каротаж без химических источников нейтронов – шаг сделан // *Каротажник*. – 2014. – № 242. – С. 103–126.
9. Гольдин И.М., Зенков Ю.А., Шведов В.И. Опыт применения ИННК в угольной скважине. // *Ядерно-геофизические методы*. – Новосибирск: Изд-во «Наука», 1972. – С. 291–294.
10. Поляченко А.Л., Попов В.В., Клименко Н.В. Применение импульсного нейтронного каротажа на угольных месторождениях // *Разведочная геофизика*. – М.: Изд-во «Недра», 1984. – Вып. 98. – С. 117–126.
11. Кучурин Е.С. Способ определения зольности и теплотворной способности ископаемых углей. URL: www.findpatent.ru/patent/207/2075099.html (дата обращения 15.01.2020).
12. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований в скважинах / под ред. Н.Н. Сохранова – М.: Изд-во «Недра», 1985. – 216 с.
13. Аппаратурно-методические комплексы для исследования рудных, угольных и гидрогеологических скважин / В.Т. Перельгин, К.А. Машкин, О.Е. Рыскаль, А.Г. Коротченко, Р.Г. Гайнетдинов, В.М. Романов, В.Л. Глухов, П.А. Сафонов, А.Ф. Камалтдинов, А.Н. Огнев, И.Х. Шабиев // *Каротажник*. – 2015. – № 255. – С. 99–127.
14. A method for determining density based on gamma ray and fast neutron detection using a Cs2LiYCl6 detector in neutron-gamma density logging / Zhang Feng, Zhang Robin, P. Gardne, Huizhong Yan, Guoli Wu, Lili Tian, Qian Chen, Yongzhou Ti // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2018. – V. 142. – P. 77–84.
15. Development of a new deuterium–deuterium (D–D) neutron generator for prompt gamma-ray neutron activation analysis / K. Bergaoui, N. Reguigui, C.K. Gary, C. Brown, J.T. Cremer, J.H. Vainionpää, M.A. Piestrup // *Applied Radiation and Isotopes* 2014. – V. 94. – P. 319–327.
16. A comparative study on the neutron-gamma density and gamma-gamma density logging / Zhang Feng, Zhang Chao Yuan, Xinguang Wang, Xiaoyang Zhang // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – V. 176. – P. 792–799.
17. Gan Th., Balmain B., Sigbatullin A. Formation evaluation logoff results comparing new generation mining-style logging tools to conventional oil and gas logging tools for application in coalbed methane (CBM) field development // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2016. – V. 34. – P. 1237–1250.
2. Развитие угольного каротажа исторически шло вслед за ГИС в нефтегазовой отрасли. Это предопределяет быструю адаптацию теоретических и аппаратно-технологических разработок, а также программного обеспечения для внедрения в угольную геологию, в том числе по методам ИНК.
3. Исследования, выполненные авторами методом ИННК в Восточном Донбассе, позволили на экспериментальном материале уточнить оптимальные условия регистрации каротажных диаграмм ИННК и доказали высокую информативность метода в реализации поставленных геологической службой задач по разделению пород на литологические разности с выделением угольных пластов и определением их качественных и количественных показателей.
4. Проведенными экспериментами продемонстрирована возможность определения по данным ИННК марочного состава углей и их зольности, имеются предпосылки оценки тектонической нарушенности и устойчивости вмещающих пород в кровле и почве угольных пластов.
5. На основе сопоставления кривых ИННК с диаграммами электрического, радиоактивного, акустического каротажа и кавернометрии установлено, что метод ИННК органично вписывается в поисковый и детализационный комплексы каротажа на угольных месторождениях и может в конкретных геолого-геофизических и производственно-экономических условиях заменять методы ГГК в случаях невозможности работ с радиоактивными источниками.

18. Neutron beam profilometer on the base of double-sided silicon strip detectors / N.I. Zamyatin, V.M. Bystritsky, Y.N. Kopach, F.A. Aliyev, D.N. Grozdanov, N.A. Fedorov, C. Hramko, I.N. Ruskov, V.R. Skoy, V.M. Slepnev, D. Wang, E.V. Zubarev // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2018. – V. 898. – P. 46–52.
19. Hatherly P. Overview on the application of geophysics in coal mining // International Journal of Coal Geology. – 2013. – V. 114. – P. 74–84.
20. Попов В.В. Комплексы геофизических исследований в углеразведочных скважинах // Каротажник. – 2003. – № 105. – С. 80–89.
21. Гречухин В.В. Изучение угленосных формаций геофизическими методами. – М.: Изд-во «Недра», 1980. – 320 с.

Поступила 24.01.2020 г.

Информация об авторах

Фоменко Н.Е., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоэкологии и прикладной геохимии Института наук о Земле Южного федерального университета.

Попов В.В., доктор технических наук, профессор кафедры нефтегазовых техники и технологии Факультета геологии, горного и нефтегазового дела Южно-Российского политехнического университета.

Коваленко А.С., кандидат технических наук, старший научный сотрудник акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский геологоразведочный институт угольных месторождений».

DOI 550.832.54

STUDY OF COAL EXPLORATION WELLS USING THE PULSED-NEUTRON-NEUTRON LOGGING

Nikolay E. Fomenko¹,
fnegeophyskohle@yandex.ru

Viktor V. Popov²,
viktor_popov_34@mail.ru

Andrey S. Kovalenko³,
a_kovalenko_77@mail.ru

¹ Southern Federal University,
40, Sorge strret, Rostov-on-Don, 344090, Russia.

² South Russian Polytechnic University,
132, Prosveshchenia street, Novocherkassk, 346428, Russia.

³ All-Russian Scientific Research Geological Exploration Institution of Coal Deposits,
200/1, housing 3, Stachki avenue, Rostov-on-Don, 344090, Russia.

Relevance of the research is defined by the necessity in optimization of coal exploration well geophysical researches by means of pulsed-neutron-neutron logging. Formulation of the problem is conditioned by modern tendencies of coal industry development and new instrumental and technical elaborations at exploration and borehole geophysics.

The aim of the research is to show the opportunities and effectiveness of pulsed-neutron-neutron logging at coal exploration wells on materials of experienced-experimental works in Eastern Donbass.

Object: logs of pulsed-neutron-neutron logging registered in coal exploration wells of Eastern Donbass.

Methods: analysis of pulsed-neutron-neutron logging curves for the effectiveness of using the method in a standard complex for solving problems posed by the geological service for identifying: 1) targets, i. e. coal seams with the definition of their position in the section; 2) rocks containing coal seams.

Outcomes of the research. The application of pulsed-neutron-neutron logging for the study of geological sections of the coal wells was justified. The authors have studied qualitative and quantitative characteristics of thermal neutrons lifetime in rocks of the coal-bearing strata. The paper demonstrates the opportunities of the method by estimation of mark composition of coal and their ash content. The authors carried out the well logging curves matching registered at differ temporary delays and with different velocity of logging zond lifting on subject to choosing optimal conditions of geophysical work by this method. It was established that all the lithological differences including thin coal layer are unambiguously distinguished by the pulsed-neutron-neutron logging method. There authors analyzed the pulsed-neutron-neutron logging resolution on the background of well logging curves of geophysical well survey complex including the methods of electrical, radioactive, acoustical well logging and caliper. The accent was made on positive sides and drawbacks of gamma-gamma well logging with soft source. The authors suggested replace GKG-S research by pulsed-neutron-neutron logging logging in the presence of organizational and technical difficulties.

Key words:

Pulsed-neutron-neutron logging, coal exploration well, thermal neutron lifetime, rational logging complex, argillite, aleurolite, sandstone and limestone layers, Eastern Donbass.

REFERENCES

1. Polyachenko A.L., Polyachenko L.B. Development of the theoretic-interpretational provision of pulsed-neutron logging. *Geophysics*, 2014, no. 3, pp. 32–40. In Rus.
2. Velizhanin V.A. Informational potential of the pulsed-neutron logging data processing. *Karotazhnik*, 2017, no. 278, pp. 101–111. In Rus.
3. Kreknin S.G., Pushnikov K.V., Safin R.R., Karpekin E.A., Filimonov A.Yu., Sardarov G.S. Allocation of the productivity intervals in the saline collector of Chayandinsk deposit by outcome research of LITHO SCANNER complex. *Karotazhnik*, 2017, no. 282, pp. 30–41. In Rus.
4. Can K., Hamza K., A Serhat D., Askin D. Estimation of the presence of coal using at the Soma Basin. *Asia Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress 2015: APCCHE 2015, incorporating Chemeca 2015*. Melbourne: Engineers Australia, 2015. pp. 1029–1041.
5. Nicholas A., Azzolina N.W., Bosshart M.E., Burton-Kelly J.A., Hamling W., Peck D. Statistical analysis of pulsed-neutron well logs in monitoring injected carbon dioxide. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2018, vol. 75, pp. 125–133.
6. Liu J., Li S., Zhang F., Su B., Yang H., Xu Y., Miao B., Li H. A method for evaluating gas saturation with pulsed neutron logging in cased holes. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, vol. 59, pp. 354–362.
7. Shimelevich Yu.S., Kantor S.A., Shkolnikov A.S. *Fizicheskie osnovy impulsnykh neytronnykh metodov issledovaniya skvazhin* [Physical basis of the pulsed-neutron methods well research]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 160 p.
8. Bortasevich V.S., Emelyanov A.V., Chermenskiy V.G. Logging without chemical source of neutrons – step is done. *Karotazhnik*, 2017, no. 242, pp. 103–126. In Rus.
9. Goldin I.M., Zenkov Yu.A., Shvedov V.I. Opyt primeneniya INNK v ugolnoy skvazhine [Experience of pulsed-neutron-neutron logging applying in coal well]. *Yaderno-geofizicheskie metody* [Nuclear geophysical techniques]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1972. pp. 291–294.
10. Polyachenko A.L., Popov V.V., Klimenko N.V. Primenenie impulsnogo neytronnogo karotazha na ugolnykh mestorozhdeniyakh [Applying pulsed-neutron-neutron logging at coal deposits]. *Razvedochnaya geofizika* [Exploration geophysics]. Moscow, Nedra Publ., 1984. Iss., 98, pp. 117–126.
11. Kuchurin E.S. *Sposob opredeleniya zolnosti i teplotvornoy sposobnosti iskopaemykh ugley* [A way of determining ash and calorific value of fossil coals]. Available at: www.findpatent.ru/patent/207/2075099.html (accessed 15 January 2020).

12. *Tekhnicheskaya instruktsiya po provedeniyu geofizicheskikh issledovaniy v skvazhinakh* [Instrumental-methodical complexes for ore, coal and hydrogeological wells]. Ed. by N.N. Sokhranov. Moscow, Nedra Publ., 1985. 116 p.
13. Perelygin V.T., Mashkin K.A., Ryskal O.E., Korotchenko A.G., Gaynetdinov R.G., Romanov V.M., Glukhov V.L., Safonov P.A., Kamaltdinov A.F., Ognev A.N., Shabiev I.Kh. Instrumental-methodical complexes for ore, coal and hydrogeological wells research. *Karotazhnik*, 2017, no. 255, pp. 99–127. In Rus.
14. Feng Z., Robin Z., Gardne P., Yan H., Wu G., Tian L., Chen Q., Ti Y. A method for determining density based on gamma ray and fast neutron detection using a Cs2LiYCl6 detector in neutron-gamma density logging. *Applied Radiation and Isotopes*, 2018, vol. 142, pp. 77–84.
15. Bergaoui K., Reguigui N., Gary C.K., Brown C., Cremer J.T., Vainionpaa J.H., Piestrup M.A. Development of a new deuterium–deuterium (D–D) neutron generator for prompt gamma-ray neutron activation analysis. *Applied Radiation and Isotopes*, 2014, vol. 94, pp. 319–327.
16. Feng Z., Chao Yuan Z., Wang X., Zhang X. A comparative study on the neutron-gamma density and gamma-gamma density logging. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 176, pp. 792–799.
17. Gan T., Balmain B., Sigbatullin A. Formation evaluation logoff results comparing new generation mining-style logging tools to conventional oil and gas logging tools for application in coalbed methane (CBM) field development. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 34, pp. 1237–1250.
18. Zamyatin N., Bystritsky V., Kopach Y., Aliyev F., Grozdanov D., Fedorov N., Hramko C., Ruskov I., Skoy V., Slepnev V., Wang D., Zubarev E. Neutron beam profilometer on the base of double-sided silicon strip detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, vol. 898, pp. 46–52.
19. Hatherly P. Overview on the application of geophysics in coal mining. *International Journal of Coal Geology*, 2013, vol. 114, pp. 74–84.
20. Popov V.V. Geophysical research complexes in coal exploration wells. *Karotazhnik*, 2017, no. 105, pp. 80–89. In Rus.
21. Grechukhin V.V. *Izucheniye ugleonosnykh formatsy geofizicheskimi metodami* [Coal formations study by geophysical methods]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 320 p.

Received: 24 January 2020.

Information about the authors

Nikolay E. Fomenko, Dr. Sc., professor, Southern Federal University.

Viktor V. Popov, Dr. Sc., professor, South Russian Polytechnic University.

Andrey S. Kovalenko, Cand. Sc., senior researcher, All-Russian Scientific Research Geological Exploration Institution of Coal Deposits.

УДК 004.942.001.57

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ ПРОНИЦАЕМОСТИ НА РАЗРАБОТКУ МОДЕЛЬНОГО БЛОКА ТЕРРИГЕННОГО НЕФТЕНАСЫЩЕННОГО КОЛЛЕКТОРА В ХОДЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЁТОВ

Ермеков Роман Игоревич¹,
trommka@mail.ru

Коровин Михаил Олегович¹,
korovinmo@hw.tpu.ru

Меркулов Виталий Павлович¹,
merkulovvp@hw.tpu.ru

Чернова Оксана Сергеевна¹,
chernovaos@hw.tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования состоит в существовании проблемы недостаточности информации при сборе и анализе геологических и физико-химических свойств разрабатываемых залежей. В частности, такая проблема касается анизотропии проницаемости, значение которой можно узнать первоначально лишь на основе керновых данных, получаемых в результате бурения с керноотборниками. Зачастую данная операция является затратной для недропользователя. Однако при построении геолого-гидродинамической модели величина анизотропии проницаемости является одной из ключевых характеристик пласта и значительно влияет на его поведение.

В цели данной работы входило провести подбор оптимального значения вертикальной анизотропии на основе доступных данных и предложить варианты по улучшению существующей системы разработки в ходе гидродинамических расчётов анизотропной модели.

Объектом исследования является одно из нефтяных месторождений Томской области, состоящее из терригенных отложений. Особенностью месторождения является его месторасположение в системе сложных локальных поднятий разного порядка. Основной продуктивный коллектор представлен юрскими отложениями, сформировавшимися в регрессивно-трансгрессивную серию осадконакопления и имеющими сложное распределение фильтрационно-емкостных свойств.

Методы: изучение особенностей течения флюидов в пористой среде, измерение и подбор значения вертикальной анизотропии проницаемости, а также проведение гидродинамических вычислений с учётом предлагаемых улучшений системы разработки.

В результате исследования удалось узнать, что повышение значения вертикальной анизотропии не всегда приводит к увеличению выработки запасов в зоне работы скважины. Так, при значении вертикальной анизотропии 0,5 величина накопленной добычи нефти составила 1,968 млн м³, в то время как для значения 0,86 эта величина равнялась 1,913. Такой результат связан с геологическими особенностями продуктивного пласта и подчеркивает важность влияния анизотропии проницаемости. Кроме этого, выполнены гидродинамические расчёты на изотропной и анизотропной моделях, позволившие выделить оптимальные варианты оптимизации текущей системы разработки. Коэффициент извлечения нефти для изотропной модели составил 23,4 %, а для анизотропной модели – 22,8 % относительно размера извлекаемых геологических запасов. Таким образом, полученная разница в 0,6 % вновь показывает важность явления анизотропии проницаемости и необходимость как можно большего количества данных.

Ключевые слова:

Анизотропия проницаемости, масштаб анизотропии, вертикальная анизотропия, гидродинамическое моделирование, система разработки.

Введение

В классическом представлении под фильтрационной анизотропией проницаемости понимается соотношение горизонтальной (k_h) и вертикальной проницаемостей (k_v) [1, 2]. Хорошо известно и установлено, что, как правило, горизонтальная составляющая параметра преобладает по отношению к вертикальной [3]. Более того, множество данных отражают, что изменение фильтрационных свойств имеет разный характер проявления также в самой горизонтальной плоскости [4].

Такие результаты привели к необходимости пересмотра основного закона движения жидкостей и газов в пористой среде – уравнения Дарси. Дарси открыл

свой закон в 1856 г., проводя серию экспериментов по изучению движения потока жидкости при фильтрации через поровое пространство цилиндрического песчаного образца породы. В качестве силы, действующей на флюид, он использовал гравитацию (в современных лабораториях используются насосы). В результате своего эксперимента Дарси получил экспериментальную зависимость, выражающую связь скорости фильтрации флюида от градиента давления. Его дифференциальная форма для одномерного случая может быть представлена в следующем виде:

$$V = \left(\frac{Q}{A} \right) = - \frac{k}{\mu} \frac{\Delta P}{L} = - \frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right),$$

где V – скорость фильтрации (м/с); k – коэффициент (проницаемость), являющийся динамической характеристикой пористой среды и независимый от свойств флюида (мД); ΔP – перепад давления, созданный на концах образца (Па); μ – абсолютная вязкость флюида (мПа·с).

Минус в формуле показывает, что направление движения флюида является противоположным положительному направлению градиента давления. Основные допущения, принимаемые для вывода данного выражения:

- а) ламинарный или «ползущий» режим течения флюида;
- б) порода на сто процентов насыщена одним флюидом;
- в) флюид химически не взаимодействует с породой;
- г) порода является гомогенной и изотропной.

Позже было установлено, что такую же зависимость можно получить путём осреднения уравнения Навье–Стокса, являющегося одним из важнейших уравнений гидродинамики.

Из курса математического анализа известно, что градиент есть вектор, который своим направлением указывает направление наибольшего роста физической величины. Градиент может быть записан как векторная операция в следующем виде:

$$\bar{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} \bar{i} + \frac{\partial}{\partial y} \bar{j} + \frac{\partial}{\partial z} \bar{k},$$

где $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ – единичные векторы. Данная операция может быть проведена над скалярной величиной, такой как давление, p :

$$\bar{\nabla} p = \frac{\partial p}{\partial x} \bar{i} + \frac{\partial p}{\partial y} \bar{j} + \frac{\partial p}{\partial z} \bar{k}.$$

Из формулы можно видеть, что величина $\bar{\nabla} p$ есть в действительности вектор градиентов давления в направлении x, y, z (рис. 1). Тогда её можно переписать в следующей форме:

$$\bar{\nabla} p = \begin{pmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} \bar{i} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \bar{j} \\ \frac{\partial p}{\partial z} \bar{k} \end{pmatrix}.$$

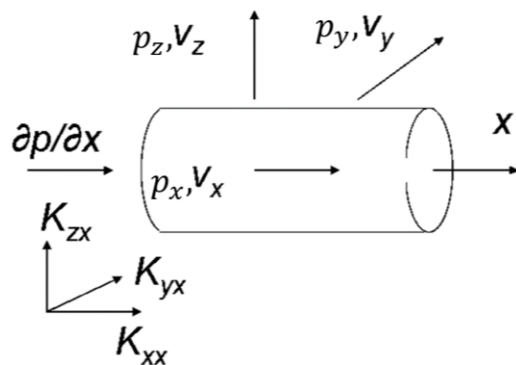


Рис. 1. Направления векторов скоростей фильтрации и градиентов давления [3. С. 7]

Fig. 1. Directions of filtration rates vectors and pressure gradients [3. P. 7]

Из описанного выше следует, что проницаемость есть также величина векторная и её изменение происходит в трёх взаимно ортогональных направлениях. Это даёт возможность описывать данную величину как тензор, имеющий третий порядок, и рассматривать его как прямоугольный параллелепипед:

$$\bar{k} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix},$$

где k_{xx}, k_{yy}, k_{zz} – элементы главной диагонали матрицы, являющиеся ортогональными к плоскостям параллелепипеда и называемые нормальными составляющими вектора проницаемости; оставшиеся шесть значений есть касательные компоненты векторов проницаемости и называются симметричными элементами (рис. 2).

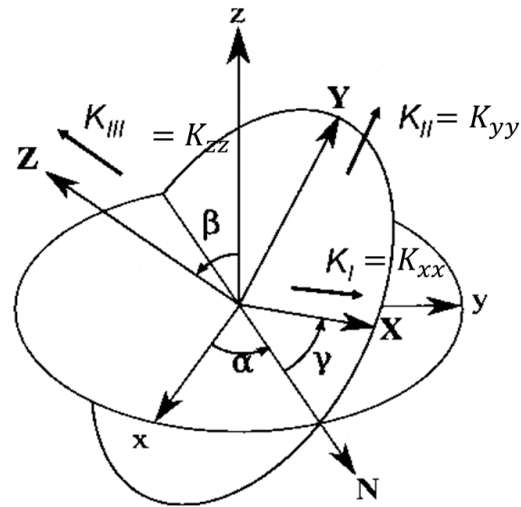


Рис. 2. Направления нормальных и тангенциальных составляющих тензора проницаемости [3. С. 10]

Fig. 2. Directions of normal and tangential components of permeability tensor [3. P. 10]

Таким образом, произведение проницаемости и градиента давления в законе Дарси могут быть записаны следующим образом:

$$\bar{k} \cdot \bar{\nabla} p = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} \bar{i} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \bar{j} \\ \frac{\partial p}{\partial z} \bar{k} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} k_{xx} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) + k_{xy} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) + k_{xz} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \\ k_{yx} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) + k_{yy} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) + k_{yz} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \\ k_{zx} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) + k_{zy} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) + k_{zz} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) \end{bmatrix}.$$

Однако описание явления анизотропии с помощью такого математического представления проницаемости пока является крайне затруднительным. Это связано с тем, что явление анизотропии проницаемости

недостаточно изучено с позиции теории, причин возникновения, механизма проявления связи геологических и петрофизических особенностей и практической значимости для разработки месторождений [5].

Гидродинамические расчёты на анизотропной модели

Создание анизотропной модели требовало применения данных по величинам анизотропии [6–10]. Первым шагом в этой части стало изучение влияния вертикальной анизотропии (a_z) на поведение модели пласта. На основании доступных данных было выбрано три возможных варианта значений вертикальной анизотропии, при этом значения латеральной анизотропии были найдены на основе трёх источников данных и использованы в дальнейшем в расчётах [11–13]. Результаты расчётов вариации вертикальной анизотропии отражены в табл. 1.

Здесь k – исходный куб проницаемости модели (permeability cub of model); Q_o – накопленная добыча нефти (cumulative oil production); Q_w – накопленная добыча воды (cumulative water production); Q_{inj} – накопленная закачка воды (cumulative water injection); КИН – коэффициент извлечения нефти (oil recovery factor). Интересным фактом здесь является то, что накопленные добыча нефти и закачка воды при

$a_z = 0,5k$ имеют большие величины, чем при $a_z = 0,86k$. Предполагается, что такой результат связан с особенностями строения резервуара, такими как присутствие высокопроницаемых пропластков в нижней части пласта. Как результат, это привело к тому, что фронт заводнения двигался выше при $a_z = 0,5k$, чем при $a_z = 0,86k$, и, таким образом, вытеснял большее количество нефти (рис. 3–5). Анализ результатов показывает, что значение $a_z = 0,5k$ является более надёжной оценкой [14–16]. Величина латеральной анизотропии в двух направлениях была взята равной $0,67k$ и $1,48k$ соответственно.

Таблица 1. Результаты вариации вертикальной анизотропии

Table 1. Results of vertical anisotropy variation

a_z	Сценарий, млн м ³ /Scenario, MM m ³		
	Пессимистичный Pessimistic	Наиболее вероятный Most likely	Оптимистичный Optimistic
	$a_z = 0,1k$	$a_z = 0,5k$	$a_z = 0,86k$
Q_o	1,849	1,968	1,913
Q_w	1,350	1,281	0,893
Q_{inj}	3,082	3,142	2,655
КИН ORF	0,139	0,148	0,144

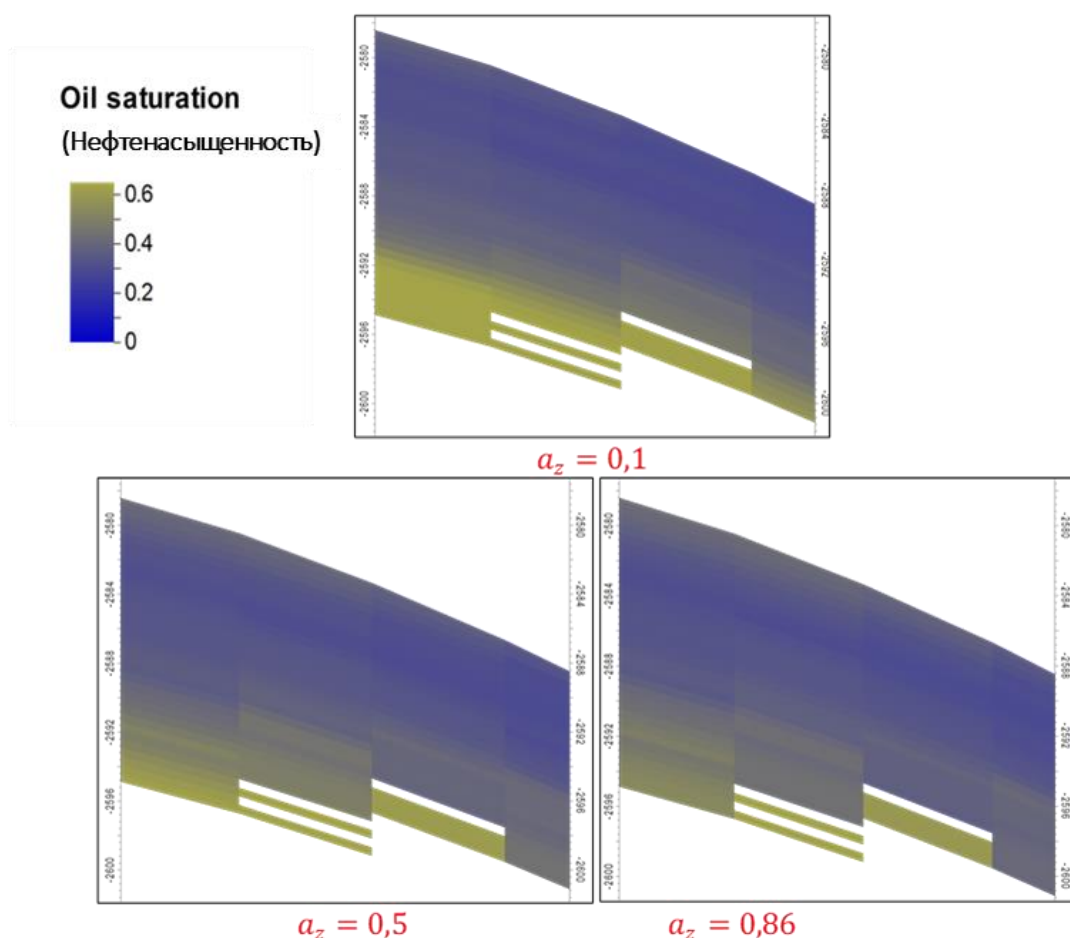


Рис. 3. Сравнение фронтов продвижения воды между тремя вариантами значений вертикальной анизотропии

Fig. 3. Comparison of waterflood fronts between three variants of vertical anisotropy values

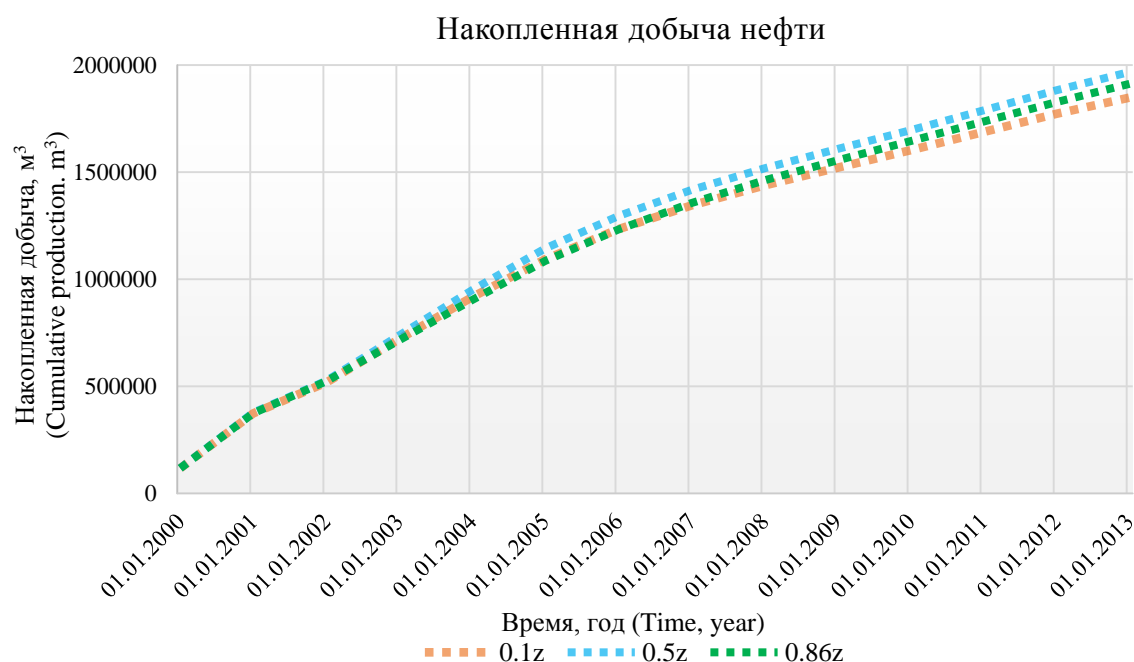


Рис. 4. Сравнение накопленной добычи нефти между тремя вариантами значений вертикальной анизотропии
Fig. 4. Comparison of cumulative oil production between three variants of vertical anisotropy values

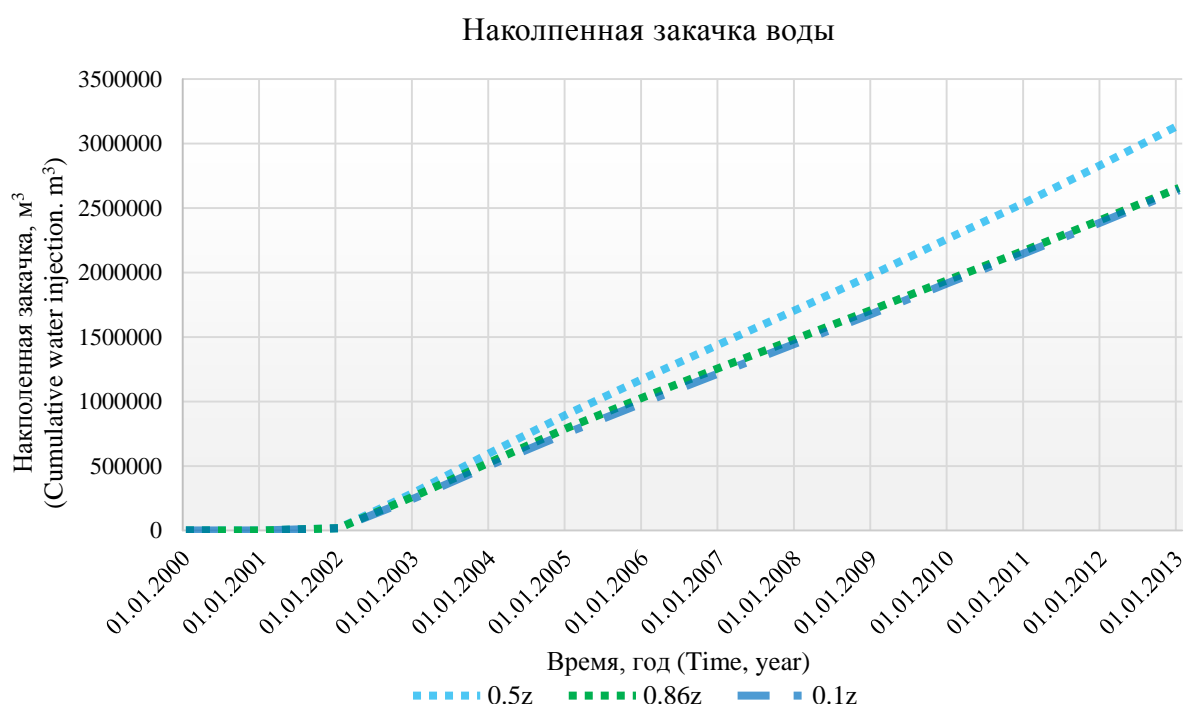


Рис. 5. Сравнение накопленной закачки воды между тремя вариантами значений вертикальной анизотропии
Fig. 5. Comparison of cumulative water injection between three variants of vertical anisotropy values

Оптимизация системы разработки

Для улучшения системы разработки рассматривалась модернизация существующих скважин. Для проведения этих улучшений было выделено три группы скважин (рис. 6).

Группа А (Group A) состоит из скважин D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13. Данная группа

скважин соответствует региону проведения трассерных исследований. Из результатов трассерных исследований известно, что эта зона имеет высокопроницаемые фильтрационные каналы северо-восточного простирания, поэтому характеризуется повышенной обводненностью продукции [17]. Однако она также имеет высокие значения величин остаточных запасов. Так

как бурение дополнительных добывающих скважин в обводненной зоне в данном случае неразумно, наиболее привлекательным вариантом улучшений стало бурение боковых стволов (БС, sidetrack) [18]. Хорошо известно, что бурение боковых или горизонтальных стволов вдоль фильтрационных каналов увеличивает область дренирования скважины без резкого обводнения [19]. В данном случае направление стволов совпадало с направлением улучшенных фильтрационных свойств, т. е. под азимутальным углом 45° . Как показали расчёты, наиболее эффективным и выгодным стало бурение БС в скважинах D5, D8 и D12. Длина каждого ствола составила 300 м.

Группа Б (Group B) состоит из скважин D14, D18 и D19. Выделенная территория характеризуется низкими значениями проницаемости. Несмотря на это, она содержит высокие значения остаточных запасов и является наиболее выгодным местом для оптимизации системы разработки с помощью бурения БС. По результатам расчётов, оптимальная длина стволов составила 300 м.

Группа В (group C) состоит из скважин D1 и D15. Здесь бурение БС было эффективно лишь в скважине D1. Скважина D15 имела достаточно высокие значения обводненности в своей области дренирования, что уменьшало эффективность бурения БС.

Кроме описанных мер, были изучены опции по проведению гидроразрыва пласта (ГРП, fracturing). Из проделанной работы удалось выявить, что наиболее эффективным образом операция ГРП была проведена в новых пробуренных добывающих скважинах D23 и D27. Проведение операции в других добывающих скважинах приводило либо к резкой обводненности продукции, либо требовало дальнейшего анализа. Таким образом, все выше предложенные меры были включены в гидродинамические расчёты изотропной и анизотропной моделей на срок продолжительностью 5 лет. Результаты расчётов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение изотропной и анизотропной модели с улучшенной системой разработки

Table 2. Comparison of isotropy and anisotropy models with improved development system

Параметры разработки Development parameters	Результаты расчётов в млн м ³ The calculation results in MM m ³	
	Изотропная модель Isotropy model	Анизотропная модель Anisotropy model
Q_o	3,119	3,069
Q_w	6,204	5,237
Q_{inj}	9,716	8,745
КИН	0,234	0,228

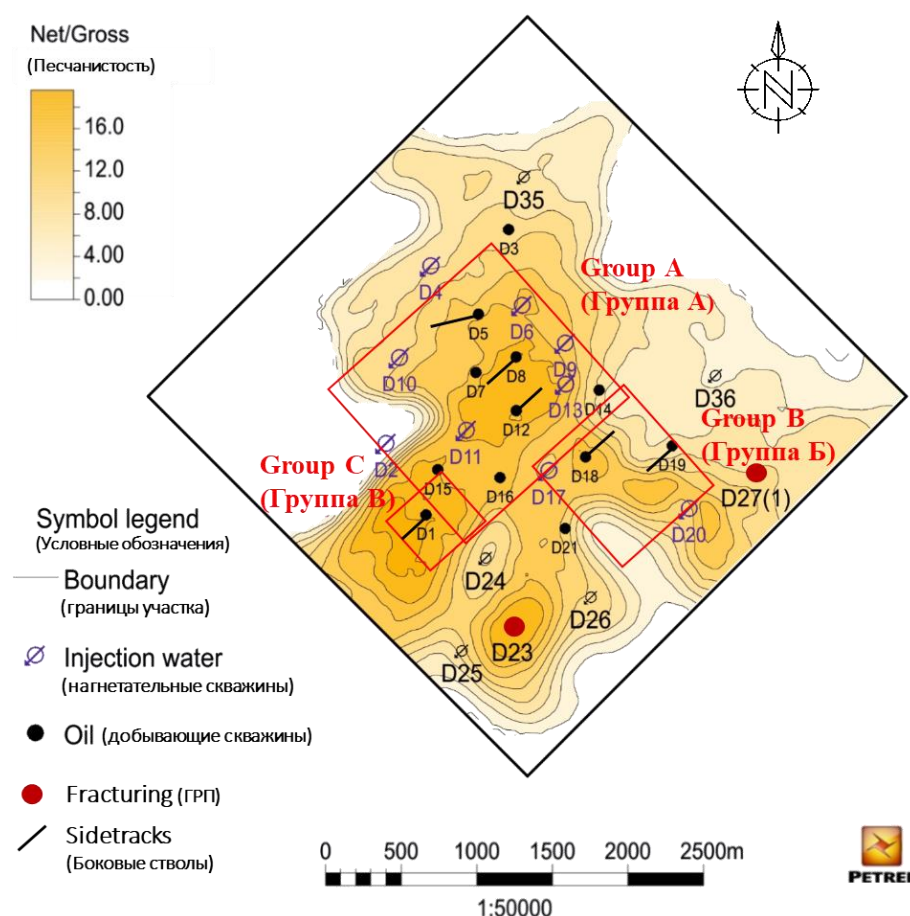


Рис. 6. Карта с указанием выделенных групп скважин – скважин с БС и ГРП

Fig. 6. Map showing selected well groups – sidetracks and wells with fracturing

Из результатов видно, что параметры изотропной модели оказались выше параметров анизотропной модели. Такой результат указывает на то, что упущение из модельного построения анизотропии может приводить к завышению параметров разработки. Это, в свою очередь, может вызвать превышение ожидаемой добычи и привести к неправильным экономическим расчётам. Данное обстоятельство вновь подтверждает значительное влияние анизотропии проницаемости на разработку.

Заключение

Как показали результаты вычислений, повышение значения вертикальной анизотропии не всегда приводит к увеличению выработки запасов фронтом завод-

нения в зоне дренирования добывающих скважин. Поэтому весьма важным являются как источники данных по значению вертикальной анизотропии, так и проведение анализа по подбору её оптимальной величины для гидродинамических расчётов. Анализ вариантов улучшения разработки позволил выделить три группы скважин по критерию наиболее выгодного и рационального геолого-технологического мероприятия (ГТМ): бурение боковых стволов и проведение операции ГРП. Все выбранные ГТМ оказали существенное влияние на продуктивность скважин и внесли большой вклад в конечный профиль чистого дисконтированного денежного потока (NPV – Net Present Value).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Permeability anisotropy and its relations with porous medium structure / J.B. Clavaud, A. Maineu, M. Zamora, P. Rasolofosaon, C. Schlitter // Journal of geophysical research. – 2008. – V. 113. – P. 1–10.
2. Панков М.В. Анализ разработки Крапивинского нефтяного месторождения // Центр профессиональной переподготовки специалистов нефтегазового дела: отчёт. – Томск: Изд-во НИ ТПУ, 2004. – 425 с.
3. Меркулов В.П., Краснощекова Л.А. Исследование пространственной литолого-петрофизической неоднородности продуктивных коллекторов месторождений нефти и газа // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 6. – С. 296–303.
4. Tyvand P.A., Storhaug A.R.F. Two-dimensional flow in a porous medium with general anisotropy // Journal of Department of Mathematical Sciences and Technology (Norwegian University of Life Sciences). – 2004. – V. 2. – P. 1–12.
5. Литолого-петрофизическая анизотропия песчано-глинистых коллекторов нефтяных месторождений / В.П. Меркулов, Д.В. Александров, Л.А. Краснощекова, Ю.Я. Ненахов // Научно-технический вестник ЮКОС. – 2004. – № 10. – С. 33–36.
6. Abedi R., Clarke P.L. Modeling of rock inhomogeneity and anisotropy by explicit and implicit representation of microcracks // 52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. – Seattle, Washington, USA, 17–20 June, 2018. – P. 1–11.
7. Zhang Z., Du J. Reservoir characterization using perforation shots: Anisotropy and attenuation // SEG International Exposition and Annual Meeting. – Anaheim, California, USA, 14–19 October, 2018. – P. 2982–2986.
8. Kolbikov S., Kuznetsova Y., Smirnov A. Method of anisotropy modeling and its application to hydrodynamic simulation // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, Russia, 15–17 October, 2018. – P. 1–9.
9. Makhenko R.Y., Tarokh A. Anisotropy in the undrained pore pressure response of rock // 52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. – Seattle, Washington, USA, 17–20 June, 2018. – P. 40–51.
10. Liu S., King M.J. Improved calculation of effective permeability for pore network models using the diffuse source methodology // 81st EAGE Conference and Exhibition. – London, England, UK, 3–6 June, 2019. – P. 1–19.
11. Коровин М.О. Специализированный анализ керна для изучения анизотропии коллекторов нефти и газа // Геофизика. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 87–92.
12. Gray D.H., Fatt I., Bergamini G. The effect of stress on permeability of sandstone cores // Society of petroleum engineers' journal. – 1963. – V. 3. – P. 95–99.
13. Wannell M.J., Colley N.M., Halford F.R. The use of a new technique to determine permeability anisotropy // SPE journal's. – 1993. – V. 9. – P. 489–495.
14. Cosan A. Measuring permeability anisotropy: the latest approach // Oilfield Review, 1994, vol. 6, no. 4, pp. 24–35.
15. Carpenter C. Better permeability estimation from wireline formation testing // Journal of Petroleum Technology. – February, 2018. – V. 70. – P. 66–68.
16. Pan Y., Medhat M.K., Wayne N. Fieldwide determination of directional permeabilities using transient well testing // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – May, 2019. – V. 22. – P. 1–11.
17. Жабров И.П., Стуканов Ю.А. Зависимость нефтеотдачи от направления вытеснения нефти водой из анизотропных по проницаемости пластах // Геология нефти и газа. – 1992. – № 8. – С. 34–36.
18. Al-Hadrami H.K., Teufel L.W. Influence of permeability anisotropy and reservoir heterogeneity on optimization of infill drilling in naturally fractured tight-gas Mesaverde sandstone reservoirs, San Juan Basin // SPE Low Permeability Reservoirs Symposium. – Denver, U.S.A., March 12–15, 2000. – P. 1–12.
19. Батлер Р.М. Горизонтальные скважины для добычи нефти, газа и битумов. – М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. – 536 с.

Поступила 14.11.2019 г.

Информация об авторах

Ермеков Р.И., аспирант направления геологии, разведки и разработки полезных ископаемых Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Коровин М.О., кандидат геолого-минералогических наук, инженер лаборатории геологии месторождений нефти и газа Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Меркулов В.П., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий эксперт Центра подготовки и переподготовки специалистов нефтегазового дела Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Чернова О.С., доктор геолого-минералогических наук, ведущий эксперт Центра подготовки и переподготовки специалистов нефтегазового дела Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 004.942.001.57

INVESTIGATION OF PERMEABILITY ANISOTROPY IMPACT ON DEVELOPMENT OF BLOCK OILFIELD OF TERREGINOUS OIL-SATURATED RESERVOIR DURING SIMULATION

Roman I. Ermekov¹,
trommka@mail.ru

Mikhail O. Korovin¹,
korovinmo@hw.tpu.ru

Vitaliy P. Merkulov¹,
merkulovvp@hw.tpu.ru

Oksana S. Chernova¹,
chernovaos@hw.tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research lies in the problem of insufficient information in collection and analysis of geological and physical-chemical properties of the developed reservoirs. In particular, such problem concerns permeability anisotropy, the value of which can initially be realized only on the basis of cores obtained by core drilling. This is often costly and not beneficial for the subsurface user. However, during construction of geological model, the permeability anisotropy value is one of the key characteristics and significantly effects its behavior.

The aim of this work is to determine the optimal value of vertical anisotropy based on the available data and to propose options to improve the existing development system during simulation of anisotropy model.

The study object is one of oil fields of the Tomsk region, consisting of terrigenous sediments. A feature of the field is its location in the system of complex local lifted blocks of various orders. The main productive reservoir is represented by Jurassic sediments, created in a regressive-transgressive sedimentation series and have a complex distribution of poroperm properties.

Methods: studying the flow characteristics of fluids in the porous medium, measuring and selecting the value of vertical permeability anisotropy, as well as carrying out simulations considering the proposed improvements of the development system.

As a result, it has been learned that increasing the value of vertical anisotropy does not always lead to a growth in production of reserves in the well area. Thus, at a vertical anisotropy value of 0.5, the value of cumulative oil production was 1,968 MM m³, while for 0.86 this value was 1,913 MM m³. This result is related to the geological features of reservoir and emphasizes the importance of the permeability anisotropy effect. Simulations on isotropy and anisotropy models were performed, which allowed highlighting optimal options of optimization of the current development system. The oil recovery factor for the isotropy model was 23,4 % and for the anisotropy model 22,8 % relative to the size of the geological reserves to be extracted. Thus, the resulting 0,6 % difference again shows the importance of the permeability anisotropy phenomenon and the need for as much data as possible.

Key words:

Permeability anisotropy, anisotropy scale, vertical anisotropy, hydrodynamic simulation, development strategy.

REFERENCES

1. Clavaud J.B., Mainault A., Zamora M. Rasolofosaon P., Schlitter C. Permeability anisotropy and its relations with porous medium structure. *Journal of geophysical research*, 2008, vol. 113, pp. 1–10.
2. Pankov M.V. *Analiz razrabotki Krapivinskogo neftyanogo mestorozhdeniya. Tsent professionalnoy perepodgotovki spetsialistov neftegazovogo dela: otchet* [Analysis of development of the Krapivinsky oilfield. Petroleum Learning Centre: report]. Tomsk, TPU Publ. house, 2004. 425 p.
3. Merkulov V.P., Krasnoshchekova L.A. Study of spatial lithogenic-petrophysical heterogeneity of productive collectors of oil and gas fields. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2002, vol. 305, no. 6, pp. 296–303. In Rus.
4. Tyvand P.A., Storhaug A.R.F. Two-dimensional flow in a porous medium with general anisotropy. *Journal of Department of Mathematical Sciences and Technology*, 2004, vol. 2, pp. 1–12.
5. Merkulov V.P., Aleksandrov D.V., Krasnoshchekova L.A., Nenaikhov Ya.Yu. Lithologic and petrophysical anisotropy of sandstone reservoirs of petroleum fields. *Scientific and technical bulletin of YuKOS*, 2004, no. 10, pp. 33–36. In Rus.
6. Abedi R., Clarke P.L. Modeling of rock inhomogeneity and anisotropy by explicit and implicit representation of microcracks. *52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. Seattle, Washington, USA, 17–20 June, 2018. pp. 1–11.
7. Zhang Z., Du J. Reservoir characterization using perforation shots: anisotropy and attenuation. *SEG International Exposition and Annual Meeting*. Anaheim, California, USA, 14–19 October, 2018. pp. 2982–2986.
8. Kolbikov S., Kuznetsova Y., Smirnov A. Method of Anisotropy Modeling and its Application to Hydrodynamic Simulation. *SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, Russia, 15–17 October, 2018. pp. 1–9.
9. Makhenko R.Y., Tarokh A. Anisotropy in the undrained pore pressure response of rock. *52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. Seattle, Washington, USA, 17–20 June, 2018. pp. 40–51.
10. Liu S., King M.J. Improved calculation of effective permeability for pore network models using the diffuse source methodology. *81st EAGE Conference and Exhibition*. London, England, UK, 3–6 June, 2019. pp. 1–19.
11. Korovin M.O. Specialized analysis of core for study of anisotropy of oil and gas collectors. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geophysics*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 87–92. In Rus.
12. Gray D.H., Fatt I., Bergamini G. The effect of stress on permeability of sandstone cores. *Society of petroleum engineers' journal*, 1963, vol. 3, pp. 95–99.
13. Wannell M.J., Colley N.M., Halford F.R. The use of a new technique to determine permeability anisotropy. *SPE journal's*, 1993, vol. 9, pp. 489–495.
14. Cosan A. Measuring permeability anisotropy: the latest approach. *Oilfield Review*, 1994, vol. 6, no. 4, pp. 24–35.
15. Carpenter C. Better permeability estimation from wireline formation testing. *Journal of Petroleum Technology*, February, 2018, vol. 70, pp. 66–68.

16. Pan Y., Medhat M.K., Wayne N. Fieldwide determination of directional permeabilities using transient well testing. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, May, 2019, vol. 22, pp. 1–11.
17. Zhabrev I.P., Stukanogov Yu.A. Dependence of recovery from direction of oil ousting by warier in beds anisotropic by permeability. *Oil and gas Geology*, 1992, no. 8, pp. 34–36. In Rus.
18. Al-Hadrami H.K., Teufel L.W. Influence of permeability anisotropy and reservoir heterogeneity on optimization of infill drilling in naturally fractured tight-gas Mesaverde sandstone reservoirs, San Juan Basin. *SPE Low Permeability Reservoirs Symposium. Denver, U.S.A., March 12–15, 2000*. pp. 1–12.
19. Batler R.M. *Gorizontalnye skvazhiny dlya dobychi nefi, gaza i bitumov* [Horizontal wells for Oil, gas and bitumen recovery]. Izhevsk, ICI Publ., 2010. 536 p.

Received: 14 November 2019.

Information about the authors

Roman I. Ermekov, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Mikhail O. Korovin, Cand. Sc., engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vitaliy P. Merkulov, Cand. Sc., expert, National Research Tomsk Polytechnic University.

Oksana S. Chernova, Dr. Sc., expert, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.8.053, 550.842, 550.84.09

АНАЛИЗ ФЛУКТУАЦИИ ФОНОВЫХ СОДЕРЖАНИЙ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ЛИТОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКАХ В УСЛОВИЯХ ТРОПИЧЕСКОГО ВЫВЕТРИВАНИЯ. ЮЖНАЯ АМЕРИКА, ГАЙАНА

Соболев Игорь Станиславович^{1,2},
geolsob@yandex.ru

Соболева Надежда Петровна³,
sobnadi@yandex.ru

¹ ООО «Гео Сервис»,
Россия, 634028, г. Томск, ул. Учебная, 5, офис 21.

² Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДО РАН,
Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы определяется увеличением информативности литохимических исследований по вторичным ореолам рассеяния в условиях влажного тропического выветривания. Повсеместное развитие мощных коровых покровов создает ограничение для изучения пород фундамента в естественных обнажениях. В такой обстановке возрастает роль геохимических методов при решении задач геологического картирования фундамента и поисков локализованных в нем месторождений полезных ископаемых. Характерной чертой тропического гипергенного перераспределения химических элементов является его высокая интенсивность, общее доминирование выноса с одновременным концентрированием ряда компонентов при латеризации и кирасировании. Сочетание этих процессов приводит к высокой изменчивости геохимического фона и возникновению вторичных аномалий ряда металлов, не имеющих генетической связи с рудными объектами. По этой причине весьма актуальным является ландшафтно-геохимическое картирование. Оно призвано осуществить районирование территорий по особенностям распределения компонентов в элементарных ландшафтах и систематизировать основные причины вариативности геохимического фона. В числовых значениях содержаний химических элементов содержится информация о всей совокупности природных процессов, повлиявших на компонентный состав изучаемого материала. Как следствие, исследование литохимических данных инструментами статистического анализа позволяет получить математическую модель в варианте типологической ландшафтно-геохимической карты.

Цель: осуществить дифференциацию территории по особенностям изменчивости геохимического фона.

Методы: многофакторный, корреляционный и кластер-анализ многокомпонентных данных литохимических поисков по вторичным ореолам рассеяния.

Результаты. Получена классификационная модель геохимического фона, отражающая связь уровней накопления химических элементов с геоморфологическим и геологическим строением; с учетом амплитудных и пространственных характеристик изменчивости геохимического поля во вторичных ореолах рассеяния определены элементы-спутники золоторудной минерализации.

Ключевые слова:

Коры выветривания, химические элементы, классификационная модель, геология, геоморфология, влажные тропики.

Введение

Изучение геохимии процессов корообразования в условиях влажного тропического климата не теряет своей актуальности на протяжении многих лет и привлекает внимание многочисленных исследователей [1–9]. Яркой особенностью тропического гипергенеза является формирование латеритных кор выветривания, с которыми связаны крупнообъемные месторождения алюминия, железа, никеля, золота. Обширное площадное распространение и большая мощность коровых покровов существенно затрудняют изучение геологического строения фундамента и выявление в нем рудных месторождений. В связи с этим идентификация типов корообразующих пород и собственно поисков рудной минерализации по вторичным ореолам рассеяния являются весьма актуальными задачами для геохимических исследований [3, 10]. Сложность использования методов геохимии в условиях ландшафтной зоны влажных тропических лесов обусловлена глубоко-

кими изменениями минерального состава коренного субстрата, сопровождающимися интенсивным перераспределением компонентов в вертикальном и латеральном профиле кор выветривания. Например, при анализе типа выветрелых пород на основе геохимических индексов некоторые химические элементы, считающиеся малоподвижными, нецелесообразно привлекать для оценки баланса массы и объема [3]. Ландшафты влажных тропиков характеризуются резким сдвигом в сторону выноса суммарного эффекта миграции и аккумуляции химических элементов вследствие доминирования кислого выщелачивания [1, 2, 5]. Гипергенное концентрирование слабых мигрантов главным образом происходит в форме остаточного накопления. Для подвижных компонентов характерно сорбционно-инфильтрационное обогащение в условиях активного водообмена, а также их осаждение на динамических, щелочных и восстановительных барьерах в пределах пониженных форм рельефа. Как следствие, местные

автономные геохимические ландшафты существенно различаются по уровням фоновых содержания широкого спектра химических элементов. Распространенное явление – это вторичные аномалии металлов, возникновение которых в большей мере обусловлено геоморфологическими причинами, а не типом пород и наличием рудных объектов.

Реализация литохимических поисков по вторичным ореолам рассеяния без изучения фоновой флуктуаций чревата высоким риском появления прогнозно-поисковых ошибок. Поэтому методическими документами рекомендуется осуществлять анализ ландшафтно-геохимических условий исследуемой территории. Полнота и достоверность ландшафтно-геохимического районирования во многом зависит от наличия и качества геологической, геоморфологической, ландшафтной информации, удовлетворяющей масштабу проводимых исследований. Для слабо изученных территорий подобные данные нередко просто отсутствуют. Однако в числовые характеристики распределения химических элементов заложен интегральный эффект влияния природных условий. На этом основывается широкое использование математической статистики для анализа геохимических данных, в том числе при решении задач выделения аномального сигнала в условиях высокоамплитудной изменчивости геохимического фона. Эффективными статистическими инструментами пространственной геологической дифференциации объектов исследований на основе многокомпонентной информации являются способы классификации методами кластер-анализа [11]. Даже при сравнительно небольшом количестве вовлеченных в изучение химических элементов удастся получить адекватные классификационные модели геологического строения территорий зоны влажных тропиков [12].

Геолого-геоморфологическое строение

Площадь исследований расположена на Гвианском плоскогорье северо-западной части горной системы Сьера-Пакарайма в Республике Гайана, в зоне произрастания влажных тропических лесов.

С позиций региональной геологии участок литохимической съемки находится в северной части докембрийского Гвианского щита, являющегося северным сегментом Амазонского кратона в Южной Америке [13–17]. Основные черты геологического строения территории определяются ее положением в пределах палеопротерозойских пород зеленокаменного пояса супергруппы Барама-Мазаруни (рис. 1). Вулканогенно-осадочная толща, метаморфизованная в условиях зеленосланцевой и амфиболитовой фаций, интродуцирована телами гранитоидного комплекса Транс-Амазонской орогенной серии, а также посторогенными дайковыми поясами, связанными с меловым Атлантическим рифтогенезом. Площадь исследований принадлежит к области тектонического влияния регионального палеопротерозойского сдвига Макапа-Курибронг, с которым сопряжены протяженные линейные зоны дробления и пластической деформации. В пределах этого

структурного коридора выявлено большинство известных на сегодняшний день проявлений и месторождений золота [16, 18]. Находящееся наиболее близко к участку геохимического картирования орогенное месторождение золота Аврора приурочено к одному из ответвлений Транс-Амазонской зоны смятия.

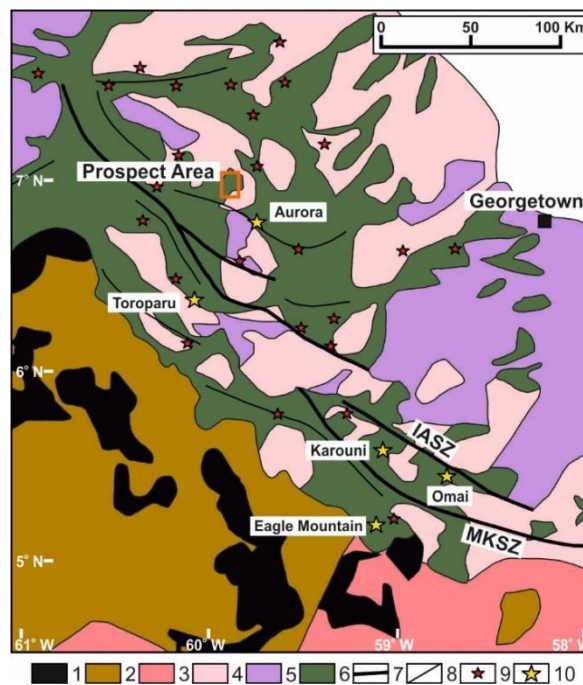


Рис. 1. Геология северной части Гвианского щита с главными золоторудными месторождениями (по М. Tedeschi и др., 2018 [17]): 1) мафитовые интрузивные породы (1,79 млрд лет и моложе), долериты комплекса Аванаверо и другие протерозойские мафитовые и щелочные интрузии; 2) древний платформенный чехол (~1,87 млрд лет) Рорайма Супергруппы; 3) древние фельзитические вулканиты и гранитоиды пояса Орокайма (1,99–1,95 млрд лет); 4) Транс-Амазонская провинция (2,26–2,09 млрд лет.), «Молодые граниты» (2,11–2,08 млрд лет); 5) диапировые тоналит-трондjemит-гранодиоритовые интрузии, гнейсы (2,18–2,13 млрд лет); 6) зеленокаменные пояса (2,2–2,1 млрд лет); 7) зона смещения регионального масштаба (IASZ=зона смещения Исано-Аппапари, MKSZ=зона смещения Макапа-Курибронг); 8) региональные зоны складчатости; 9) проявления Au; 10) месторождения Au

Fig. 1. Geology of northern part of Guiana Shield highlighting major gold deposits (adapted from M. Tedeschi et al., 2018 [17]): 1) mafic intrusive rocks (1,79 Ga and younger), Avanavero dolerite and other proterozoic mafic and alkaline intrusive rocks; 2) older platform cover (~1,87 Ga) Roraima Super-group; 3) older felsic volcanic and granitoid belt «Orocaima» (1,99–1,95 Ga); 4) Trans-Amazonian Province (2,26–2,09 Ga), «Younger Granites» (2,11–2,08 Ga); 5) diapiric tonalite-trondhjemitic-granodiorite intrusions; gneisses (2,18–2,13 Ga); 6) greenstone belts (2,2–2,1 Ga); 7) regional scale shear zone (IASZ=Issano-Appapari shear zone, MKSZ=Makapa-Kuribong shear zone); 8) region foliation; 9) Au occurrences; 10) Au deposits

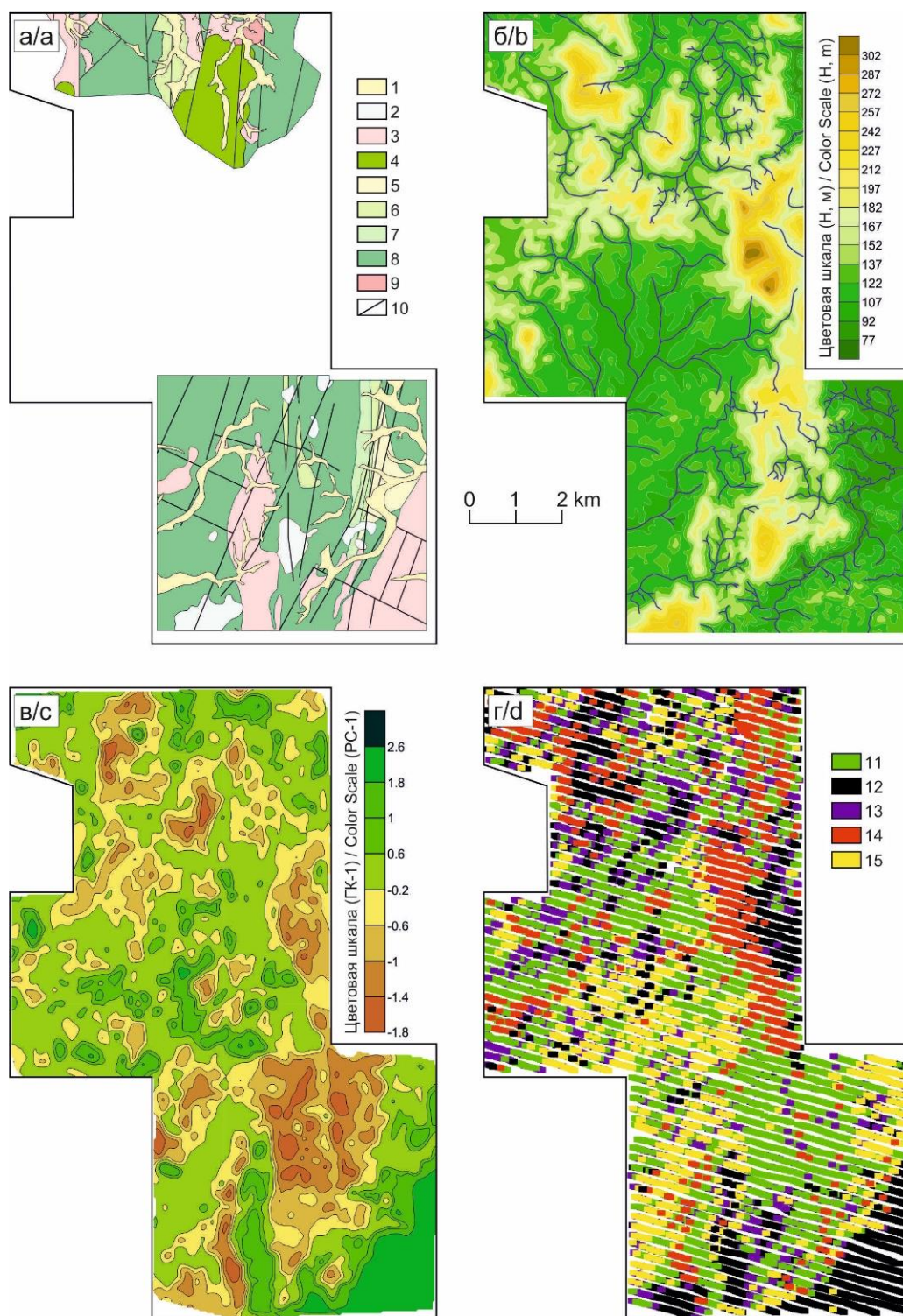


Рис. 2. Геологическое (а) и геоморфологическое (б) строение (по данным ООО «Золотой Запас» и ООО «Зарубежгеология»), влияние ГК-1 (в), схема геохимических квазиоднородных участков (г): 1) аллювиальные четвертичные отложения (Q); 2) латеритные коры выветривания; 3, 4) Транс-Амазонский комплекс (PR₂): гранит биотитовый, амфиболитовый (3), габбро (4); 5–8) формация Куюни (PR₁): нерасчлененные вулканогенно-осадочные породы (5), метавулканы основного состава (6), амфиболовые гнейсы (7), амфиболиты (8); 9) гранитоиды комплекса Иматика (AR); 10) разломы; 11–15) корреляционные ассоциации кластеров: А (11), Б-а (12), Б-б (13), В (14), Г (15)

Fig. 2. Geology (a) and geomorphology (b) (according LLC «Zolotoy Zapas» and LLC «Zarubezhgeologiya»), PC-1 score (c), schematic map of geochemical quasihomogeneous plots (d): 1) alluvial sediments (Q); 2) lateritic crust; 3, 4) Trans-Amazonian Complex (PR₂): biotite and amphibolite granites (3), gabbro (4); 5–8) Cuyuni Formation (PR₁): poorly-defined volcanogenic sedimentary rocks (5), mafic metavolcanics (6), amphibolite gneisses (7), amphibolites (8); 9) gneissoid granite Imatoca Complex (AR); 10) faults; 11–15) clusters correlation associations: A (11), B-a (12), B-b (13), C (14), D (15)

Локальная геология площади геохимических исследований изучена неравномерно. По результатам работ ОАО «ВНИИЗарубежгеология» (2012 г.) и ООО «Золотой Запас» (2016–2017 гг.) составлены геологические карты масштаба 1:10000, охватывающие южную и частично северную части территории (рис. 2, а). К породам архейского фундамента, входящим в комплекс Иматака, отнесены единичные выходы гранитогнейсов на севере участка [19, 20]. Основную часть разреза составляют древние амфиболиты, метавулканы и метаосадочные породы палеопротерозойской формации Куяни группы Мазаруни. Прорывающие их среднепротерозойские интрузивы Транс-Амазонского комплекса разнообразны по размерам и своему составу. Сравнительно крупные массивы и тела сложной морфологии представлены ультрамафитами, габброидами и гранитами. В разрезе выделяются протяженные зоны, насыщенные телами малых интрузий. Они представлены среднепротерозойскими дайками и штоками средне-кислого состава, а также мезозойскими дайками долеритов и диоритов. На площади исследований закартированы разрывные нарушения нескольких направлений, главными из которых являются системы СВ и СЗ простирания. В границах участка выявлены три золотоносные зоны. По основным особенностям локального контроля оруденения они имеют много общего с орогенными золоторудными объектами зеленокаменного пояса супергруппы Барама-Мазаруни [19, 20]. К ним относят: пространственную ассоциацию с зонами смятия; связь с интрузивными породами основного-среднего состава; приуроченность золота к кварц-карбонат-пиритовым жилам и штокверкам, таблитчатым, брекчиевым и линзообразным телам и тонким прожилкам; соответствие формациям пропилит-филлитовых изменений [16, 18]. Существенным отличием рудных и околорудных гидротермалитов площади исследований от орогенных месторождений золота зоны сдвига Макапа-Курибронг является невысокое содержание в жилах карбонатов и очень слабое развитие процессов карбонатизации [19, 20].

Мощность кор выветривания зависит от рельефа и в среднем достигает на участке исследований 20–30 м. Обобщенный разрез выветрелого горизонта (сверху вниз) характеризуется следующим образом [19, 20]:

- латериты и «латеритоподобные» бесструктурные глинистые коры выветривания кирпично-красного, буровато-коричневого цвета с дресвой железистых обломков (пизолитов) мощностью от 0,5 до 20 м;
- глинистые бесструктурные или со слабо проявленными фрагментами структуры, пятнисто окрашенные коры выветривания мощностью от 1,5 до 8 м;
- структурные глинистые и щебенисто-глинистые коры выветривания мощностью от 4,0 до 10 м;
- глинизированные коренные породы (зона сапролитов) мощностью до 5 м.

В геоморфологическом отношении территория представляет собой низкоросло-холмистую поверхность, прорезанную долинами рек Ирома, Даквари и

их более мелкими притоками (рис. 2, б). Геологическое и геоморфологическое строение имеет определенную связь. Гранитоидные массивы слагают выровненные и пониженные формы рельефа, примыкающие к мелким горам, сложенным преимущественно амфиболитами.

Литохимическое опробование

Литохимическое опробование проводилось силами ООО «Золотой Запас» по сети 40 на 200 м в 2016 (южный сектор) и 2017 (северный сектор) гг. Терригенный материал весом 0,2–0,3 кг отбирался из подпочвенного горизонта с глубины 0,2–0,6 м. Координатная привязка пунктов опробования осуществлялась навигационными приемниками GPSmap60C. В полевом лагере материал пробы просушивался и просеивался через сито с размером ячеек 1 мм. Концентрации широкого спектра химических элементов, включая золото, определялись методом ИСП-МС в лабораториях г. Джорджтаун, Гайана: Act Labs (2016 г.) и MS Analytical (2017 г.).

Обработка и интерпретация данных

Качество результатов испытаний проб двух участвовавших в исследованиях лабораторий существенно отличается. Поэтому предобработка велась отдельно для двух массивов литохимических данных, принадлежащих южному и северному секторам опробования. Из анализа исключалась информация по химическим элементам со значительной долей результатов измерений, находящихся ниже порога чувствительности лабораторного определения. Дальнейшая оценка параметрических и непараметрических характеристик распределения случайных величин показала, что наиболее адекватно ожидаемому положению отвечает геометрическое среднее значение. Для увязки результатов лабораторных испытаний разных лет проведено нормирование значений концентраций химических элементов с использованием их геометрических средних. После этой процедуры выборки были объединены. С целью предотвращения появления ложных корреляций, возникающих в замкнутых системах процентных величин, осуществлена CLR (Centred LogRatio) трансформация данных [21, 22].

Золото значимо не коррелирует ни с одним химическим элементом. По этой причине, а также из-за желания избежать его влияния на результаты статистического анализа многокомпонентной информации, оно было исключено из расчетов на стадии оценки особенностей флуктуации геохимического фона.

С целью сокращения количества изучаемых признаков выполнен многофакторный анализ методом главных компонент. В модель были включены главные компоненты с собственными значениями ≥ 1 в сумме описывающие 82,8 % общей дисперсии (таблица).

Первый главный компонент (*ГК-1*) представлен ассоциацией щелочных и щелочноземельных элементов с изоморфно входящим в состав бариевых и стронциевых минералов La, а также примкнувшими к ним W и Zn. В пространственном распределении фак-

торного влияния отмечается ярко проявленная тенденция (рис. 2, в). Она выражается в обособлении областей высоких значений в пределах пониженных форм рельефа, особенно по долинам рек и заболоченным участкам. Снижение числового параметра воздействия *ГК-1* происходит по мере роста высотных отметок отбора проб, достигая отрицательных значений в пределах местных водоразделов. Примыкание *W* и отчасти *Zn* к группе элементов *ГК-1* обусловлено тем, что крупные тела гранитоидов, участвующие в геологическом строении территории, расположены на низких гипсометрических уровнях.

Таблица. Вращаемые факторные нагрузки в пятифакторной модели геохимического поля (10293 пробы; красным выделены нагрузки $\geq 0,6$)

Table. Rotated factor loadings in five-factors models of geochemical spatial patterns (10293 samples; marked in red loadings are $\geq 0,6$)

Элементы Elements	ГК/PC-1	ГК/PC-2	ГК/PC-3	ГК/PC-4	ГК/PC-5
Ag	0,299	0,792	0,033	0,141	0,089
Al	0,465	0,621	0,447	0,036	-0,027
As	0,239	0,863	0,102	0,095	0,011
Ba	0,856	0,152	-0,232	0,007	-0,106
Bi	0,508	0,724	0,001	0,097	0,140
Ca	0,829	0,191	-0,007	0,147	0,286
Co	0,142	-0,832	0,126	0,036	-0,237
Cr	0,014	0,439	-0,151	0,786	0,110
Cu	-0,061	-0,054	0,851	0,102	0,016
Fe	-0,110	0,718	0,598	-0,023	0,039
Ga	0,342	0,699	0,493	-0,106	-0,022
La	0,875	0,040	0,117	-0,027	-0,058
Mg	0,848	0,089	0,016	0,211	0,173
Mn	0,212	-0,503	0,721	0,587	0,126
Mo	0,268	0,811	0,144	-0,045	0,015
Na	0,776	0,486	-0,052	0,149	0,223
Ni	0,368	-0,209	0,277	0,802	-0,069
Pb	0,588	0,598	0,059	0,014	-0,245
Sb	0,486	0,769	0,021	0,178	0,138
Sc	-0,098	0,177	0,900	0,011	0,050
Se	0,226	0,867	0,212	0,026	0,000
Sr	0,845	0,278	-0,026	0,000	0,036
Th	0,529	0,758	0,160	0,007	-0,148
Ti	0,266	0,094	0,103	0,018	0,897
Tl	0,778	0,498	-0,082	0,141	0,176
V	-0,341	0,509	0,620	-0,018	0,060
W	0,693	0,563	-0,009	0,193	0,199
Zn	0,601	0,082	0,610	0,072	0,075
Общая дисперсия Total variance, %	48,0	16,3	9,5	5,0	4,0

Примечание/Note: *ГК* – главный компонент/*PC* – principal component

Существенная роль геоморфологии в формировании химического состава кор тропического выветривания статистически выражается в значимой парной ранговой корреляции между высотными отметками (*H*, м) и влиянием факторов. Исключение составляет распределение *ГК-5*. Корреляция существует, несмотря на невысокую точность гипсометрического позиционирования с помощью GPS-приемников данного класса. Максимальное значение коэффициента ранговой корреляции $R = -0,42$ принадлежит паре *H*-(*ГК-1*).

В ассоциации с *ГК-2* находятся химические элементы-маркеры геохимических процессов, протекающих при формировании латеритов, сопровождающихся концентрированием Fe и Al [1, 2, 5]. Также положительной корреляцией с *ГК-2* связаны элементы-гидролизаты – Ga, Th, и сорбирующиеся на гидроокислах железа и алюминия аниогенные элементы – As, Mo, Se, Sb. Интенсивное выщелачивание Co на хорошо промываемых возвышенных участках обусловило его отрицательную корреляцию со вторым главным компонентом. Сопоставление поля распределения значений факторного влияния с геологическим и геоморфологическим строением территории позволило выделить следующие особенности. Наиболее контрастные ореолы положительных значений параметра соответствуют местным водораздельным поверхностям с хорошо развитой кирасой. Слабоконтрастные области положительного воздействия *ГК-2* в пространстве приурочены к телам гранитоидов Транс-Амазонского комплекса, занимающим пониженные формы рельефа. При этом, в сравнении с кирасами, вторичные ореолы Транс-Амазонских интрузивов обогащены Ag, Bi, Th и обеднены Fe.

По мнению С.Л. Шварцева и др. [5] процесс латеритного выветривания следует разделять на две части: латеризацию и кирасирование. При латеризации в результате выноса из горной породы подвижных компонентов происходит относительное концентрирование и абсолютный привнос Fe, Al, Ti и ряда других элементов на фоне общего уменьшения плотности продуктов выветривания. Кирасирование сопровождается инфильтрационным накоплением элементов-гидролизатов в пористых проницаемых породах с последующим увеличением их плотности и формированием отвердевшего горизонта. Низинный тип коры выветривания по гранитоидам и гранитогнейсам характеризуется преимущественно глинистым составом и отсутствием кирасы. Однако самый верхний горизонт обычно окрашен гидроксидами железа и алюминия в бурый цвет. К тому же в условиях интенсивного промывания возможно развитие непосредственно по полевым шпатам гиббсита вместо каолинита [5]. Анализ химического состава кор выветривания на золоторудном месторождении Омаи, расположенном в пределах зеленокаменного пояса Барама-Мазаруни, продемонстрировал, что сильно выветрелые породы все равно в какой-то мере сохраняют геохимический облик материнского субстрата [3]. По всей видимости, существующие отличия в компонентном составе ореолов положительных значений факторного воздействия *ГК-2* обусловлены не только особенностями геохимии процессов латеризации и кирасирования в пониженных и повышенных формах рельефа соответственно, но и типом материнских пород.

Ореолы положительного влияния фактора *ГК-3* слагают протяженные узкие зоны преимущественно СВ и СЗ направления. Они трассируют пояса даек основного и среднего состава, наиболее ярко проявленные в распределении Cu и V. В рельефе эти геохимические линейные неоднородности вытягиваются

по кирасированным вершинам и крутым склонам местных водоразделов.

Пространственная структура поля параметра влияния $ГК-4$, коррелирующего с распределением $Сг$ и $Нг$, дифференцирует территорию по геологическому строению. На разных гипсометрических уровнях ореолами положительных значений контролируются геологические блоки, отнесенные к формации Куюни, имеющей преимущественно мафический состав. Слабо- и среднеинтенсивные отрицательные ореолы маркируют места внедрения гранитоидных интрузивов. Контрастные негативные и резко очерченные линейные зоны ярко проявляют дайковые пояса.

С $ГК-5$ значимо корреляционно связан только один химический элемент – $Тг$. Положительными значениями факторного влияния очерчиваются пониженные формы рельефа в пределах распространения палеопротерозойской метаморфизованной толщи. Фрагментами в протяженных зонах внедрения малых интрузий также появляются ореолы положительных значений, но линейного морфотипа. Последние, предположительно, охотнее располагаются на участках развития мафитовых даек, характеризующихся высоким содержанием $ТгО_2$ [17].

По значениям влияния $ГК-1$ осуществлена косвенная классификация геоморфологических условий

литохимического опробования. Для этого использовался кластерный анализ методом K -средних. Количество кластеров подбиралось эмпирически путем последовательного перебора и в итоге составило пять ($CL - I, II...V$). Значимость различий между кластерами контролировалась непараметрическим однофакторным дисперсионным анализом и медианным тестом. Таким образом удалось провести геохимическую привязку пунктов опробования к диапазонам гипсометрического уровня (рис. 3). Выборки, сформированные согласно номерам CL , вновь кластеризовались по амплитудам коэффициента влияния $ГК-2, ГК-3...ГК-5$. Количество групп классификации соответствовало числу участвующих в расчете главных компонентов – четырем ($cl - 1, 2...4$). Задачей повторной кластеризации являлась дифференциация геохимического поля в зависимости от типа коренного субстрата. По итогам кластерного анализа кодировка проб приняла вид – $CL-cl: I - 1, 2, 3, 4...V - 1, 2, 3, 4$. На основе этой классификации удобно проводить статистическую оценку уровня геохимического фона и расчет минимальных аномальных значений концентраций химических элементов на участках с различными геоморфологическими и геологическими условиями.

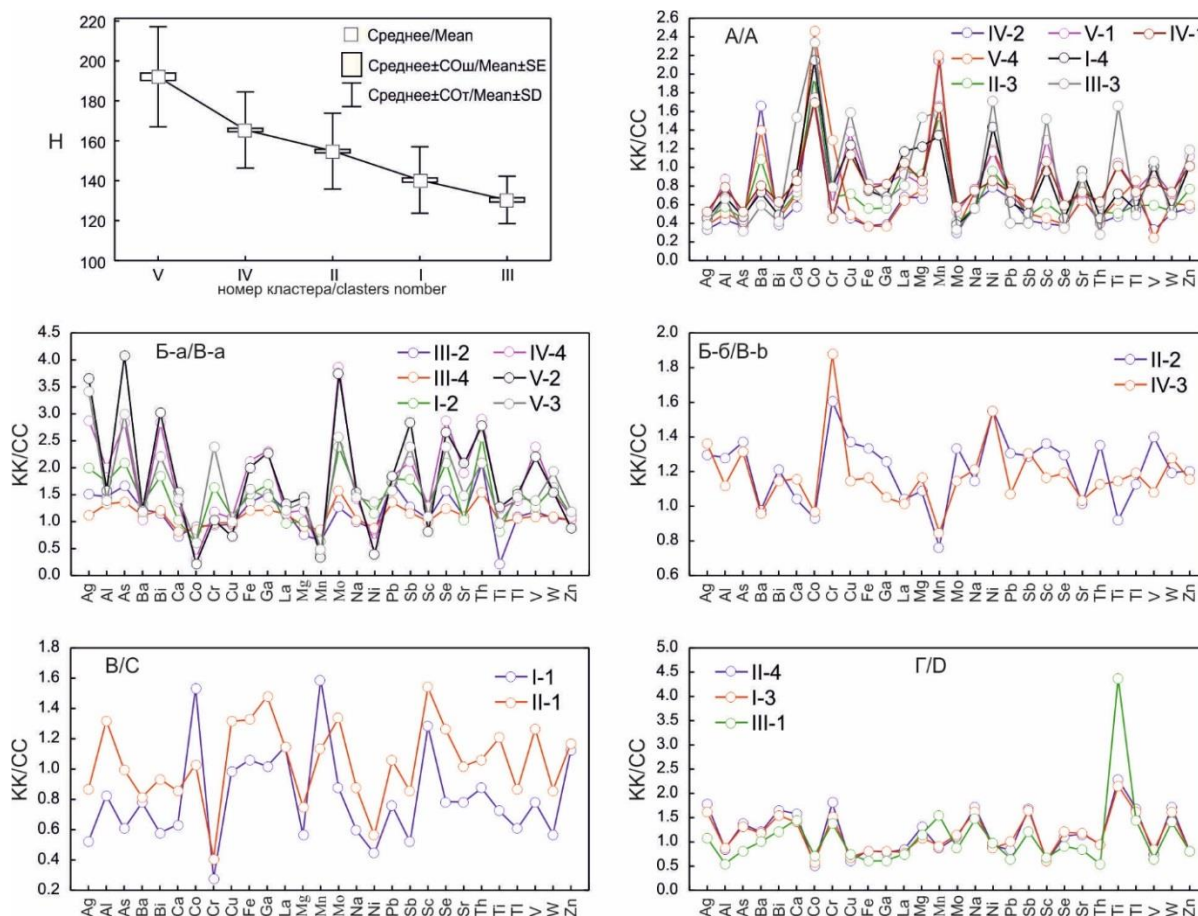


Рис. 3. Графики средних значений высотных отметок (H , м) кластеров факторного влияния $ГК-1$ и KK корреляционных ассоциаций кластеров

Fig. 3. Graphs of means elevations (H , m) of clusters $PC-1$ factor scores and coefficient concentrations (CC) of clusters correlation associations

С целью прогноза геологического строения территории проведена оценка геохимической специализации выделенных групп проб по значениям коэффициента концентрации (КК):

$$KK_i(CL - cl) = \bar{X}_i(CL - cl) / \bar{X}_i(CL),$$

где $KK_i(CL - cl)$ – коэффициент концентрации i -го элемента в выборке по признаку классификации $CL-cl$; $\bar{X}_i(CL)$ – среднее геометрическое содержание i -го элемента для выборки по признаку классификации CL ; $\bar{X}_i(CL - cl)$ – среднее геометрическое содержание i -го элемента для выборки по признаку классификации $CL-cl$.

Состав коренного субстрата, по которому происходит формирование кор выветривания, может быть схожим для разных форм рельефа. В свою очередь, это определяет возможность схожей геохимической специализации проб, отобранных на различных гипсометрических уровнях. К тому же важно подчеркнуть, что влияние геоморфологического фактора на миграцию и накопление компонентов ранее уже ослаблено при расчете коэффициентов концентраций на первом этапе классификации (CL). Чтобы выявить участки с близкими особенностями поведения химических элементов и сократить количество групп итоговой дифференциации территории по особенностям их фоновой флуктуации в пределах гетерогенных геологических блоков проанализирована ранговая корреляция Спирмена. В качестве входных данных использовались средние геометрические значения коэффициентов концентраций, рассчитанные для выборочных совокупностей по признаку $CL-cl$. Сильными положительными связями ($R \geq 0,7$) обособляются четыре генерализованные геохимические ассоциации, одна из которых осложнена относительно слабо коррелирующей с ней пары (рис. 4).

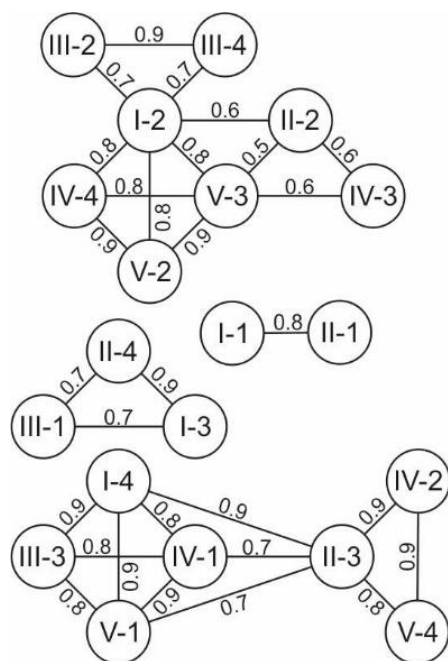


Рис. 4. Графы корреляционных ассоциаций кластеров
Fig. 4. Graphs of clusters correlation associations

По особенностям сигнатур графиков коэффициентов концентраций возможен прогноз типового состава пород фундамента. Группа A по спектру концентрирующихся компонентов близка к мафическим, а ассоциация $B-a$ – к средним и кислым породам (рис. 2, з, рис. 3). Резко обедненные Cr и Ni образцы (B) принадлежат зонам внедрения среднекислых даек в меланократовые геологические блоки. Группа $B-b$ смешанного состава представлена элементами-индикаторами нескольких типов пород, а в пространстве близка к контактам гранитоидных интрузий либо к линейным зонам, по всей видимости, также проявляющих дайковые комплексы. Образцы ассоциации Γ преимущественно локализируются в пониженных формах рельефа в границах вулканогенно-осадочных образований формации Куяни.

Обсуждение результатов

Анализ литохимических данных подтверждает давно установленный факт, что важное значение при формировании химического состава кор выветривания во влажных тропиках имеет геоморфология, определяющая характер водного режима и как следствие физико-химические параметры среды [1, 2, 4, 5]. В результате выщелачивания горных пород на большую глубину в процессы миграции включаются подвижные соединения с одновременным относительным обогащением инертными элементами, а также инфильтрационным «легированием» $Fe-Al$ конкреционного горизонта и кирас. В условиях активного водообмена повышенных форм рельефа из пород всех типов наиболее интенсивно выносятся щелочные и щелочноземельные элементы. Их вторичная аккумуляция происходит на глинистых минералах и гумусе в условиях заболоченных впадин, где главным образом формируется низинный каолиновый тип коры выветривания. Ярко выраженная геоморфологическая зависимость миграции и накопления этих компонентов при слабой связи с минеральным составом фундамента позволяет статистически адекватно осуществить геохимическую привязку образцов грунта к гипсометрическим уровням опробования.

Верхний горизонт вертикального профиля кор выветривания, из которого производился отбор образцов, подвержен существенному влиянию процессов латеризации и кирасирования, приводящих к выравниванию химического состава почв и кор выветривания. Глубокая трансформация минерального состава материнских пород фундамента при тропическом корообразовании существенно затрудняет выявление связей вторичных ореолов рассеяния с коренным субстратом и идентификацию искоемых объектов в геохимическом поле [16, 18]. Тем не менее в результате геохимической дифференциации образцов по геоморфологическому признаку удастся осуществить статистическую классификацию проб, несущую информацию о геологическом строении территории. Сравнение сигнатур графиков кларков концентраций различных типов пород, рассчитанных относительно кларков содержания химических элементов в Земной

коре, и коэффициентов концентрации ассоциаций кластеров позволяет как минимум различать лейко- и меланократовые геологические блоки. К тому же, в конкретном случае возможен прогноз положения дайковых поясов, часто маркирующих зоны смятия. В итоге пространственная геохимическая локализация квазигомогенных участков подчеркивает тектоническое строение территории, обусловленное сочленением двух крупных разноориентированных геологических структур СВ и СЗ простирания (рис. 2, з). В представленной классификации участки распространения гранитоидов, тяготеющие к понижениям в рельефе, и кирасированные водораздельные поверхности, сложенные амфиболитами, принадлежат одной ассоциации кластеров – *Б-а*. Однако они легко разделяются в более дробных характеристиках: III-2 и III-4 – пробы, отобранные в пределах крупных батолитов; I-2 – средние и малые гранитоидные интрузии; IV-4, V-2 и V-3 – кирасы. При этом по результатам сравнительных статистических тестов вторичные ореолы гранитоидов и кирас существенно различаются по характеристикам ожидаемого положения и рассеяния содержаний большинства химических элементов, кроме Cu, La, Pb и Zn.

В поисковой геохимии особенности распределения химических элементов в зоне гипергенеза описываются в рамках исследований элементарных геохимических ландшафтов. Известен факт, что амплитуда флуктуации геохимического фона, обусловленная ландшафтным строением территорий, может превосходить по своим значениям концентрирование рудных компонентов во вторичных ореолах рассеяния месторождений полезных ископаемых [2]. Недостаточное внимание к этому моменту при обработке литохимических данных приводит к выделению «ложных» ландшафтных или пропуску «продуктивных» слабоконтрастных аномалий. В результате сочетания многофакторного и кластер-анализа, по сути, создан вариант математической модели типологической ландшафтно-геохимической карты. Опираясь на классификацией CL-cl достаточно просто формировать выборки литохимических данных при расчете фоновых и аномальных параметров геохимического поля, которые для геоморфологически и геологически различных частей территории могут существенно различаться (рис. 3). В условиях влажного тропического выветривания горных пород процессы гипергенной миграции и накопления химических элементов очень контрастно влияют на геохимические характеристики вторичных ореолов рассеяния продуктов гидротермально-метасоматической деятельности. Только после внесения поправок на выявленные особенности изменчивости геохимического фона удалось получить

удовлетворительные литохимические критерии выделения участков гидротермальных изменений пород и вторичных ореолов рассеяния элементов-спутников золотой минерализации. Линейные зоны развития приразломных гидротермалитов картируются в значениях отношений коэффициентов концентраций центростремительных (Ag, Bi, As, Mo, W) и центробежных (Cr, Ni, Th) компонентов золоторудных гидротермальных систем [23–25]. По вторичным ореолам рассеяния известных проявлений золота получена линейная дискриминантная функция (D) для дифференциации по принадлежности к пробам с содержанием $Au \geq 0,1$ ppm:

$$D = -38,989 + 11,452 KAg + 9,157 KKBi + 4,293 KCMo + 2,681 KKW + 1,521 KKV - 1,41 KKNi - 1,143 KCTh.$$

Геохимический спектр и знаки дискриминационных коэффициентов, с одной стороны, проявляют характерную для орогенных месторождений золота зеленокаменного пояса Барама-Мазаруни пространственную близость к интрузивным телам гранитоидов и тектоническим зонам смятия, с другой стороны, включают элементы, описываемые для этих объектов в составе парагенезиса: Au–Ag–Te–W–Bi–Pb–Zn–Cu–Hg–Mo [16, 18].

Заключение

Изучение особенностей флуктуации фоновых содержаний химических элементов при поисках месторождений полезных ископаемых по вторичным ореолам рассеяния является важной составляющей процесса выбора геохимических прогнозно-поисковых критериев. Особенно высока актуальность количественной и качественной оценки фоновых параметров геохимического поля в ландшафтах теплого гумидного климата, характеризующихся высокой активностью водной миграции химических элементов. Даже при ограниченном объеме геологической информации методами многофакторного и кластер-анализа литохимических данных удастся создать пространственную классификационную модель, близкую по смыслу к ландшафтно-геохимической карте, и осуществить прогноз геологического строения территории.

Авторы выражают искреннюю признательность Виталию Юрьевичу Фомину, Анатолию Алексеевичу Кучеренко, Алексею Алексеевичу Данилову, Игорю Давыдовичу Гласс, Андрею Петровичу Зайченко и другим сотрудникам геологической службы ООО «Золотой Запас» за предоставленные геологические материалы, ценные советы и возможность проведения исследований в Республике Гайана.

Исследования поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 18-05-70047).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Handbook of exploration geochemistry: in 7 v. V. 4: Regolith exploration geochemistry in tropical and subtropical terrains / Ed. by C.R.M. Butt, H. Zeegers. – Rotterdam: Elsevier, 1992. – 607 p.
2. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафтов. Издание 3-е. – М.: Астрель-2000, 1999. – 768 с.
3. Voicu G., Bardoux M. Geochemical behavior under tropical weathering of the Barama-Mazaruni greenstone belt at Omai gold mine, Guiana Shield // Applied Geochemistry. – 2002. – № 17. – P. 321–336.
4. Geochemical sediments and landscapes / Ed. by D.J. Nash, S.J. McLaren. – Singapore: Blackwell Publishing, 2007. – 489 p.
5. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода: в 5 т. Т. 2: Система вода-порода в условиях зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев, Б.Н. Рыженко, В.А. Алексеев, Е.М. Дутова, И.А. Кондратьева, Ю.Г. Копылова, О.Е. Лепоку-

- рова / отв. ред. тома Б.Н. Рыженко. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 389 с.
6. Butt C.R.M., Cluzel D. Nickel laterite ore deposits: weathered serpentinites // *Elements*. – 2013. – V. 9. – P. 123–128.
 7. Rare earth element geochemistry during weathering of S-type granites from dry to humid climates of Brazil / Y.J.A.B. da Silva, C.W.A. do Nascimento, C.M. Biondi, P. van Straaten, Y.J.A.B. da Silva // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. – 2018. – V. 181. – Iss. 6. – P. 938–953.
 8. Insights on the paradigms applied for mineral exploration in deeply weathered landscapes / I. González-Álvarez, A.R. King, J. Klump, G. Smith, M. Brønner, S. Pernreiter, T. Ibrahim // *Proc. for the 5th Australian Regolith Geoscientists Association Conference*. – Wallaroo, South Australia, Report Book 2018/00011. – Adelaide: Department of the Premier and Cabinet, 2018. – P. 6–9.
 9. Spier C.A., Levett, A., Rosière C.A. Geochemistry of canga (ferricrete) and evolution of the weathering profile developed on itabirite and iron ore in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil // *Mineralium Deposita*. – 2019. – V. 54. – Iss. 7. – P. 983–1010.
 10. Mazzucchelli R.H. Geochemical exploration in areas affected by tropical weathering // *Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration* / Ed. by A.G. Gubins. – Toronto: Prospectors and Developers Association, 1997. – P. 315–322.
 11. Eberle D.G., Paasche H. Integrated data analysis for mineral exploration: a case study of clustering satellite imagery, airborne gamma-ray, and regional geochemical data suites // *Geophysics*. – 2012. – V. 77. – № 4. – P. B167–B176.
 12. Classifying airborne radiometry data with Agglomerative Hierarchical Clustering: a tool for geological mapping in context of rainforest (French Guiana) / G. Martelet, C. Truffert, B. Tourlière, P. Ledru, J. Perrin // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2006. – № 8. – P. 208–223.
 13. A new interpretation of the geology of British Guiana / R.B. McConnell, E. Williams, R.T. Cannon, N.J. Snelling // *Nature*. – 1964. – V. 204. – № 4954. – P. 115–118.
 14. Докембрий континентов. Северная и Южная Америка / А.К. Башарин, Н.А. Берзин, Б.Д. Дворкина, В.Н. Мошкин, В.И. Шульдинер. – Новосибирск: Изд-во «Наука» Сибирское отделение, 1976. – 239 с.
 15. Gibbs A.K., Barron C.N. *Geology of the Guiana Shield*. Oxford Monographs on Geology and Geophysics № 22. – Oxford: Clarendon Press, 1993. – 258 p.
 16. Voicu G., Bardoux M., Stevenson R. Lithostratigraphy, geochronology and gold metallogeny in the northern Guiana Shield, South America: a review // *Ore Geology Reviews*. – 2001. – № 18. – P. 211–236.
 17. Tedeschi M., Hagemann S.G., Davis J. The Karouni gold deposit, Guyana, South America: Part I. Stratigraphic setting and structural controls on mineralization // *Economic Geology*. – 2018. – V. 113. – № 8. – P. 1679–1704.
 18. Voicu G. *Geology, geochemistry and metallogeny of the Omai gold deposit, Guiana Shield, South America*. Doct. Diss. – Montreal, 1999. – 297 p.
 19. Юрьева Ю.С. Кобы выветривания и радиогеохимические критерии поисков золота в рудном узле Амамури (Республика Гайана): дис. ... магистра геологии. – Томск, 2018. – 182 с.
 20. Макаревич Т.Г. Геологическое строение и проект оценочных работ проявления золота «Контакт»: дис. ... магистра геологии. – Томск, 2018. – 113 с.
 21. Ткачев Ю.А. Корреляционный анализ в геохимии: три проблемы практического применения // *Известия Томского политехнического университета*. – 2008. – Т. 312. – № 1. – С. 34–41.
 22. Valls R.A. *Why, and how, we should use compositional data analysis. A Step-by-step guide for the field geologists*. – Toronto, Ontario: Wikibooks, 2008. – 58 p.
 23. Питулько В.М., Крицук И.Н. Основы интерпретации данных поисковой геохимии. – Л.: Недра, 1990. – 336 с.
 24. Соколов В.С. Структуры аномальных геохимических полей и прогноз оруденения. – СПб.: Недра, 1998. – 154 с.
 25. Ворошилов В.Г. Аномальные структуры геохимических полей гидротермальных месторождений золота: механизм формирования, методика геометризации, типовые модели, прогноз масштаба оруденения // *Геология рудных месторождений*. – 2009. – Т. 51. – № 1. – С. 3–19.

Поступила: 11.11.2019 г.

Информация об авторах

Соболев И.С., кандидат геолого-минералогических наук, главный геолог ООО «Гео Сервис»; научный сотрудник лаборатории перспективных методов морских исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДО РАН.

Соболева Н.П., кандидат географических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.8.053, 550.842, 550.84.09

FLUCTUATION ANALYSIS OF CHEMICAL ELEMENTS BACKGROUND VALUES IN LITHOCHEMICAL EXPLORATION UNDER TROPICAL WEATHERING (SOUTH AMERICA, GUYANA)

Igor S. Sobolev^{1,2},
geolsob@yandex.ru

Nadezhda P. Soboleva³,
sobnadi@yandex.ru

¹ LLC «Geo Service»,
5, office 21, Uchebnaya street, Tomsk, 634028, Russia.

² V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
43, Baltiyskaya street, Vladivostok, 690041, Russia.

³ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is determined by informative improvement of lithochemical exploration on secondary scattering halos under humid tropical weathering. Widespread distribution of large weathering cover leads to limitations in study of basement rocks in natural outcrops. In such cases the role of geochemical methods increases when mapping the basement and exploration of ore deposits localized there. Specific feature of tropical hypergene redistribution of chemical elements is high intensity, general prevalence of removal with parallel accumulation of several components in the laterization process. Combination of these processes results in high variability of geochemical background and appearance of secondary anomalies of some metal elements that are not associated with ore deposits. As a result, landscape-geochemical mapping is very relevant. The mapping allows making the zoning of territories based on components distribution features in elementary landscapes and systematizing the prior factors of geochemical background variability. The values of chemical elements concentration contain data on all natural processes that have affected the composition of the studied material. Therefore, the investigation of lithochemical data by statistical analysis tools allows obtaining a mathematical model in the form of a typological landscape-geochemical map.

The aim of the study is to differentiate the territory on geochemical background variability.

Methods: multivariate factor, correlation and cluster analysis of multi-component data of lithochemical exploration on secondary scattering halos.

Results. We obtained classification model of geochemical background that reflects relations between chemical elements accumulation levels, geomorphology and geology, taking into account the amplitude and spatial characteristics of geochemical field variability in secondary scattering halos; we also determined trace elements associated with gold mineralization.

Key words:

Weathering crust, chemical elements, classification model, geology, geomorphology, humid tropics.

The authors express thanks to Vitaly Yu. Fomin, Anatoly A. Kucherenko, Aleksey A. Danilov, Igor D. Glass, Andrey P. Zaychenko and other employees of geological service of LLC «Zolotoy Zapas» for geological materials, valuable advice and opportunity of research in Guyana.

The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research of (project no. 18-05-70047).

REFERENCES

1. *Handbook of exploration geochemistry: in 7 vol. Vol. 4: Regolith exploration geochemistry in tropical and subtropical terrains.* Eds. C.R.M. Butt, H. Zeegers. Rotterdam, Elsevier, 1992. 607 p.
2. Perelman A.I., Kasimov N.S. *Geokhimiya landshaftov* [Landscape geochemistry]. Moscow, Astreya-2000 Publ., 1999. 768 p.
3. Voicu G., Bardoux M. Geochemical behavior under tropical weathering of the Barama-Mazaruni greenstone belt at Omai gold mine, Guiana Shield. *Applied Geochemistry*, 2002, no. 17, pp 321–336.
4. *Geochemical sediments and landscapes.* Eds. D.J. Nash, S.J. McLaren. Singapore, Blackwell Publ., 2007. 489 p.
5. Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseev V.A., Dutova E.M., Kopylova Yu.G., Lepokurova O.E. *Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda–poroda. T. 2: Sistema voda–poroda v usloviyakh zony gipergeneza* [Geological evolution and self-organization of the water-rock system. Vol. 2: Water-rock system in a hypergenesis zone]. Ed. by B.N. Ryzhenko. Novosibirsk, Publishing House of the SB RAS, 2007. 389 p.
6. Butt C.R.M., Cluzel D. Nickel laterite ore deposits: weathered serpentinites. *Elements*, 2013, vol. 9, pp. 123–128.
7. Da Silva Y.J.A.B., Do Nascimento C.W.A., Biondi C.M., Van Straaten P., Da Silva Y.J.A.B. Rare earth element geochemistry during weathering of S-type granites from dry to humid climates of Brazil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2018, vol. 181, Iss. 6, pp. 938–953.
8. González-Álvarez I., King A.R., Klump J., Smith G., Bronner M., Pernreiter S., Ibrahim T. Insights on the paradigms applied for mineral exploration in deeply weathered landscapes. *Proceedings for the 5th Australian Regolith Geoscientists Association Conference*. Wallaroo, South Australia, Report Book 2018/00011. Adelaide, Department of the Premier and Cabinet, 2018. pp. 6–9.
9. Spier C.A., Levett A., Rosière C.A. Geochemistry of canga (ferricrete) and evolution of the weathering profile developed on itabirite and iron ore in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Mineralium Deposita*, 2019, vol. 54, Iss. 7, pp. 983–1010.

10. Mazzucchelly R.H. Geochemical exploration in areas affected by tropical weathering. *Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. Ed. by A.G. Gubins. Toronto, Prospectors and Developers Association, 1997. pp. 315–322.
11. Eberle D.G., Paasche H. Integrated data analysis for mineral exploration: a case study of clustering satellite imagery, airborne gamma-ray, and regional geochemical data suites. *Geophysics*, 2012, vol. 77, no. 4, pp. B167–B176.
12. Martelet G., Truffert C., Tourlie' re B., Ledru P., Perrin J. Classifying airborne radiometry data with Agglomerative Hierarchical Clustering: a tool for geological mapping in context of rainforest (French Guiana). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2006, no. 8, pp. 208–223.
13. McConnell R.B., Williams E., Cannon R.T., Snelling N.J. A new interpretation of the geology of British Guiana. *Nature*, 1964, vol. 204, no. 4954, pp. 115–118.
14. Basharin A.K., Berzin N.A., Dvorkina B.D., Moshkin V.N., Schuldiner V.I. *Dokembriy kontinentov. Severnaya i Yuzhnaya Amerika* [Pre-Cambrian continents. North and South America]. Novosibirsk, Nauka Publ. house, Siberian Branch, 1976. 239 p.
15. Gibbs A.K., Barron C.N. *Geology of the Guiana Shield. Oxford Monographs on Geology and Geophysics no. 22*. Oxford, Clarendon Press, 1993. 258 p.
16. Voicu G., Bardoux M., Stevenson R. Lithostratigraphy, geochronology and gold metallogeny in the northern Guiana Shield, South America: a review. *Ore Geology Reviews*, 2001, no. 18, pp. 211–236.
17. Tedeschi M., Hagemann S.G., Davis J. The Karouni gold deposit, Guyana, South America: P. I. Stratigraphic setting and structural controls on mineralization. *Economic Geology*, 2018, vol. 113, no. 8, pp. 1679–1704.
18. Voicu G. *Geology, geochemistry and metallogeny of the Omai gold deposit, Guiana Shield, South America*. Dr. Diss. Montreal, 1999. 297 p.
19. Yurieva Yu.S. *Kory vyvetriviya i radiogeokhimicheskie kriterii poiskov zolota v rudnom uzle Amamuri (Respublika Gayana)*. Diss. magistra [Weathering crusts and radio-geochemical criteria for gold prospecting in the Amamuri ore cluster (Republic of Guyana). Master's Diss.]. Tomsk, 2018. 182 p.
20. Makarevich T.G. *Geologicheskoe stroenie i proekt otsenochnykh rabot proyavleniya zolota «Kontakt»*. Diss. magistra [Geology and the prospect project of the «Contact» gold occurrence. Master's Diss.]. Tomsk, 2018. 113 p.
21. Tkachev Yu.A. Correlation analysis in geochemistry: three problems of practical application. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 1, pp. 34–41. In Rus.
22. Valls R.A. *Why, and how, we should use compositional data analysis. A Step-by-step guide for the field geologists*. Toronto, Ontario, Wikibooks, 2008. 58 p.
23. Pitulko V.M., Kritsuk I.N. *Osnovy interpretatsii dannykh poiskovoy geokhimii* [Basics of geochemistry exploration data interpretation]. Leningrad, Nedra Publ., 1990. 336 p.
24. Sokolov V.S. *Struktury anomalnykh geokhimicheskikh poley i prognoz orudeneniya* [Structures of abnormal geochemical fields and ore mineralization forecast]. St. Petersburg, Nedra Publ., 1998. 154 p.
25. Voroshilov V.G. Anomalous structures of geochemical fields of hydrothermal gold deposits: formation mechanism, methods of geometrization, typical models, and forecasting of ore mineralization. *Geology of ore deposits*, 2009, vol. 51, no. 1, pp. 3–19. In Rus.

Received: 11 November 2019.

Information about the authors

Igor S. Sobolev, Cand. Sc., chief geologist, LLC «Geo Service»; researcher, V.I. Ilichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences.

Nadezhda P. Soboleva, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 519.688:622.276

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ВЫДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В ПРОЦЕССЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН

Сергеев Виктор Леонидович¹,
SVL00@tpu.ru

Донг Ван Хоанг¹,
hoang.tpu@gmail.com

Хагай Данил Эдуардович²,
hagayd@mail.ru

Игнатенко Александр Владимирович³,
IgnatenkoAV@alstron.kz

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² ООО «Альтаир»,
Россия, 634062, г. Томск, Иркутский тракт, 71Д.

³ ТОО «АЛСТРОНТЕЛЕКОМ»,
Казахстан, 050032, г. Алматы, ул. Тимирязева, 42.

Актуальность работы обусловлена необходимостью выделения фильтрационных режимов течения для определения гидродинамических параметров нефтяных пластов в процессе проведения нестационарных испытаний горизонтальных скважин по кривым восстановления забойного давления.

Целью исследования является разработка диагностических критериев детерминированных моментов давлений для выделения фильтрационных режимов течения в процессе нестационарных гидродинамических испытаний горизонтальных скважин нефтяных месторождений по кривым восстановления давления.

Методы исследования основаны на теории и практике нестационарных испытаний горизонтальных скважин, линейной алгебре, идентификации систем, системном анализе. Апробация предложенных диагностических критериев осуществлялась с использованием промысловых данных нестационарных испытаний нефтяных горизонтальных скважин по кривым восстановления забойного давления.

Результаты. Разработаны диагностические критерии выделения на кривой восстановления забойного давления участков раннего радиального, линейного и позднего радиального (псевдорadiального) потоков в процессе проведения гидродинамических исследований горизонтальных скважин нефтяных месторождений. В основе диагностических критериев использованы оценки детерминированных моментов давлений, полученные в процессе проведения испытаний горизонтальных скважин. Для определения неизвестных значений пластовых и забойных давлений на недовосстановленном участке кривой восстановления забойного давления использованы феноменологические прогнозирующие модели забойного давления с параметрами, зависящими от времени, с учетом экспертной оценки пластового давления, и адаптивные алгоритмы идентификации. Проводилась обработка результатов испытаний двух горизонтальных скважин нефтяного месторождения. Показано, что предложенные диагностические критерии практически не уступают по точности графоаналитическому методу выделения режимов фильтрации и позволяют определять время начала и завершения фильтрационных потоков, а также время завершения испытаний скважин в процессе их проведения без участия квалифицированного интерпретатора.

Ключевые слова:

Диагностические критерии, фильтрационные потоки, адаптация, горизонтальные скважины, гидродинамические исследования скважин, идентификация, кривые восстановления давления, нефтяные пласты.

Введение

Актуальной проблемой при обработке результатов нестационарных гидродинамических исследований (ГДИ) горизонтальных скважин является задача выделения на кривой восстановления давления (КВД) участков раннего радиального, линейного и позднего радиального потоков. В настоящее время основными методами выделения фильтрационных потоков являются аналитический и графоаналитический, основанный на визуальном анализе производной забойного давления (рис. 1) [1–10].

Однако в промысловых условиях использование этих методов в процессе проведения гидродинамиче-

ских исследований скважин вызывает большие трудности в связи с тем, что требует достоверного сведения о состоянии пластов и оклоскважинной зоны (с использованием аналитических методов) либо детального анализа логарифмической производной давления с участием квалифицированных интерпретаторов.

В этой связи перспективным направлением развития методов диагностики фильтрационных потоков горизонтальных скважин, оснащенных стационарными информационными измерительными телеметрическими системами, являются адаптивные технологии идентификации, позволяющие не только выделять фильтрационные потоки, но и определять параметры

нефтяных пластов и время завершения гидродинамических исследований в процессе их проведения в промысловых условиях без участия квалифицированного интерпретатора [11–13].

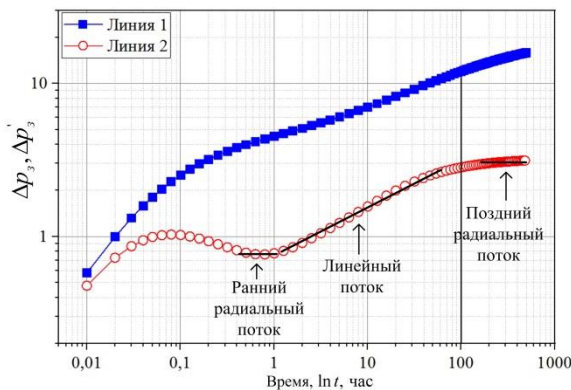


Рис. 1. Типовая кривая восстановления давления Δp_3 (линия 1) и ее производной $\Delta p'_3$ (линия 2)

Fig. 1. Pressure buildup curve Δp_3 (line 1) and its derivative $\Delta p'_3$ (line 2)

В данной работе, в развитие адаптивных технологий диагностики для выделения фильтрационных потоков, предлагается использовать зависящие от времени детерминированные моменты давлений (ДМД) $\mu_k(t)$ вида:

$$\mu_k(t) = \int_{t_0}^t (p_{\text{пл}}(t) - p_3^*(t)) t^k dt + \int_t^{t_p} (p_{\text{пл}}(t) - p_3(t_n + \tau)(t_n + \tau)^k) d\tau, k = 0, 1, 2, \quad (1)$$

где пластовое $p_{\text{пл}}(t) \rightarrow p_{\text{пл}}(t_p)$, $t \rightarrow t_p$ и забойное давление $p_3(t_n + \tau)$ на недовосстановленном участке КВД $(t, t_p]$ представлены неизвестными однозначными функциями текущего времени t с момента остановки скважины t_0 ; t_p – время восстановления забойного давления до пластового; $p_3^*(t)$ – забойное давление.

В частном случае, при $t = t_k$, где t_k – время завершения гидродинамических исследований, ДМД (1) представляет собой основу известного традиционного метода определения типа и параметров нефтяных и газовых пластов [14, 15], проблемными моментами которого является определение момента времени завершения гидродинамических исследований t_k , пластового $p_{\text{пл}}(t_p)$ и забойного давлений $p_3(t_n + \tau)$ в процессе проведения испытаний. Для решения данной проблемы в [16] предложен адаптивный метод ДМД, позволяющий определять пластовое и забойное давление, а также время завершения гидродинамических исследований вертикальных скважин в процессе их проведения в промысловых условиях. Основой адаптивного метода ДМД являются оценки (1), которые предлагается использовать в данной работе для формирования диагностических критериев выделения фильтрационных режимов течения в процессе проведения испытаний горизонтальных скважин.

Диагностические критерии выделения фильтрационных потоков

В качестве диагностических параметров $d_1^*(t)$, $d_2^*(t)$ для выделения приведенных на рис. 1 фильтрационных потоков в процессе проведения ГДИ горизонтальных скважин в работе использованы приближения:

$$d_1^*(t) = \frac{d(\mu_1^*(t) / (\mu_0^*(t))^2)}{dt},$$

$$d_2^*(t) = \mu_0^*(t) \mu_2^*(t) / (\mu_1^*(t))^2, \quad (2)$$

где $\mu_k^*(t)$, $k = 0, 1, 2$ – оценки ДМД (1), в которых пластовые $p_{\text{пл}}^*(t)$ и забойные давления на недовосстановленном участке КВД $p_3^*(t + \tau)$ получены с использованием метода адаптивной идентификации [11, 17]

$$p_{\text{пл}}^*(t) = f(t_p, \mathbf{a}_t^*(\mathbf{h}_t^*)), \quad (3)$$

$$p_3^*(t + \tau) = f(t + \tau, \mathbf{a}_t^*(\mathbf{h}_t^*)).$$

В (3), согласно методу адаптивной идентификации, оценки $\mathbf{a}_t^*(\mathbf{h}_t^*)$ параметров модели забойного давления $f(t_n, \mathbf{a}_n)$ (6) и управляющих параметров \mathbf{h}_n^* определяются из решения двух оптимизационных задач

$$\mathbf{a}_n^*(\mathbf{h}_n) = \arg \min_{\mathbf{a}_n} \Phi(t_n, \mathbf{a}_n, \mathbf{h}_n), \quad (4)$$

$$\mathbf{h}_n^* = \arg \min_{\mathbf{h}_n} J_0(t_n, \mathbf{a}_n^*(\mathbf{h}_n)), n = \overline{1, n_k}. \quad (5)$$

Здесь $\Phi(\mathbf{a}_n, \mathbf{h}_n) = J_0(\mathbf{a}_n, h_{3,n}) + J_a(\mathbf{a}_n, h_{p,n}, h_{k,n})$ – комбинированный показатель качества модели вида:

$$\begin{cases} p_3^*(t_n) = p_3(t_0) + f(t_n, \mathbf{a}_n) + \xi(t_n), n = \overline{1, n_k}, \\ h_{k,n} \cdot \bar{p}_{\text{пл}} = p_3(t_0) + f(T, \mathbf{a}_n) + \eta_n, \end{cases} \quad (6)$$

в которой $f(t_n, \mathbf{a}_n)$ – феноменологическая модель забойного давления $p_3^*(t_n)$ [18]; $\mathbf{a}_n = (\alpha_1(t_n), \alpha_2(t_n), \dots, \alpha_m(t_n))$ – вектор параметров, представленный неизвестными однозначными функциями дискретного времени t_n ; $\bar{p}_{\text{пл}}$, T – экспертные оценки пластового давления и времени восстановления забойного давления до пластового;

$$J_0(t_n, \mathbf{a}_n, h_{3,n}) = \sum_{i=1}^{n_k} w_n \left(\frac{t_n - t_i}{h_{3,n}} \psi_0(\Delta p_3^*(t_n) - f_0(t_n, \mathbf{a}_n)) \right) -$$

показатель качества модели КВД $f(t_n, \mathbf{a}_n)$; $J_a(\mathbf{a}_n, \mathbf{h}_n) = \psi_a(h_{k,n} \cdot \bar{p}_{\text{пл}} - (p_3(t_0) + f(T, \mathbf{a}_n)))$ – показатель качества модели пластового давления; $\Delta p_3^*(t_n) = p_3^*(t_n) - p_3(t_0)$; ψ_0, ψ_a – известные функции [17]; $\mathbf{h}_n^* = (h_{3,n}^*, h_{p,n}^*, h_{k,n}^*)$ – вектор оценок управляющих параметров (забывания $h_{3,n}^*$, регуляризации $h_{p,n}^*$, корректировки $h_{k,n}^*$); где

$$w_n((t_n - t_i)/h_{3,n}), i = \overline{1, n} -$$

значения весовой функции $w(x)$, введенной для организации процесса адаптивной идентификации,

$$w(0) = 1, w(x_1) \leq w(x_2) \text{ при } |x_1| < |x_2|.$$

Целесообразность использования оценок (2) для выделения фильтрационных потоков объясняется тем, что в области линейного и позднего радиального потоков диагностические параметры $d_1^*(t)$ и $d_2^*(t)$ имеют выраженные экстремумы (рис. 3, 4). В табл. 1 приведены критерии выделения фильтрационных потоков, основанные на диагностических параметрах (2).

Таблица 1. Диагностические критерии выделения фильтрационных потоков

Table 1. Diagnostic criteria for identifying flow regimes

Фильтрационные потоки Flow regimes	Диагностические критерии Diagnostic criteria	Критерии моментов времени потоков Criteria for estimating time of regimes
Ранний радиальный Early-radial	$\min_t(d_1^*(t) - d_2^*(t))$ при $t \leq \bar{t}_n$	$t_{pp} = \arg \min_t(d_1^*(t) - d_2^*(t))$ при $t > \bar{t}_n$
Линейный Linear	$\min_t(d_1^*(t))$	$t_{л} = \arg \min_t(d_1^*(t))$
Поздний радиальный Late-radial	$\max_t(d_2^*(t))$	$t_{np} = \arg \max_t(d_2^*(t))$

Результаты диагностики фильтрационных режимов течения по промысловым испытаниям скважин

Результаты изучения моделей и алгоритмов метода адаптивной диагностики фильтрационных режимов течения по данным нестационарных испытаний нефтяных горизонтальных скважин № 1 и 2 месторождения Тюменской области представлены на рис. 3, 4 и в табл. 3. Исходные и дополнительные данные скважин приведены в табл. 2. На рис. 2 изображены промысловые значения забойных давлений $p_3^*(t_i)$, $i = \overline{1, n}$ (2), полученные в процессе проведения ГДИ скважин, в полулогарифмических координатах ($p_3^*(t)$ – по оси Y, $\ln t$ – по оси X).

На рис. 3, 4 (линией 1) изображены сглаженные значения логарифмической производной $y(t) = \lg(dp_3^*(t)/d(\ln t))$ забойного давления $p_3^*(t)$, используемые в графоаналитических методах для выделения фильтрационных потоков [19–24]. Оценки диагностических параметров (2) с использованием в модели (6) логистической феноменологической функции Хоанг-Ан с переменными, зависящими от времени параметрами $b(t), \alpha_1(t), \alpha_2(t)$ [18]

$$f(t, b(t), \alpha_1(t), \alpha_2(t)) = (1 - e^{-b(t)t})^{-1} \cdot (\alpha_1(t) + \alpha_2(t) \cdot \ln t), \quad (7)$$

изображены на рис. 3, 4 линиями 2, 3.

Следует отметить, что для модели (6) (с учетом (7)), представленной в матричном виде

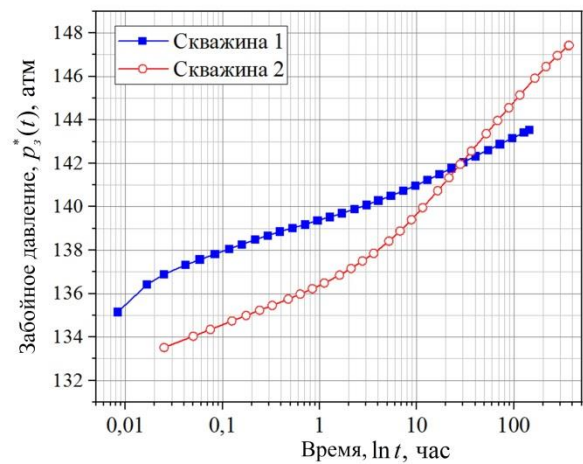


Рис. 2. Кривые восстановления давления горизонтальных скважин № 1 и 2 в полулогарифмических координатах

Fig. 2. Build-up curves of horizontal wells no. 1 and 2 in semi-log plot

Таблица 2. Исходные и дополнительные априорные данные горизонтальных скважин

Table 2. Initial and additional a priori data of horizontal wells

Исходные и дополнительные данные Initial and additional a priori data	Скважины/Wells	
	№ 1	№ 2
Радиус скважины r_c , м Well radius r_c , m	0,108	0,108
Пористость ϕ Porosity ϕ	0,13	0,13
Толщина пласта h , м Formation thickness h , m	5,4	7,2
Динамическая вязкость нефти μ , сП Oil dynamic viscosity μ , cP	3,92	3,92
Температура при стандартном условии $T_{ск}$ (+20 °C) K Temperature, standard conditions $T_{ск}$, (+20 °C) K	293	293
Пластовая температура $T_{пл}$, K Reservoir temperature $T_{пл}$, K	298	298
Сжимаемость пласта c_t , атм ⁻¹ Reservoir compressibility c_t , atm ⁻¹	$4,72 \cdot 10^{-4}$	$4,72 \cdot 10^{-4}$
Стандартное давление $P_{ст}$, атм Standard pressure $P_{ст}$, atm	1,033	1,033
Дебит скважины до остановки q_0^* , м³/сут Well rate before shut-in q_0^* , m³/day	137	163,2
Экспертная оценка пластового давления, атм Expert estimate of reservoir pressure, atm	142	150
Экспертная оценка времени начала линейного потока, $\bar{t}_л$, ч Expert estimate of linear regime beginning $\bar{t}_л$, hour	2	2

$$\begin{cases} \Delta p_{3,n}^* = F_n(b_n) \alpha_n + \xi_n, \\ H_{\kappa,n} \bar{\alpha} = f_a(\alpha_n) + \eta_n, n = \overline{1, n_\kappa}, \end{cases} \quad (8)$$

задача параметрической идентификации (4), (5) при использовании частных квадратичных показателей качества $\psi_0(x) = \psi_a(x) = x^2$ сводится к решению двух одномерных оптимизационных задач:

$$b_n^*(h_{k,n}) = \arg \min_{b_n} \left(\left\| \Delta \mathbf{p}_{3,n}^* - F_n(b_n) \mathbf{a}_n^*(b_n, h_{k,n}) \right\|_{W(h_{3,n})}^2 \right), \quad (9)$$

$$h_{k,n}^* = \arg \min_{h_{k,n}} \left(\left\| \Delta \mathbf{p}_{3,n}^* - f(b_n) F_n \mathbf{a}_n^*(b_n, h_{k,n}) \right\|_{W(h_{3,n})}^2 \right), \quad (10)$$

где оценки \mathbf{a}_n^* параметра \mathbf{a}_n модели (8) определяются из решения системы линейных алгебраических уравнений вида

$$\begin{aligned} (F_n(b_n)^T K(h_{3,n}) F_n(b_n) + h_{p,n} I) \mathbf{a}_n &= \\ &= F_n(b_n)^T K(h_{3,n}) \Delta \mathbf{p}_{3,n}^* + h_{p,n} H_{k,n} \mathbf{a}, \end{aligned} \quad (11)$$

$\Delta \mathbf{p}_{3,n}^* = (p_{3,n}^* - p_{3,n}^*(t_0), n = n_{\text{нп}}, n_k)$ – вектор значений разности забойного давления;

$$F_n^T(b_n) = \begin{pmatrix} y_1(b_1) & y_2(b_2) & \dots & y_n(b_n) \\ y_1(b_1)x_1 & y_2(b_2)x_2 & \dots & y_n(b_n)x_n \end{pmatrix} -$$

матрица, в которой

$$y_i(b_i) = (1 - e^{-b(i-i)})^{-1}, \quad x_i = \lg(t_i), \quad i = \overline{1, n_k};$$

$$K(h_{3,n}) = \text{diag}(w((t_n - t_{n-i})/h_{3,n}), i = \overline{0, n-1}) -$$

диагональная матрица весовых функций $w((t_n - t_{n-i})/h_{3,n})$ с параметром забывания $h_{3,n}$; $h_{p,n}$ – параметр регуляризации; $H_{k,n} = \text{diag}(0, h_{k,n})$ – диагональная матрица; $\Gamma = \text{diag}(0, 1)$; T – символ транспонирования; ξ_n, η_n – случайные величин.

Оптимизационные задачи (9), (10) решаются с применением метода дихотомии [25]. Оценки параметров $b_n^*, h_{k,n}^*, \mathbf{a}_n^*$, (9)–(11), получены при постоянных единичных значениях весовой функции $w((t_n - t_{n-i})/h_{3,n})$ в текущем интервале обработки $[t_n - t_{n-4}]$, содержащем пять значений забойного давления ($h_{3,n} = 5$), ($w_n((t_n - t_{n-i})/h_{3,n}) = 1$ при $(t_n - t_{n-i}) \leq h_{3,n} - t_n - t_{n-4}$ и $w_n((t_n - t_{n-i})/h_{3,n}) = 0$ при $(t_n - t_{n-i}) > h_{3,n}$, $i = \overline{0, n-1}$), $h_{p,n} = h_p = 0,01$.

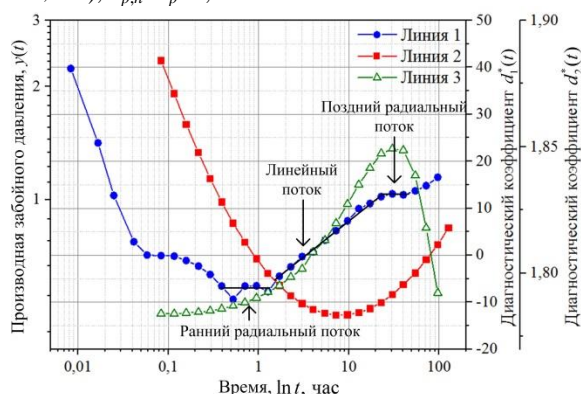


Рис. 3. Диагностические графики скважины № 1 (линия 1 – производная забойного давления $y(t)$, линии 2, 3 – диагностические коэффициенты $d_1^*(t), d_2^*(t)$ (2))

Fig. 3. Diagnostic plot of well no. 1 (line 1 – pressure derivative, line 2, 3 – diagnostic coefficients $d_1^*(t), d_2^*(t)$ (2))

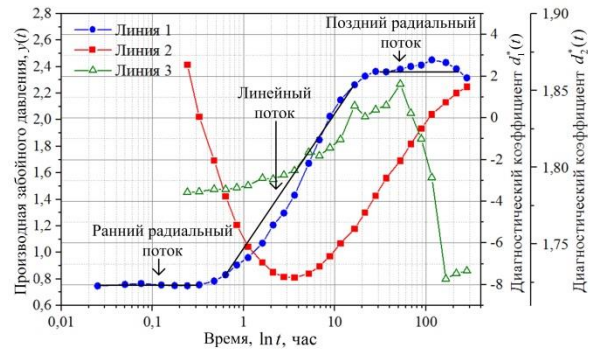


Рис. 4. Диагностические графики скважины № 2 (линия 1 – производная забойного давления $y(t)$, линии 2, 3 – диагностические коэффициенты $d_1^*(t), d_2^*(t)$ (2))

Fig. 4. Diagnostic plot of well no. 2 (line 1 – pressure derivative, line 2, 3 – diagnostic coefficients $d_1^*(t), d_2^*(t)$ (2))

Таблица 3. Результаты диагностики фильтрационных потоков скважин № 1 и 2

Table 3. Results of flow regimes diagnostic of wells no. 1 and 2

Скважина Well	Метод диагностики потоков Flow diagnostic method	Время завершения раннего радиального потока Early-radial flow end time	Время центральной части линейного потока Middle time of the linear flow	Время начала позднего радиального потока Beginning of late-radial flow
№ 1	Графоаналитический Graphoanalytical	1,05	7,1	13,8
	Адаптивный с идентификацией ДП Adaptive method with identification of diagnostic parameter	1,08	7,4	13,1
№ 2	Графоаналитический Graphoanalytical	0,35	1,5	14
	Адаптивный с идентификацией ДП Adaptive method with identification of diagnostic parameter	0,41	1,43	14,2

Из рис. 3, 4 и табл. 3 видно, что полученные с использованием приведенных в табл. 1 диагностических критериев моменты времени фильтрационных потоков не уступают по точности моментам времени, определенным с использованием графоаналитического метода диагностики потоков по производной забойного давления. Например, для скважины № 1 момент времени завершения раннего радиального потока, полученного адаптивным методом, практически совпадает с моментом времени, полученным на основе графоаналитического метода, и составляет 1,05 часа после остановки скважины.

Заключение

Предложены диагностические критерии детерминированных моментов давлений для выделения фильтрационных потоков в процессе гидродинамических исследований горизонтальных скважин нефтяных месторождений.

По результатам исследований двух скважин нефтяного месторождения показано, что разработан-

ные диагностические критерии практически не уступают по точности графоаналитическому методу диагностики потоков, основанному на визуальном анализе производной забойного давления, и позволяют выделять фильтрационные потоки в процессе проведения нестационарных испытаний скважин по кривым восстановления забойного давления без участия квалифицированного интерпретатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Развитие геофизического и гидродинамического мониторинга на этапе перехода к разработке объектов с трудноизвлекаемыми запасами нефти / В.Г. Мартынов, А.И. Ипатов, М.И. Кременецкий, Д.Н. Гуляев, В.М. Кричевский, В.В. Кокурина, С.И. Мельников // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 3. – С. 106–109.
2. Кременецкий М.И., Ипатов А.И., Гуляев Д.Н. Информационное обеспечение и технологии гидродинамического моделирования нефтяных и газовых скважин. – М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. – 896 с.
3. Joshi S.D. Horizontal well technology. – Oklahoma: PenWell publ. comp., 1991. – 381 p.
4. Bourdet D., Ayoub J.A., Pirard Y.M. Use of pressure derivative in well test interpretation // Society of Petroleum Engineers. – 1984. – № 12777. – P. 293–302.
5. Хисамов Р.С., Сулейманов Э.И., Фархуллин Р.Г. Гидродинамические исследования скважин и методы обработки результатов измерений. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2000. – 228 с.
6. Kuchuk F.J. Well testing and interpretation for horizontal wells // Journal of Petroleum Technology. – 1995. – V. 47. – № 1. – P. 36–41.
7. Odeh A.S. Transient flow behavior of horizontal well: Pressure drawdown and buildup analysis of horizontal wells in anisotropic media // Society of Petroleum Engineers. – 1987. – № 14250. – P. 683–697.
8. Kolin S.K., Kureija T., Grebenar D. Pressure build-up test analysis of the hydrocarbon reservoir system with the multiphase flow // The mining-geology-petroleum engineering bulletin. – 2018. – № 9. – P. 1–15.
9. Kamal M.M. Transient well testing. – Texas: Society of Petroleum Engineers, 2009. – 863 p.
10. Иктисанов В.А. Совершенствование методик интерпретации кривых восстановления давления горизонтальных скважин // Нефтяное хозяйство. – 2002. – № 2. – С. 56–59.
11. Сергеев В.Л., Бу К.Д. К оптимизации адаптивных алгоритмов идентификации и интерпретации гидродинамических исследований с учетом влияния ствола скважины // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19. – № 3. – С. 98–102.
12. Романова Е.В., Сергеев В.Л. Адаптивная идентификация кривой восстановления давления горизонтальных скважин с диагностикой потоков // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 5. – С. 20–25.
13. Сергеев В.Л., Донг Ван Хоанг, Хагай Д.Э. Модели и алгоритмы адаптивного метода диагностики фильтрационных потоков в процессе испытаний горизонтальных скважин // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22. – № 2. – С. 90–95.
14. Басович И.Б., Капцанов Б.С. Выбор фильтрационных моделей по данным гидродинамических исследований скважин // Нефтяное хозяйство. – 1980. – № 3. – С. 44–47.
15. Булгаков С.А., Ольховская Б.А. Повышение информативности исследования нефтяных скважин на основе метода ДМД // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2011. – № 1. – С. 54–57.
16. Сергеев В.Л., Нгуен Т.Х.Н., Бу К.Д. Модели и алгоритмы идентификации начального участка забойного давления в адаптивном методе детерминированных моментов давлений // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21. – № 4. – С. 105–115.
17. Сергеев В.Л. Интегрированные системы идентификации. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2011. – 198 с.
18. Сергеев В.Л., Донг Ван Хоанг, Фам Динь Ан. Адаптивная идентификация гидродинамических исследований горизонтальных скважин на прогнозирующих моделях // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 165–172.
19. Bourdet D. Well test analysis: the use of advanced interpretation models. – Amsterdam: Elsevier Science, 2002. – 426 p.
20. Engler T., Tiab D. Analysis of pressure and pressure derivative without type-curve matching. Horizontal well tests in anisotropic media // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 1996. – № 15. – P. 153–168.
21. Ozkan E., Raghavan R., Joshi S.D. Horizontal-well pressure analysis // Society of Petroleum Engineers. – 2007. – № 16378. – P. 567–575.
22. Lu J., Cunha L.B., Lu T. New solution for well test analysis of horizontal wells // Society of Petroleum Engineers. – 2002. – № 78972. – P. 1–7.
23. Pressure and pressure derivative interpretation for horizontal wells in compressible formations / F.H. Escobar, Yu-Long Zhao, C. Urazan, C.M. Trujillo // Journal of Geophysics and Engineering. – 2018. – № 15. – P. 1551–1560.
24. Kuchuk F.J., Onur M., Hollaender F. Pressure transient formation and well testing: convolution, deconvolution and nonlinear estimation. – Amsterdam: Elsevier Science, 2010. – 389 p.
25. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. – СПб.: Изд-во «Лань», 2015. – 512 с.

Поступила: 01.11.2019 г.

Информация об авторах

Сергеев В.Л., доктор технических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Донг Ван Хоанг, аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Хагай Д.Э., руководитель проекта, ООО «Альтаир».

Игнатенко А.В., директор ТОО «АЛСТРОНТЕЛЕКОМ».

UDC 519.688:622.276

DIAGNOSTIC CRITERIA FOR IDENTIFICATION OF FILTRATION FLOWS DURING HORIZONTAL WELL TESTS

Viktor L. Sergeev¹,
SVL00@tpu.ru

Dong Van Hoang¹,
hoang.tpu@gmail.com

Danil E. Khagay²,
hagayd@mail.ru

Aleksandr V. Ignatenko³,
IgnatenkoAV@alstron.kz

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Altair company,
71D, Irkutskh street, Tomsk, 634062, Russia.

³ LLP «Alstrontelecom»,
42, Timiryazeva street, Almaty, 050032, Kazakhstan.

The relevance of the research is caused by the need to identify the filtration flow regimes for operational determination of hydrodynamic parameters of oil reservoirs during horizontal well tests by bottomhole pressure buildup curves

The main aim of the research is to develop diagnostic criteria of deterministic pressure moments for identification of filtration flow regimes during horizontal well tests in oil fields by pressure recovery curve.

The methods are based on theory and practice of non-stationary horizontal well tests, linear algebra, system identification, system analysis. The proposed diagnostic criteria were tested on the basis of field data of horizontal well tests in oil field by bottomhole pressure buildup curve.

The results. The authors have developed the diagnostic criteria for identification of early-radial, linear and late-radial (pseudoradial) flow regimes on pressure buildup curve during horizontal well tests in the oil fields.

The diagnostic criteria are based on the estimates of deterministic pressure moments obtained during horizontal well tests. To define the unknown values of reservoir and bottomhole pressures the adaptive identification algorithms and phenomenological forecasting models of bottomhole pressure with variable parameters were used taking into account additional a priori information about reservoir pressure. The processing of test results of two horizontal wells in an oil field was carried out, it is shown that the proposed diagnostic criteria are not inferior in accuracy to the graph-analytical method for identifying filtration regimes and allow determining the time of the beginning and completion of the filtration flows, as well as the time of well shut-in during the tests without the participation of a qualified interpreter.

Key words:

Diagnostic criteria, filtration flows, adaptation, horizontal wells, well hydrodynamic study, identification, pressure buildup curve, oil reservoirs.

REFERENCES

1. Martynov V.G., Ipatov A.I., Kremenetskiy M.I., Gulyaev D.N., Krichevskiy V.M., Kokurina V.V., Melnikov S.I. Permanent reservoir monitoring by logging gages at the stage of tight oil recovery. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2014, no. 1, pp. 106–109. In Rus.
2. Kremenetskiy M.I., Ipatov A.I., Gulyaev D.N. *Informatsionoe obespechenie i tekhnologii gidrodinamicheskogo modelirovaniya neftyanykh i gazovykh zalezhey* [Information and technology of hydrodynamic modeling of oil and gas deposits]. Moscow; Izhevsk, Institute of computer research Press, 2012. 896 p.
3. Joshi S.D. *Horizontal well technology*. Oklahoma, PenWell publ. comp., 1991. 381 p.
4. Bourdet D., Ayoub J.A., Pirard Y.M. Use of pressure derivative in well test interpretation. *Society of Petroleum Engineers*, 1984, no. 12777, pp. 293–302.
5. Khisamov R.S., Suleymanov E.I., Farkhullin R.G. *Gidrodinamicheskie issledovaniya skvazhin i metody obrabotki rezultatov izmereniy* [Hydrodynamic studies of wells and methods of processing the results of measurements]. Moscow, VNIOENG Publ., 2000. 228 p.
6. Kuchuk F.J. Well testing and interpretation for horizontal wells. *Journal of Petroleum Technology*, January 1995, vol. 47, no. 1, pp. 36–41.
7. Odeh A.S. Transient flow behavior of horizontal well: Pressure drawdown and buildup analysis of horizontal wells in anisotropic media. *Society of Petroleum Engineers*, 1987, no. 14250, pp. 683–697.
8. Kolin S.K., Kureija T., Grebenar D. Pressure build-up test analysis of the hydrocarbon reservoir system with the multiphase flow. *The mining-geology-petroleum engineering bulletin*, 2018, no. 9, pp. 1–15.
9. Kamal M.M. *Transient well testing*. Texas, Society of Petroleum Engineers, 2009. 836 p.
10. Iktisanov V.A. Sovershenstvovanie metodik interpretatsii krivyykh vosstanovleniya davleniya gorizontalnykh skvazhin [Improving the interpretation techniques of buildup curves of horizontal wells]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2002, no. 2, pp. 56–59. In Rus.
11. Sergeev V.L., Vu Quang Duc. Optimization of adaptive algorithms for identification and interpretation of hydrodynamics research considering wellbore storage. *Proceeding of TUSUR University*, 2016, no. 3 (19), pp. 98–102. In Rus.
12. Romanova E.V., Sergeev V.L. Adaptive interpretation of pressure recovery curve of horizontal wells with flow diagnostics. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 5, pp. 20–25. In Rus.

13. Sergeev V.L., Dong V.H., Khagay D.E. Models and algorithms of adaptive method to detect filtration flow during horizontal well testing. *Proceeding of TUSUR University*, 2019, no. 2 (22), pp. 90–95. In Rus.
14. Basovich I.B., Kartsanov B.S., Vybor filtratsionnykh modeley po dannym gidrodinamicheskikh issledovaniy [Selection of filtration models based on well testing data]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 1980, no. 3, pp. 44–47.
15. Bugalkov S.A., Olkhovskaya B.A. Povyshenie informativnosti issledovaniya neftyanykh skvazhin na osnove metoda DMD [Improving the informativeness of wells test based on the DMD method]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2011, no. 1, pp. 54–57.
16. Sergeev V.L., Nguyen T.H.P., Vu Q.D. Models and algorithms for identification of oil and gas reservoirs by the adaptive method of deterministic pressure moments. *Proceeding of TUSUR University*, 2018, no. 4 (21), pp. 109–115. In Rus.
17. Sergeev V.L. *Integrirovannyye sistemy identifikatsii* [Integrated identification system]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2011. 198 p.
18. Sergeev V.L., Dong Van Hoang, Pham Dinh An. Adaptive interpretation of the results of horizontal well production testing using forecasting models. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 165–172. In Rus.
19. Bourdet D. *Well test analysis: the use of advanced interpretation models*. Amsterdam, Elsevier Science, 2002. 426 p.
20. Engler T., Tiab D. Analysis of pressure and pressure derivative without type-curve matching. Horizontal well tests in anisotropic media. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1996, no. 15, pp. 153–168.
21. Ozkan E., Raghavan R., Joshi S.D. Horizontal-well pressure analysis. *Society of Petroleum Engineers*, 2007, no. 16378, pp. 567–575.
22. Lu J., Cunha L.B., Lu T. New solution for well test analysis of horizontal wells. *Society of Petroleum Engineers*, 2002, no. 78972, pp. 1–7.
23. Escobar F.H., Yu-Long Zhao, Urazan C., Trujillo C.M. Pressure and pressure derivative interpretation for horizontal wells in compressible formations. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2018, no. 15, pp. 1551–1560.
24. Kuchuk F.J., Onur M., Hollaender F. *Pressure transient formation and well testing: Convolution, Deconvolution and Nonlinear Estimation*. Amsterdam, Elsevier Science, 2010, 389 p.
25. Pantelev A.V., Letova T.A. *Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh* [Optimization methods in examples and tasks]. St-Petersburg, Lan Publ., 2015. 512 p.

Received: 1 November 2019.

Information about the authors

Viktor L. Sergeev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Dong Van Hoang, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Danil E. Khagay, project manager, Altair company.

Aleksandr V. Ignatenko, director, LLP «Alstrontelecom».

УДК 622.276.53

ДВУХУРОВНЕВЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ШТАНГОВЫХ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

Бахтизин Рамиль Назифович¹,
Ramil_Bahtizin@mail.ru

Уразаков Камил Рахматуллович¹,
Urazakk@mail.ru

Исмагилов Салават Фаритович¹,
salavatf@mail.ru

Давлетшин Филкус Фанизович²,
felix8047@mail.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

² Башкирский государственный университет,
Россия, 450076, г. Уфа, ул. 3. Валиди, 32.

Актуальность. Значительное число крупнейших нефтяных месторождений в России находится на завершающей стадии разработки, характеризующейся снижением объемов добычи, увеличением доли осложненного фонда скважин. Одним из наиболее распространенных способов эксплуатации скважин малодебитного фонда являются штанговые насосные установки. Эксплуатация штанговых установок в осложненных условиях эксплуатации в ряде случаев сопровождается снижением межремонтного периода работы, повышением удельных энергетических и экономических затрат при добыче. В этих условиях одной из наиболее актуальных является задача обеспечения рентабельной разработки скважин за счет своевременной диагностики технического состояния и условий работы насосного оборудования.

Объекты: штанговая насосная установка, работающая в нефтяных добывающих скважинах, в том числе при наличии осложняющих факторов, и устьевая динамограмма работы штанговой установки, отражающая техническое состояние и условия работы внутрискважинного оборудования.

Цель: разработка нового подхода к диагностике состояния штанговых насосных установок по динамограмме, базирующаяся на решении обратных задач динамики штанговой установки.

Методы: методы численного решения уравнений в частных производных для прямых задач, включающих моделирование теоретической динамограммы работы штанговой установки; методы решения обратных задач, направленных на определение параметров модели, характеризующих работу штанговой установки.

Результаты. Разработан двухуровневый метод диагностирования состояния штанговых насосных установок по динамограмме. Предлагаемый метод диагностики включает: на первом уровне обработку практических динамограмм системой распознавания образов и на втором уровне – количественное определение последствий неисправностей решением задачи динамики штанговой установки, исходя из физических законов формирования конфигурации динамограмм. Путем анализа конфигурации динамограмм при эксплуатации насосного оборудования (нормальная работа, высокое содержание газа на приеме насоса, утечки в нагнетательном клапане насоса, низкая посадка плунжера в цилиндре) показаны примеры решения задач количественной диагностики и выдачи рекомендаций по корректировке технологического режима на основе разработанного алгоритма.

Ключевые слова:

Штанговая насосная установка, динамограмма, моделирование динамограмм, диагностика, давление на приеме, осложняющие факторы, количественная оценка.

Введение

Значительная часть добывающих скважин в мире, относящаяся к механизированному фонду, оборудована штанговыми насосными установками (УСШН). Добыча нефти штанговыми насосными установками играет важную роль при эксплуатации малодебитных скважин, число которых по мере истощения запасов крупнейших месторождений растет.

В процессе эксплуатации скважин влияние осложняющих факторов может привести к снижению дебита скважины, межремонтного периода работы, повышению экономических затрат при добыче. Оперативная диагностика осложнений и неисправностей поз-

воляет своевременно избежать ненормального развития событий, выявить потенциальные скважины, работающие в нерентабельной области технологического режима с целью последующего проведения мероприятий по оптимизации режима работы данной группы скважин.

Одним из наиболее распространенных методов диагностики технического состояния и условий работы насосного оборудования является анализ и интерпретация конфигурации устьевой динамограммы. Разработан ряд методов и алгоритмов автоматизированной диагностики УСШН по динамограмме, базирующихся на системах распознавания образов.

На основе данной технологии диагностика внутрискважинного оборудования может рассматриваться как процесс распознавания образов с извлечением признаков, определенных по форме фактической динамограммы, и диагностикой на основе определенной модели. Среди наиболее распространенных методов и подходов, используемых при распознавании образов фактических динамограмм, следует выделить: вейвлетный анализ, анализ частотного спектра динамограмм, анализ отклонения фактической динамограммы от эталонной, выделение релевантных точек динамограммы, анализ признаков динамограмм на базе рядов Фурье [1–6]. Для распознавания образов фактических динамограмм, прогнозирования технического состояния штанговых установок широкое распространение получил метод нейронных сетей. Метод использует базы данных, включающие определенное количество известных классов динамограмм, причем динамограммы с аналогичной конфигурацией сгруппированы в один класс. После настройки на обучающей выборке динамограмм нейронная сеть позволяет определять принадлежность к классам новых, диагностируемых данных. При использовании в качестве обучающей выборки последовательности динамограмм, отражающих динамику изменения нагрузок на полированный шток во времени в процессе эксплуатации определенной скважины, известные методики на базе нейронных сетей позволяют также спрогнозировать конфигурацию последующих во времени динамограмм [7–11].

В настоящее время при разработке систем диагностирования штанговых установок значительный акцент делается на нейросетевом подходе. Следует, однако, отметить, что рассмотренные выше диагностические системы, основанные на методах распознавания образов, в частности нейронные сети, направлены преимущественно на качественную диагностику штанговых установок. С точки зрения повышения информативности результатов диагностики интерес представляет разработка алгоритмов диагностики, базирующихся на математическом моделировании работы штанговых установок. Разработке принципов построения алгоритмов диагностики и прогнозирования технического состояния штанговых установок, основанных на численном и аналитическом решении волнового уравнения, моделировании, посвящены фундаментальные работы американских и советских исследователей: С.Г. Гиббса, А.Б. Неели, А.С. Вирновского [12, 13]. В последнее время усиливается интерес к данному подходу, что отражено в ряде опубликованных работ. Использование фактических динамограмм для расчета конкретных количественных параметров штанговых установок, в частности, эффективного хода плунжера путем пересчета устьевого динамограммы в плунжерную, рассмотрено в работе [14]. Прогнозирование работы плунжера штангового насоса базируется на методе рядов Фурье (FSM – Fourier series method) решения волнового уравнения колебаний штанговой колонны. По величинам перемещения текущего сечения штанговой колонны (смещения) и нагрузки в этом сечении, например, полированного штока, с помощью FSM получают смещение и нагрузку в нижней части штанго-

вой колонны, соответствующей плунжеру насоса. FSM применяется для решения различных задач проектирования и эксплуатации штанговых установок. Моделированию физических процессов при штанговонасосной эксплуатации с учетом конкретных условий рассматриваемого месторождения посвящены работы [15, 16]. Разработка комплексной системы проектирования и автоматического контроля работы системы пласт-скважина–насосная установка, позволяющей оптимизировать процесс эксплуатации и обеспечить максимальную рентабельность добычи нефти, рассмотрена в [17].

Таким образом, математическое моделирование работы штанговых установок в осложненных условиях эксплуатации с детальным учетом физического влияния осложняющих факторов на формирование динамических нагрузок в рассматриваемой системе позволяет осуществлять детальную диагностику технического состояния штанговых установок, включающую не только качественное выявление наличия неисправностей или влияния осложняющих факторов в работе оборудования, но и определение степени их проявления, количественных параметров, характеризующих каждый из осложняющих факторов эксплуатации, а также выработать конкретные количественные рекомендации по оптимизации режима с учетом индивидуальных параметров работы адресной скважины.

Для решения данной задачи и повышения информативности результатов диагностики предлагается двухуровневый метод диагностирования штанговых насосных установок по фактической динамограмме, включающий обработку практических динамограмм системой распознавания образов на первом уровне, и количественную оценку неисправностей исходя из физических законов формирования конфигурации динамограмм решением задачи динамики штанговой установки на втором уровне (рис. 1).

Для реализации предложенного метода разработан алгоритм, включающий в себя следующий комплекс операций:

1. Строится теоретическая динамограмма нормальной работы насоса по геолого-техническим и технологическим параметрам скважины.
2. Путем сопоставления фактической и теоретической динамограмм нормальной работы насоса по экспертной системе, основанной на методе распознавания образов, определяется вероятный тип неисправности.
3. В соответствии с выбранным типом (выбранными типами) неисправности, путем последовательного варьирования коэффициентов (параметров), характеризующих осложнения и неисправности в математической модели, строится теоретическая динамограмма с учетом осложнений/неисправностей, наиболее близкая к фактической, при этом количественно оцениваются причины и факторы, вызывающие осложнения и неисправности.

Построение теоретической динамограммы выполняется с учетом данных инклинометрии, замеров устьевого давления и затрубного давления газа, динамического уровня жидкости.

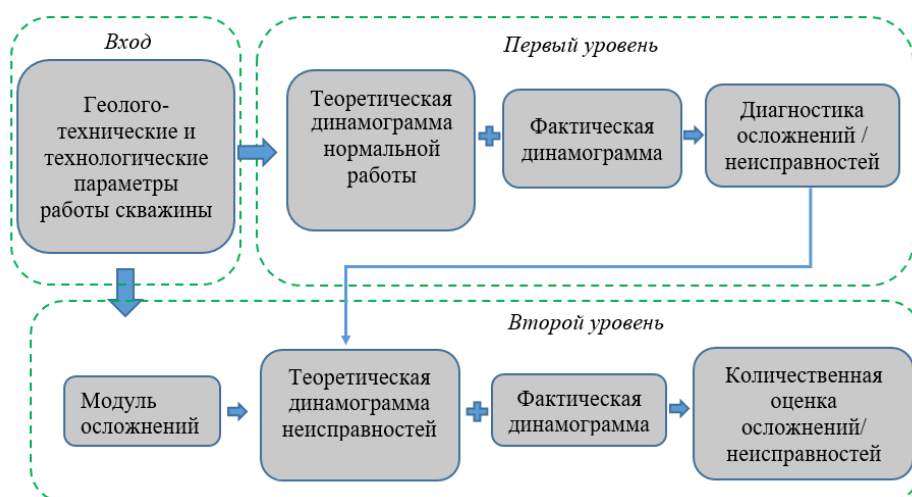


Рис. 1. Общая схема алгоритма диагностики

Fig. 1. General scheme of the diagnostic algorithm

Математическая модель

Моделирование динамических нагрузок, действующих на штанговую колонну и плунжер насоса, основывается на уравнении продольной упругой волны с учетом нагрузок, обусловленных граничным трением колонны штанг о стенки НКТ, вязким трением о жидкость, а также переменного давлением в полости под плунжером [18–20]:

$$\begin{cases} \rho_s S_r \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = ES_r \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) + (\rho_s - \rho_t) S_r g \cos \alpha - \\ - \frac{P \mu_{fg}(\mu) \rho_t}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial t} + w_t \right) \left| \frac{\partial u}{\partial t} + w_t \right| \left(1 + \frac{l_{ekv}}{l_r} \right) - f N \text{sign}(v); \\ u(0, t) = \frac{S}{2} \cos(2\pi n t); \\ ES_r \frac{\partial u}{\partial x}(L, t) = (p_{out} - p_p) S_p - \mu_p \left(1,65 \frac{D_p}{\delta} - 127 \right) \frac{\partial u}{\partial t}(L, t), \end{cases} \quad (1)$$

где $u(x, t)$ – перемещение фиксированной точки колонны штанг; t – время; E – модуль Юнга материала штанг; ρ_s – плотность материала штанг; x – лагранжева координата по длине колонны штанг; ρ_t – плотность смеси в НКТ; g – ускорение свободного падения; α – угол наклона скважины к вертикали в данной точке НКТ; P – периметр штанги; S_r – площадь поперечного сечения штанг; μ_{fg} – переменный коэффициент сопротивления жидкости движению штанг; μ – динамическая вязкость; $w_t(x, t)$ – скорость движения газожидкостной смеси в НКТ; f – коэффициент трения штанг о НКТ; N – удельная прижимающая сила; $\text{sign}(v)$ – функция, определяющая направление силы граничного трения; v – скорость движения штанг в данной точке штанговой колонны; S – длина хода полированного штока; n – число качаний балансира; L – длина штанговой колонны; p_{out} – давление на выкиде насоса; S_p – площадь поперечного сечения плунжера; μ_p – коэффициент трения в плунжерной паре; D_p – диаметр плунжера; δ – зазор между плунжером и цилиндром насоса; p_p – давление в подплунжерной полости насоса; ρ_p – плотность смеси в под-

плунжерной полости насоса; l_r – длина насосной штанги; l_{ekv} – эквивалентная по трению длина насосных штанг. Эквивалентная длина штанги – длина фиктивной штанги, заменяющей по действию сил гидродинамического трения одну штанговую муфту. С помощью данного понятия учитывается сопротивление, оказываемое со стороны жидкости движению штанговых муфт.

В предложенной математической модели осложняющие факторы являются слагаемыми исходной системы уравнений. В частности, силы граничного трения, развиваемые в искривленных и наклонных участках ствола скважины, и вязкого трения, действующие при подъеме продукции скважины с высокой вязкостью, являются распределенными силами в уравнении, описывающем динамику штанговой колонны. Утечки в клапанах насоса приводят к возникновению потоков через клапаны и влияют на скорость изменения давления в подплунжерной полости насоса. Локальное повышение коэффициента граничного трения при заедании или заклинивании плунжера в цилиндре приводит к значительному росту силы граничного трения в плунжерной паре. Относительное положение клетки всасывающего клапана, посадочного корпуса вставного насоса и плунжера определяет возможность возникновения ударов плунжера в цилиндре. Таким образом, осложняющие факторы в математической модели характеризуются комплексом физико-химических (доля газа на приеме насоса, коэффициент граничного трения, вязкость откачиваемой продукции и др.), стереометрических и геометрических (кривизна ствола скважины, положение плунжера относительно цилиндра насоса в процессе его хода, эффективная площадь проходного сечения клапанов насоса или лифтовых труб и др.) параметров [21, 22].

С использованием разработанной математической модели путем численного решения системы (1) проведен расчет теоретических динамограмм для выборки реальных скважин. Апробация модели показала хорошее согласие между фактическими данными и результатами моделирования (рис. 2).

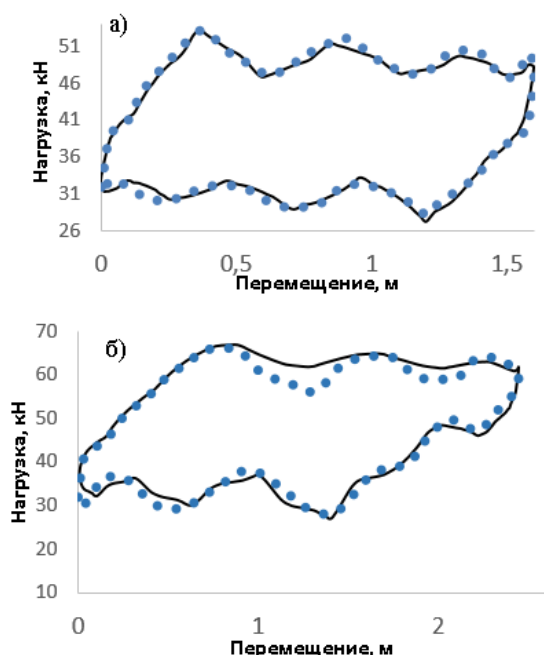


Рис. 2. Фактические и расчетные динамограммы: а) скв. № 88 Культубинского месторождения; б) скв. № 116 Шакинского месторождения (точки – измеренные значения, сплошная линия – расчетная динамограмма)

Fig. 2. Actual and calculated dynamograms: а) well no. 88, Kultyubinskoe field; б) well no. 116, Shakshinskoe field (points – measured values, solid line – calculated dynamogram)

Экспертная система диагностики состояния штанговых установок

Экспертная система предназначена для программно-алгоритмизированного диагностирования типа неисправности в работе штанговой установки по известным параметрам реальной скважины и фактической динамограмме. На первом этапе определены 13 классов осложнений и неисправностей, включающих нормальную работу насоса и работу насоса с влиянием осложняющих факторов, обуславливающих изменение конфигурации динамограмм. Распознавание образов фактических динамограмм базируется на применении

диагностирующих признаков, характеризующих конфигурацию фактических динамограмм на различных участках. Для теоретической динамограммы используется обозначение АБВГ, где линия АВ соответствует линии восприятия штангами веса жидкости в насосно-компрессорных трубах, линия ВГ – линия разгрузки насосных штанг. Диагностические признаки:

1. Фактическая динамограмма расположена ниже линии БВ теоретической динамограммы
2. Существование площади над линией АГ теоретической динамограммы, которая больше площади под линией АГ.
3. «Всплеск» нагрузок в правой верхней части динамограммы.
4. Смещение точек фактической динамограммы в конце линии разгрузки насосных штанг.
5. Смещение точек фактической динамограммы в конце линии восприятия нагрузки насосными штангами.
6. Минимальная нагрузка по фактической динамограмме значительно меньше нагрузок по теоретической динамограмме.
7. Смещение точек фактической динамограммы относительно линии разгрузки штанг теоретической динамограммы.
8. Наличие петли в конце хода вверх.
9. Наличие петли в конце хода вниз.
10. Характерная конфигурация линии разгрузки штанг «пистолет».
11. «Всплеск» нагрузок в левой нижней части динамограммы.
12. «Закругление» формы динамограммы.
13. Длина линии нагрузки насосных штанг значительно превышает длину линии разгрузки.
14. Длина линии разгрузки насосных штанг значительно превышает длину линии восприятия нагрузки.

Наличие вышеперечисленных признаков у эталонных динамограмм, каждая из которых характеризует свой вид неисправности, приведена в таблице (1 – признак имеет место, 0 – признак отсутствует, «–» – признак не характерен).

Таблица. Классификация динамограмм по характерным признакам

Table. Characterization of dynamograms

Признак/тип неисправности/Features/fault type	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Нормальная работа насоса/Normal operation of the pump	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Срыв подачи от утечки в нагнетательном клапане Leakage in the traveling-valve, loss of feed pump	1	1	0	0	1	–	0	0	0	0	0	0	0	0
Обрыв штанг или отворот плунжера/Rod break or plunger lapel	1	0	–	0	1	–	–	0	0	0	0	0	0	0
Высокая посадка плунжера/Pump hitting up, spaced too high	0	–	1	1	–	0	1	0	0	1	0	0	0	0
Зазедание плунжера в конце хода вверх/Jamming of the plunger at the top	0	–	1	–	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Заклинивание плунжера/Jamming of the plunger	0	0	–	1	1	1	–	0	0	1	0	0	0	0
Прихват плунжера/Sticking of the plunger	0	–	–	1	1	–	–	0	1	–	0	0	0	0
Низкая посадка плунжера/Pump hitting down/spaced too low	0	–	0	0	–	–	–	0	1	0	1	0	0	0
Влияние газа на приеме насоса/Heavy gas interference	0	–	0	1	0	–	–	0	0	1	0	0	0	1
Зазедание плунжера в конце хода вниз/Jamming of the plunger at the down	0	–	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Высокая вязкость откачиваемой продукции High viscosity of the pumped product	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
Утечки в нагнетательной части насоса/Traveling-valve leak	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Утечки в приемной части насоса/Standing-valve leak	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

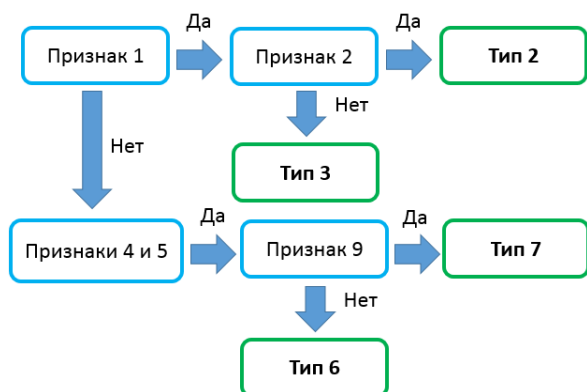


Рис. 3. Блок-схема 1 алгоритма распознавания
Fig. 3. Block-diagram 1 of recognition algorithm

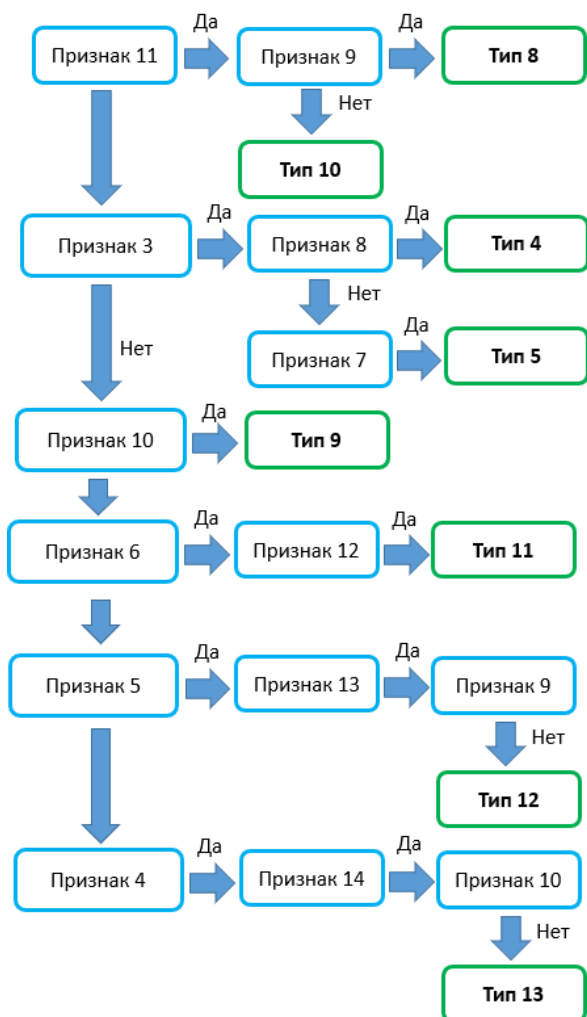


Рис. 3. Блок-схема 2 алгоритма распознавания
Fig. 3. Block-diagram 2 of recognition algorithm

Блок-схем алгоритма распознавания представлена на рис. 3, 4. На первом этапе проводится оценка признаков в рамках первой части блок-схемы (рис. 3) для диагностики осложнений и неисправностей в работе штанговой установки, определяющих формирование конфигурации динамограммы практически на всех ее участках: обрыв штанг/отворот плунжера, срыв подачи от утечек в нагнетательной части, заклинивание и

заедание плунжера. Далее выполняется оценка признаков для диагностики осложнений и неисправностей, определяющих конфигурацию определенного участка динамограммы (рис. 4). Анализ различных участков динамограммы путем последовательной оценки признаков 3–6, 11 позволяет выявить несколько осложнений и неисправностей, вносящих вклад в конфигурацию динамограммы на определенном ее участке.

Диагностика степени проявления осложняющих факторов по динамограмме

На втором уровне диагностической системы осуществляется количественная оценка осложнений и неисправностей исходя из физических законов формирования конфигурации динамограмм путём решения задачи динамики штанговой установки. Приближение теоретической динамограммы к фактической достигается варьированием числовых значений коэффициентов (параметров), характеризующих типы неисправностей, выявленных на первом уровне экспертной системой.

Принципы количественной диагностики состояния штанговой установки рассматриваются на примере осложнений «влияние газа на приеме» и «утечки в клапанах». Оба класса осложнений оказывают влияние на динамику изменения давления в подплунжерной полости насоса, а значит, определяют и изменение дифференциальной нагрузки на плунжер насоса в процессе его хода, что отражается в конфигурации устьевой динамограммы.

Влияние газа на динамограмму в значительной степени зависит от особенностей протекания процессов в подплунжерной полости насоса при откачке многофазной смеси. При расчете динамики давления в подплунжерной полости с учетом влияния газа существует два предельных случая: при значительной скорости всплытия газовых пузырьков в нефти, когда газовая фаза успевает отделиться от нефтяной, растворением газа в нефти можно пренебречь, и изменение давления будет характеризоваться сжатием и расширением газа в полости насоса. При этом динамика давления в подплунжерной полости будет определяться, прежде всего, долей газа на приеме насоса и объемом вредного пространства насоса:

$$\frac{dp_p}{dt} = -\frac{\rho_g}{V_g} \left(\frac{d\rho_g}{dp} \right)^{-1} \times \left(\frac{V_l}{V_p} \frac{dV_p}{dt} - \sqrt{2}(1-\alpha_{in})\lambda_{in}\delta_{in} \frac{p_{in}-p_p}{\sqrt{\rho_l|p_{in}-p_p|}} - \sqrt{2}(1-\alpha_{out})\lambda_{out}\delta_{out} \frac{p_{out}-p_p}{\sqrt{\rho_l|p_{out}-p_p|}} \right), \quad (2)$$

где ρ_g , V_g – плотность и объем свободного газа в подплунжерной полости насоса в предположении, что газ не растворяется/выделяется из жидкости; α_{in} – доля газа на приеме насоса; ρ_l , V_l – плотность и объем жидкости соответственно; p_{in} – давление на приеме

насоса; V_p – объем подплунжерной полости насоса; λ – коэффициент расхода, индекс in соответствует всасывающему клапану, индекс out – нагнетательному; δ – площадь проходного сечения клапана, индекс in соответствует всасывающему клапану, индекс out – нагнетательному.

При небольшой скорости всплытия пузырьков газа, при которой пузырьки газа равномерно распределяются в нефти, будут наблюдаться равновесные процессы выделения и растворения газа в нефти и изменение во времени давления в полости насоса будет также определяться растворимостью газа в нефти

$$\frac{dp_p}{dt} = \frac{1}{V_p} \left(\sqrt{2\rho_p \lambda_{in}} \frac{P_{in} - P_p}{\sqrt{P_{in} - P_p}} k_{in} \delta_{in} + \sqrt{2\rho_p \lambda_{out}} \frac{P_p - P_{out}}{\sqrt{P_p - P_{out}}} k_{out} \delta_{out} + \rho_p(t) \frac{dV_p}{dt} \right) \left(\frac{d\rho_p}{dp} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где ρ_p – плотность смеси в подплунжерной полости насоса; $k \in [0;1]$ – коэффициент, определяющий степень открытия клапанов насоса.

Фактическая и расчетные динамограммы работы штангового насоса, полученные путем численного решения системы уравнений (1)–(3), представлены на рис. 5.

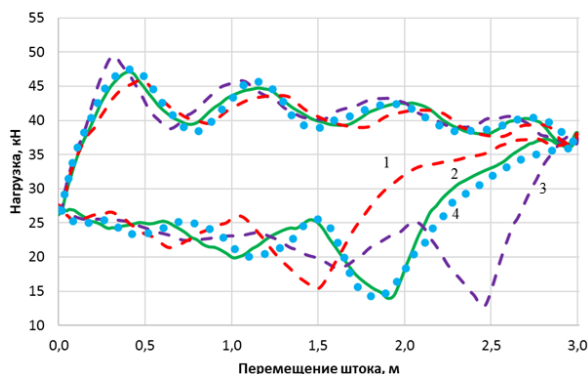


Рис. 5. Динамограммы работы штангового насоса с учетом влияния газа (штриховая линия 1 – модельная динамограмма при $\alpha_{in}=0,45$, сплошная линия 2 – модельная динамограмма при $\alpha_{in}=0,25$, штриховая линия 3 – модельная динамограмма при $\alpha_{in}=0,05$, точки 4 – фактическая динамограмма)

Fig. 5. Dynamometer cards of the pump operation, taking into account the influence of gas (dashed line 1 – model dynamometer card with $\alpha_{in}=0,45$, solid line 2 – model dynamometer card with $\alpha_{in}=0,25$, dashed line 3 – model dynamometer card with $\alpha_{in}=0,05$, points 4 – actual dynamometer card)

Из графиков на рис. 5 следует, что за счет сжимаемости газа по мере возрастания газосодержания в продукции скважины увеличивается длина линии снятия нагрузки и повышается ее наклон. При малой величине объемного содержания газа на приеме длина линии снятия нагрузки минимальна и практически

соответствует линии разгрузки, обусловленной статической деформацией штанговой колонны (кривая 3, рис. 5), при значительном газо-содержании (кривая 1, рис. 5) скорость роста давления в подплунжерной полости существенно снижается, и нагрузка на головку балансира также снижается значительно более медленно.

При наличии нескольких осложняющих факторов, каждый из которых оказывает влияние на формирование динамических нагрузок в штанговой колонне, результирующая конфигурация динамограммы определяется совместным действием факторов. Рассмотрим одновременное наложение осложнений «утечки в нагнетательном клапане» и «влияние газа» на конфигурацию устьевого динамограммы (рис. 6).

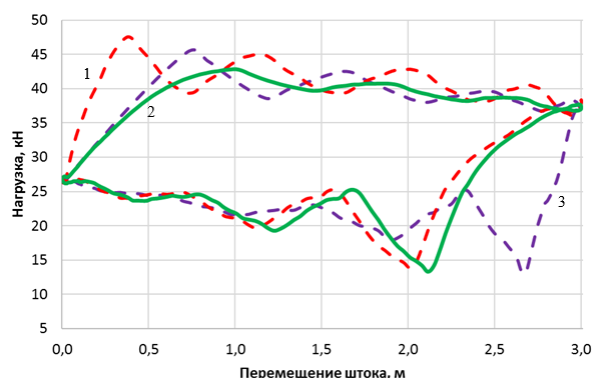


Рис. 6. Конфигурация динамограммы при одновременном наложении осложнений «утечки в нагнетательном клапане» и «влияние газа» (1 – влияние газа, 2 – совместное влияние осложнений, 3 – утечки в нагнетательном клапане)

Fig. 6. Configuration of the dynamometer card with simultaneous imposition of complications «leakage in the discharge valve» and «gas effect» (1 – gas influence, 2 – the combined effect of complications, 3 – leakage in the discharge valve)

Утечки в нагнетательном клапане (кривая 3, рис. 6) оказывают влияние главным образом на конфигурацию линии восприятия нагрузки на динамограмме и характеризуются увеличенным наклоном динамограммы в начале хода плунжера вверх, обусловленным оттоком откачиваемой смеси из колонны лифтовых труб в подплунжерную полость, приводящим к снижению темпов изменения давления в подплунжерной полости. Напротив, влияние газа (кривая 1, рис. 6) приводит к изменению конфигурации линии снятия нагрузки и отражается в увеличении наклона кривой при ходе вниз за счет высокой сжимаемости газа. При одновременном действии этих осложнений устьева динамограмма характеризуется увеличенным наклоном как линии снятия, так и линии восприятия нагрузки (кривая 2, рис. 6). Поскольку каждое из рассматриваемых осложнений вносит вклад в конфигурацию динамограммы на определенном участке, количественная диагностика по динамограмме позволяет одновременно рассчитать параметры, характеризующие оба осложнения, в частности, долю газа на приеме насоса, потери подачи насоса за счет сжатия

газа в подплунжерной полости, объемный расход смеси через нагнетательный клапан в ходе утечки (дебит утечек). Полученная информация является основой для принятия решений и рекомендаций по последующей оптимизации режима работы штанговой установки, включающей: изменение скорости откачки при превышении максимального допустимого объемного содержания газа на приеме насоса и существенной потере подачи за счет влияния газа; промывку скважины или подъем насоса при чрезмерной величине потери подачи насоса за счет утечек в нагнетательной части насоса и др.

Значительный интерес представляет расчет эффективной вязкости смеси в стволе скважины при высокой вязкости откачиваемой продукции. Под эффективной вязкостью понимается осредненная по стволу скважины величина вязкости, значение которой можно использовать для адекватного учета сил вязкого трения при проектировании технологического режима штанговых установок. На рис. 7 приведен расчет нагрузок на полированный шток при различной величине эффективной вязкости откачиваемой продукции. Из рисунка видно, что при прочих равных условиях с увеличением вязкости происходит увеличение максимальной и снижение минимальной нагрузки на полированный шток, при этом наблюдается «закругление» формы динамограммы, характеризующее плавным изменением нагрузок в процессе хода полированного штока.

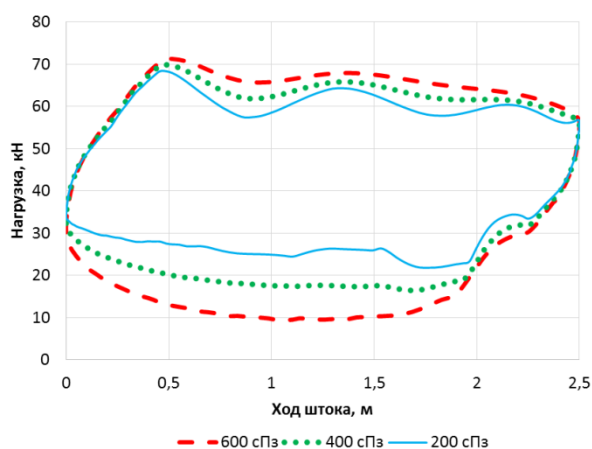


Рис. 7. Динамические нагрузки в точке подвески штанговой колонны при высокой вязкости откачиваемой продукции (сплошная линия соответствует эффективной вязкости $\mu_0=200$ сПз, точечная – $\mu_0=400$ сПз, штриховая линия – $\mu_0=600$ сПз)

Fig. 7. Dynamic loads at the point of suspension of the rod column at high viscosity of the pumped product (solid line corresponds to effective viscosity 200 sPz, scatter – 400 sPz, dashed line – 600 sPz)

Оптимизация технологического режима штанговой установки

Разработка конкретных количественных рекомендаций по оптимизации режима работы штанговой установки рассматривается на примере осложнений в работе штангового насоса, связанных с возникновением ударов плунжера в цилиндре о клетку всасывающего

клапана в конце хода плунжера вниз при низкой посадке плунжера.

Дополнительное растяжение штанг в конце хода вниз, обусловленное динамическими составляющими нагрузок на штанговую колонну, может привести к возникновению ударов плунжера о клетку всасывающего клапана. При посадке плунжера на клетку клапана происходит передача части веса штанговой колонны насосно-компрессорным трубам, в результате нагрузка на головку балансира снижается (рис. 8).

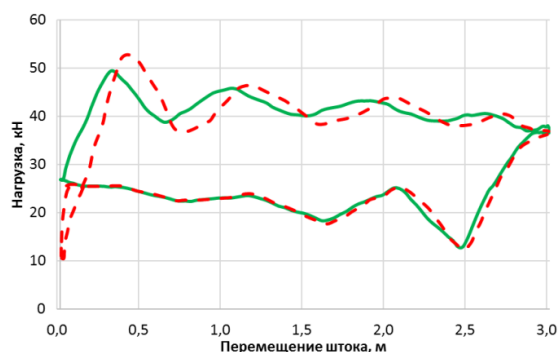


Рис. 8. Моделирование работы насоса при низкой посадке (штриховая линия – динамограмма при наличии удара плунжера о клетку всасывающего клапана в конце хода вниз, сплошная – после корректировки подвески плунжера)

Fig. 8. Simulation of pump operation at a low fit (dashed line – dynamogram with pump hitting down at spaced too low, solid line – after adjusting the plunger suspension)

Моделирование удара плунжера осуществляется с учетом геометрии цилиндра насоса, а именно, месторасположения клетки всасывающего клапана. Удар возникает при условии, что перемещение плунжера в цилиндре превышает величину, соответствующую глубине расположения клетки клапана. Разгрузка штанговой колонны балансира моделируется в соответствии с законом Гука – в конце хода вниз перемещение головки балансира опережает перемещение плунжера, за счет чего штанги сокращаются, сила упругого растяжения штанг снижается, обуславливая снижение нагрузок на головку балансира. В рамках разработанного алгоритма количественная диагностика для данной задачи сводится к расчету теоретических динамограмм, моделирующих удар плунжера о клетку всасывающего клапана, и их приближения к фактической динамограмме, посредством чего определяется параметр, соответствующий величине расстояния, проходимой полированным штоком после удара плунжера. Корректировка подвески плунжера на величину найденной поправки позволяет исключить в последующем удары плунжера в цилиндре насоса. На модельном примере (рис. 8) показано, как корректировкой глубины подвески плунжера в цилиндре насоса возможно устранение удара плунжера о клетку всасывающего клапана, позволяющего значительно повысить надежность и ресурс работы штангового насоса и его клапанов, а также увеличить эффективный ход плунжера в цилиндре.

Выводы

1. Разработан двухуровневый метод диагностирования состояния скважинных насосных установок: а) на первом уровне экспертной системой, основанной на методе распознавания образов, выявляются неисправности в работе скважинной насосной установки, отраженные на фактической динамограмме, и в соответствии с выявленными характерными признаками относятся к определенному классу неисправности. Характерные по конфигурации динамограммы ранжированы на 13 классов, включая нормальную работу насоса и работу насоса с осложнениями, вызывающими изменение формы динамограмм; б) на втором шаге осуществляется количественная оценка осложнений и неисправностей, путем итеративного расчета теоретических динамограмм, соответствующих классу, определенному на первом этапе, и их приближения к фактической динамограмме. Числен-

ное приближение теоретической динамограммы к фактической достигается варьированием числовых значений коэффициентов (параметров), характеризующих осложнения и неисправности в математической модели.

2. Разработан метод диагностики, позволяющий количественно оценивать следующие физические параметры, характеризующие степень проявления осложнений в работе УСНН: газосодержание на приеме насоса; эффективная динамическая вязкость смеси; доля подачи насоса, теряемая вследствие утечек; часть хода полированного штока, происходящая с ударом плунжера. Полученные результаты могут быть в одних случаях использованы для корректировки существующего технологического режима, а в других – для адекватного подбора типоразмера насосного оборудования и расчета планируемого режима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Robust technology and system for management of sucker rod pumping units in oil wells / T.A. Aliev, A.H. Rzayev, G.A. Guluyev, T.A. Alizada, N.E. Rzayeva // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2018. – V. 99. – P. 47–56.
2. Boyuan Zh., Xianwen G. Sucker rod pumping diagnosis using valve working position and parameter optimal continuous hidden Markov model // *Journal of Process Control*. – 2017. – V. 59. – P. 1–12.
3. Диагностирование глубинно-насосных скважин динамометрированием / Г.Г. Гилаев, Б.В. Ефименко, Л.С. Гончарова, В.С. Исупов. – Ижевск: ООО «ПА «Парацельс», 2008. – 212 с.
4. Садов В.Б. Подход к определению установок скважинных штанговых установок по динамограмме // *Нефтяное хозяйство*. – 2016. – № 2. – С. 90–93.
5. A new approach to diagnosis of sucker rod pump systems by analyzing segments of downhole dynamometer cards / D.R. Galdier Jr., L. Schnitman, R. Reis, F. Mota // *SPE (Society of Petroleum Engineers) – 173964, SPE Artificial Lift Conference*. – Latin America and Caribbean held in Salvador, Bahia, Brazil, 27–28 May 2015. – P. 1–13.
6. Ковшов В.Д., Сидоров М.Е., Светлакова С.В. Динамометрирование, моделирование и диагностирование состояния глубинной штанговой насосной установки // *Известия вузов. Нефть и газ*. – 2011. – № 3. – С. 25–29.
7. Li K., Han Y., Wang T. A novel prediction method for down-hole working conditions of the beam pumping unit based on 8-directions chain codes and online sequential extreme learning machine // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – V. 160. – P. 285–301.
8. Сибгатуллин Р.Р., Майский Р.А. Обобщенный алгоритм диагностики работы штанговых установок // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2017. – № 3. – С. 69–77.
9. Кузьмин А.Н., Вялых И.А. Прогнозирование технического состояния штанговых глубинных насосов на основе нейросетевых технологий // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология*. – 2016. – № 3. – С. 9–19.
10. Using the curve moment and the PSO-SVM method to diagnose downhole conditions of a sucker rod pumping unit / K. Li, G. Xianwen, T. Zhongda, Q. Zhixue // *Petroleum Science*. – 2013. – V. 10. – P. 73–80.
11. Fault diagnosis for down-hole conditions of sucker rod pumping systems based on the FBH-SC method / K. Li, X.W. Gao, H.B. Zhou, Y. Han // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2015. – V. 12. – P. 135–147.
12. Вирновский А.С. Теория и практика глубинно-насосной добычи нефти. – М.: Недра, 1971. – 183 с.
13. Gibbs S.G., Neely A.B. Computer diagnosis of down-hole conditions in sucker rod pumping wells // *Journal of Petroleum Technology*. – 1966. – V. 1. – P. 93–98.
14. Chen Z., White L.W., Zhang H. Predicting sucker-rod pumping systems with Fourier series // *SPE (Society of Petroleum Engineers) Production & Operations*. – 2018. – V. 33. – P. 928–940.
15. Deep well lifting new solution in Tarim oilfield / R. Zhao, Y. Peng, Q. Li, J. Shi et al. // *SPE (Society of Petroleum Engineers) – 192494, SPE Middle East Artificial Lift Conference and Exhibition*. – Manama, Bahrain, 28–29 November 2018. – P. 1–14.
16. Li-Ming L., Hua Zh. Application and effect of buoyancy on sucker rod string dynamics // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2016. – V. 146. – P. 264–271.
17. Model predictive automatic control of sucker rod pump system with simulation case study / B. Hansen, B. Tolbert, C. Vernon, J.D. Hedengren // *Computers and Chemical Engineering*. – 2019. – V. 121. – P. 265–284.
18. Dynamic model of a Rod Pump Installation for inclined wells / R.N. Bakhtizin, K.R. Urazakov, S.F. Ismagilov, A.S. Topol'nikov, F.F. Davletshin // *SOCAR Proceedings*. – 2017. – № 4. – P. 74–82.
19. Расчет теоретической динамограммы с учетом осложнений в работе скважинного штангового насоса / К.Р. Уразак, Р.Н. Бахтизин, С.Ф. Исмагилов, А.С. Топольников // *Нефтяное хозяйство*. – 2014. – № 1. – С. 90–93.
20. Brill J.P., Mukherjee H. Multiphase flow in wells. – Richardson, Texas: Society of petroleum engineers, 1999. – 384 p.
21. Уразак К.Р., Белов А.Е., Давлетшин Ф.Ф. Динамическая модель штанговой насосной установки при одновременно-раздельной эксплуатации // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2018. – № 3. – С. 33–41.
22. Методика расчета подвески плунжера в цилиндре насоса / Р.Н. Бахтизин, К.Р. Уразак, Р.И. Бакиров, И.Р. Баширов, А.В. Киселев и др. // *Нефтяное хозяйство*. – 2018. – № 2. – С. 84–88.

Поступила 24.01.2020 г.

Информация об авторах

Бахтизин Р.Н., доктор физико-математических наук, профессор, ректор Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Уразаков К.Р., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Исмагилов С.Ф., аспирант кафедры разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Давлетишин Ф.Ф., аспирант кафедры геофизики Физико-технического института Башкирского государственного университета.

UDC 622.276.53

TWO-LEVEL METHOD FOR DIAGNOSING TECHNICAL CONDITION OF SUCKER-ROD PUMPING UNITS

Ramil N. Bakhtizin¹,
Ramil_Bahtizin@mail.ru

Kamil R. Urazakov¹,
Urazakk@mail.ru

Salavat F. Ismagilov¹,
salavatf@mail.ru

Filyus F. Davletshin²,
felix8047@mail.ru

¹ Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

² Bashkir State University,
32, Validi street, Ufa, 450076, Russia.

Relevance. A significant number of the largest oil fields in Russia are in the final stages of development, characterized by a decrease in production volumes, increase in the share of complicated wells. Sucker-rod pump units are one of the most common methods of operating wells short-term production fund. The operation of rod pump installations in complicated operating conditions in some cases is accompanied by decrease in the turnaround time of work, increase in the specific energy and economic costs during production. In these conditions, one of the most urgent task is ensuring the cost-effective development of wells due to the timely diagnosis of the technical condition and operating conditions of pumping equipment.

Objects: pumping unit operating in various operating conditions, including in the presence of complicating factors, and a wellhead dynamometer card of operation of the rig, reflecting technical condition and operating conditions of the downhole equipment.

The aim of the research is to develop a new approach to diagnosing the state of rod pumping units using a dynamometer card, based on solving inverse problems of the dynamics of a rod installation.

Methods: methods for numerical solution of partial differential equations for direct problems, including modeling the theoretical dynamometer cards of the rod installation; methods for solving inverse problems aimed at quantifying the parameters of the model characterizing the operation of the rod installation

Results. The authors have developed two-tier method for diagnosing the state of pumping units using a dynamometer card. The proposed diagnostic method includes: at the first level, the processing of practical dynamometer cards by the pattern recognition system and, at the second level, a quantitative determination of the consequences of faults, based on the physical laws of formation of configuration of dynamometer cards, the solution of the problem of the dynamics of a rod installation. By analyzing the configuration of dynamometer cards under various operating conditions of pumping equipment (normal operation, high gas content at the pump intake, leakage in the pump discharge valve, low plunger fit in the cylinder), the examples of solving quantitative diagnostics problems based on the developed algorithm are shown.

Key words:

Rod pump installations, dynamometer card, modeling of dynamometer card, diagnostics, intake pressure, complicating factors, quantitative assessment.

REFERENCES

1. Aliev T.A., Rzayev A.H., Guluyev G.A., Alizada T.A., Rzayeva N.E. Robust technology and system for management of sucker rod pumping units in oil wells. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, vol. 99, pp. 47–56.
2. Boyuan Zh., Xianwen G. Sucker rod pumping diagnosis using valve working position and parameter optimal continuous hidden Markov model. *Journal of Process Control*, 2017, vol. 59, pp. 1–12.
3. Gilaev G.G., Efimenko B.V., Goncharova L.S., Isupov V.S. *Diagnostirovanie glubinnno-nasosnykh skvazhin dinamometrirovaniem* [Diagnostics of deep-well wells with dynamometer]. Izhevsk, Paracelsus RA LLC Publ., 2008. 212 p.
4. Sadov V.B. The approach to the definition of the installation of downhole rod pump installations by a dynamogram. *Oil industry*, 2016, no. 2, pp. 90–93. In Rus.
5. Galdir D., Reges Jr., Schnitman L., Reis R., Mota F. A new approach to diagnosis of sucker rod pump systems by analyzing segments of downhole dynamometer cards. *SPE (Society of Petroleum Engineers)* – 173964, SPE Artificial Lift Conference. Salvador, Bahia, Brazil, 27–28 May 2015. pp. 1–13.
6. Kovshov V.D., Sidorov M.E., Svetlakova S.V. Dynamometer, modeling and diagnostics of the state of a deep rod pumping unit. *Izvestiya vuzov. Oil and gas*, 2011, no. 3, pp. 25–29. In Rus.
7. Li K., Han Y., Wang T. A novel prediction method for down-hole working conditions of the beam pumping unit based on 8-directions chain codes and online sequential extreme learning machine. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 160, pp. 285–301.
8. Sibgatullin R.R., Maysky R.A. Generalized algorithm for diagnosing the operation of shtangovy installations. *Problems of collection, preparation and transport of oil and petroleum products*, 2017, no. 3, pp. 69–77. In Rus.
9. Kuzmin A.N., Vyalykh I.A. Prediction of the technical condition of sucker rod pumps based on neural network technology. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Chemical technology and biotechnology*, 2016, no. 3, pp. 9–19. In Rus.

10. Li K., Xianwen G., Zhongda T., Zhixue Q. Using the curve moment and the Pso-Svm method to diagnose downhole conditions of a sucker rod pumping unit. *Petroleum Science*, 2013, vol. 10, pp. 73–80.
11. Li K., Gao X.W., Zhou H.B., Han Y. Fault diagnosis for downhole conditions of sucker rod pumping systems based on the FBH-SC method. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, vol. 12, pp. 135–147.
12. Virnovsky A.S. *Teoriya i praktika glubinno-nasosnoi dobychi nefi* [Theory and practice of downhole oil production]. Moscow, Nedra Publ., 1971. 183 p.
13. Gibbs S.G., Neely A.B. Computer diagnosis of down-hole conditions in sucker rod pumping wells. *Journal of Petroleum Technology*, 1966, vol. 1, pp. 93–98.
14. Chen Z., White L.W., Zhang H. Predicting sucker-rod pumping systems with Fourier series. *SPE (Society of Petroleum Engineers) Production & Operations*, 2018, vol. 33, pp. 928–940.
15. Zhao R., Peng, Y., Li Q., Shi J. Deep well lifting new solution in Tarim oilfield. *SPE (Society of Petroleum Engineers) – 192494, SPE Middle East Artificial Lift Conference and Exhibition*. Bahrain, 28–29 November 2018, pp. 1–14.
16. Li-Ming L., Hua Zh. Application and effect of buoyancy on sucker rod string dynamics. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, vol. 146, pp. 264–271.
17. Hansen B., Tolbert B., Vernon C., Hedengren J.D. Model predictive automatic control of sucker rod pump system with simulation case study. *Computers and Chemical Engineering*, 2019, vol. 121, pp. 265–284.
18. Bakhtizin R.N., Urazakov K.R., Ismagilov S.F., Topol'nikov A.S., Davletshin F.F. Dynamic model of a Rod Pump Installation for inclined wells. *Socar Proceedings*, 2017, no. 4, pp. 74–82.
19. Urazakov K.R., Bakhtizin R.N., Ismagilov S.F., Topolnikov A.S. Calculation of theoretical dynamograms taking into account complications in the operation of a well pumping pump. *Oil Industry*, 2014, no. 1, pp. 90–93. In Rus.
20. Brill J.P., Mukherjee H. *Multiphase flow in wells*. Richardson, Texas, Society of petroleum engineers, 1999. 384 p.
21. Urazakov K.R., Belov A.E., Davletshin F.F. Dynamic model of a rod pump installation for dual completion. *Problems of collecting, preparing and transporting oil and oil products*, 2018, no. 3, pp. 33–41. In Rus.
22. Bakhtizin R.N., Urazakov K.R., Bakirov R.I., Bashirov I.R., Kiselev A.V. et al. Method for calculating the plunger hanger in the cylinder of the sucker-rod pump. *Oil Industry*, 2018, no. 2, pp. 84–88. In Rus.

Received: 24 January 2020.

Information about the authors

Ramil N. Bakhtizin, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Kamil R. Urazakov, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Salavat F. Ismagilov, post-graduate student, Ufa State Petroleum Technological University.

Filyus F. Davletshin, post-graduate student, Bashkir State University.

УДК 550.4.02

МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ВОДНЫХ ЭКСТРАКТОВ НЕКОТОРЫХ ОБРАЗЦОВ ДИАТОМИТОВ И ЛИДИТОВ КАРЕЛИИ

Феоктистов Владимир Михайлович¹,
feoktistov@petrsu.ru

Медведев Павел Владимирович^{1,2},
pmedved@krc.karelia.ru

¹ Петрозаводский государственный университет,
Россия, Республика Карелия, 185910, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33.

² Карельский научный центр РАН,
Россия, Республика Карелия, 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью получения достоверной информации об элементном составе водных экстрактов диатомитов и лидитов. В настоящее время диатомиты используются в различных отраслях промышленности, в том числе медицинской и фармацевтической. Однако детального изучения состава их водных экстрактов практически не проводилось.

Цель: изучить микроэлементный состав водных экстрактов нескольких образцов диатомитов и лидитов.

Объекты: три образца диатомитов и два образца лидитов территории Республики Карелия.

Методика: лабораторный эксперимент, водная экстракция, масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ICP MS).

Результаты. Изучен элементный состав водных экстрактов нескольких образцов диатомитов и лидитов территории Республики Карелия методом ICP MS. Во всех исследованных экстрактах образцов диатомитов и лидитов преобладающими элементами являются Mg, Na, Ca, K и Al (до нескольких тысяч мкг/л). Экстракты образцов диатомитов имеют однородный состав. Максимальные содержания в них других, наиболее значимых, элементов составляли: P – до 650, Fe – до 1700 (образец № 1) и Mn – до 3300 (образец № 3) мкг/л. Концентрации в диапазоне от 10 до 100 мкг/л характерны для ряда элементов (Li, B, Ti, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Y, Zr и Ba) в экстрактах всех образцов диатомитов. Экстракты образцов диатомитов № 1 и 2 имели максимальные концентрации легких редкоземельных элементов (РЗЗ): Nd (до 247), Ce (до 230), La (до 156 мкг/л). Химический состав экстрактов образцов лидитов заметно отличался, как между собой, так и от экстрактов диатомитов. Кислая среда (рН 4,5–4,6) экстракта образца № 4 способствовала накоплению ряда элементов: Ni, Sr, Be, Mn, U, Tl, и особенно V, Co, Cu, Zn, Y, Ba. В то же время в экстракте образца № 5 в слабощелочных условиях (рН 7,4–7,5) наблюдались максимальные концентрации Mo, W, Zr, Hf. В исследованных экстрактах образцов диатомитов и лидита № 4 концентрации Al, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn превышали значения предельно допустимых концентраций (ПДК) рыбохозяйственных водоемов. Водные экстракты образцов диатомитов показали значительное содержание элементов, которые могут оказать влияние на формирование состава маломинерализованных карельских вод. При этом содержание ряда полезных для развития растений микроэлементов (Ca, Mg, K, P, Cu, Zn, V, Mn, Sr, Y, Zr) предполагает возможность их использования как «мягких» удобрений (или добавок к минеральным удобрениям).

Ключевые слова:

Диатомит, лидит, микроэлементный состав, водные экстракты, Карелия, палеопротерозой, голоцен.

Введение

Диатомиты находят широкое применение в разных промышленных сферах как в России [1, 2], так и за рубежом [3, 4]. Например, производство фильтровальных порошков, красок и лаков, высококачественной бумаги, тонких абразивов, высокопрочной резины. Также диатомиты можно использовать в медицинской, фармакологической и пищевой промышленности как полезные композитные и нанокомпозитные материалы, биостимуляторы, адсорбенты, кондиционные добавки [5–10].

Диатомиты Карелии достаточно хорошо изучены геологически [1]. Эти озерные отложения голоценового возраста в основном состоят из опаловых скелетов одноклеточных диатомовых водорослей. В озёрах диатомиты залегают на глубине до 7 м, образуя слои мощностью 2–4 м. Ещё в 30-х гг. прошлого века были проведены технологические испытания карельских диатомитов, показавшие их высокое качество [11, 12].

Химический состав диатомитов определяется массовой долей оксидов основных элементов (Si, Al, Fe, Ca, Na, K и P₂O₅), измеренной после прокаливании. В природных диатомитах содержание кремнезёма составляет от 50 до 70 %. Количество оксидов кальция, натрия и калия около 1 %, фосфора – 0,2 %. Содержание оксидов алюминия и железа колеблется от 0,8 до 12, а органики – от 0,17 до 45 %. По химическому составу диатомиты Карелии сходны с диатомитами Кольского полуострова и Финляндии [13], а от диатомитов Ленинградской области отличаются отсутствием примеси песка [1].

Известно также, что биогенный кремнезём осадочных пород содержит большое количество аморфного кремнезёма (в диатомитах – до 95 % [14]), который, обладая достаточно высокой растворимостью, может участвовать в формировании состава природных вод [15].

Лидиты Карелии относятся к хемогенным породам, образовавшимся в морской воде приблизительно

2 млрд лет назад [16, 17]. Они представляют интерес для промышленности как огнеупорный материал, причем без предварительной подготовки, а также как возможная основа для получения катализаторов [18]. Это черные матовые афанитового сложения кремнистые породы с характерным раковистым изломом. Твердость лидитов около 7 единиц по шкале Мооса, удельный вес $2,65 \text{ г/см}^3$. Они состоят в основном из кварца и углерода, в виде шунгитового вещества, в небольшом количестве присутствует серицит (таблица) [19]. Лидиты образовались из гелеподобных, водонасыщенных осадков, что подтверждается мелкогустковой структурой, характерной для опок и фтанитоидов [20].

Таблица. Химический состав лидитов, п. Шуньга, Республика Карелия, масс. %

Table. Chemical composition of lydites, Shunga, Republic of Karelia, wt. %

Показатель/Parameter	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Потери при прокаливании Loss on ignition
Среднее из 10 проб Average of 10 samples	95,4	0,45	0,20	3,85

В Карелии на территории Заонежского полуострова лидиты стратиграфически приурочены к кровле первой и второй пачек верхнезаонежской подсвиты, где формируют 4–10 метровые пласты [21]. Они входят в состав так называемого «лидит-шунгит-доломитового комплекса», известного во многих разрезах: с. Шуньга, д. Тетюгино, п. Кяппесельга, д. Мунозеро, оз. Яндомизеро, п. В. Губа, оз. Керацкое и др. [22].

Для большинства отмеченных направлений использования диатомитов и лидитов необходимо иметь информацию о более полном химическом составе как самих диатомитов, так и их водных экстрактов.

Целью нашего исследования являлось изучение микрокомпонентного состава водных экстрактов отдельных образцов диатомитов и лидитов Карелии с использованием масс-спектрометрического метода с индуктивно связанной плазмой (ICP MS) и оценка их возможного влияния на качество воды.

Объекты и метод исследования

В качестве объектов исследования выбраны три образца диатомитов – Д0016 (ламба Тедрилампи), образец № 1; ДТ-39 (месторождение Кяпели, пос. Тунгозеро), образец № 2; ДР 80 (оз. Видалампи, пос. Тикша), образец № 3 и два образца лидитов – ЛТ 20 (дер. Тетюгино), образец № 4 и ЛШ (п. Шуньга), образец № 5 (рисунок).

Подготовку проб водных экстрактов изучаемых образцов диатомитов и лидитов проводили по следующей схеме: 20 г порошкообразного образца ($0,4 < d < 100$ микрон) помещали в пластиковую бутылку объемом 500 см^3 , заливали 200 см^3 деионизированной воды и настаивали при комнатной температуре, при периодическом перемешивании и естественном освещении в течение 10 суток [23]. Измерение химических показателей полученных водных экстрактов проводили через 1, 3 и 10 суток настаивания, после

центрифугирования проб (относительное ускорение центрифуги – 4000 g). В данной работе рассматриваются результаты исследования водных экстрактов диатомитов и лидитов за весь период наблюдений.

Экстракты образцов размолотых диатомитов и лидитов исследованы методом ICP MS в Аналитическом центре Института геологии Карельского НЦ РАН. Концентрации химических элементов определялись на квадрупольном масс-спектрометре X-SERIES 2. Для контроля точности определения элементов использовали стандарты Trace Metals in Water -IV-STOCK-1643 и NIST 612. Содержание растворенного кремния определяли спектрофотометрическим методом в виде желтой формы молибденосиликновой кислоты [24], pH растворов измеряли потенциометрическим методом [25].

Результаты исследования

Водные экстракты трех образцов диатомитов имели слабокислую реакцию среды в течение всего опыта, на десятые сутки она составляла 5,8–5,9 ед. pH. Величины pH экстрактов образцов лидитов существенно различались между собой, образец № 4 во время всей экспозиции имел значения 4,5–4,6, тогда как экстракт образца № 5 был слабощелочным (pH=7,36–7,50).

По результатам определения 54 химических элементов в водных экстрактах диатомитов преобладающими ионами являются, как правило, Mg, Na, Ca, K и Al, их концентрации составляли до нескольких тысяч мкг/л. В отдельных образцах диатомитов также активно извлекаются в водную фазу фосфор, железо и марганец, максимальные концентрации которых составляли: P – до 700, Fe – до 1700 (образец № 1), Al – до 1100 (образец № 2), Mn – до 3300 (образец № 3) мкг/л. Образцы экстрактов диатомитов № 1 и 2 имели максимальные концентрации легких редкоземельных элементов (РЗЭ): Nd (до 247 мкг/л), Ce (до 230 мкг/л), La (до 156 мкг/л). Концентрации в диапазоне от 10 до 100 мкг/л имели V, Mn и Zr в экстрактах диатомитов № 1 и 2, а также Cu, Zn, Sr, Y и Ba – во всех экстрактах исследованных диатомитов. Содержание остальных элементов было заметно ниже и составляло от нескольких сотых до нескольких мкг/л.

Водные экстракты диатомитов всех образцов на десятый день экстракции имели очень близкий между собой химический состав, несмотря на то, что после первого дня опыта концентрации ряда элементов существенно различались. Например, на первые сутки содержание Li в образце № 1 было 47,0, в образце № 2 – 5,22 мкг/л, а через 10 дней – 32,2 и 32,8 мкг/л, соответственно. Концентрация Ba в образце диатомита № 1 после первого дня составляла 39,0, в образце № 2 – 130 мкг/л, а после десятого дня – 33,2 и 30,8 мкг/л, соответственно, и т. д.

Водный экстракт диатомита № 3 отличается от экстрактов диатомитов № 1 и 2 повышенным содержанием ряда элементов: Co (в 14 раз), Mn (10), U (4) и пониженными концентрациями Zr (в 8 раз) и Ag, Y и Cr (в 3–4 раза), а также легких лантаноидов (La, Ce, Pr, Nd) в 4–5 раз и тяжелых лантаноидов (от Sm до Lu) – в 2–3 раза.

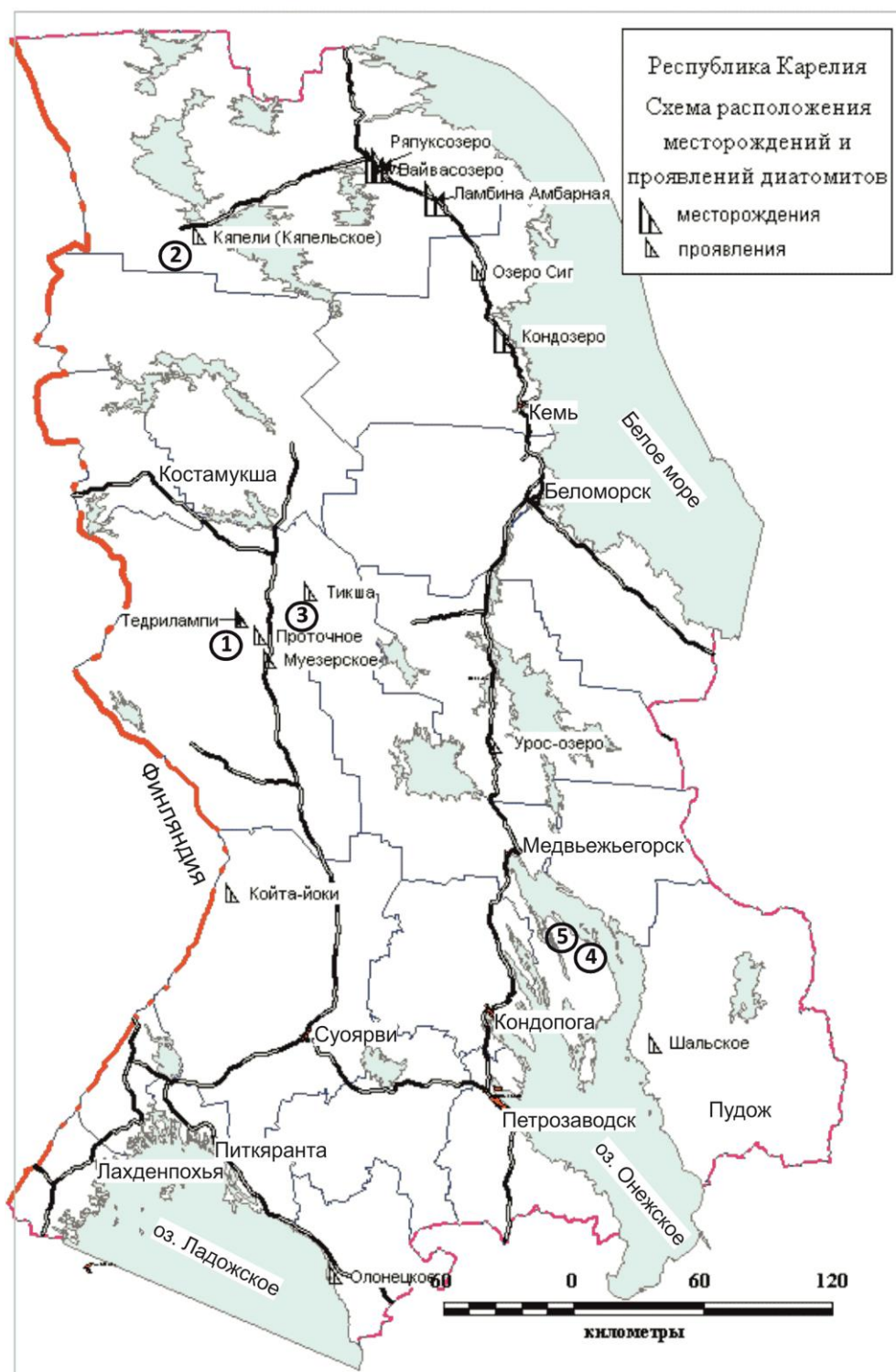


Рисунок. Места отбора проб диатомитов: 1 – Тедрилампи, 2 – Кяпели, 3 – Тикша; и лидитов: 4 – Тетюгино, 5 – Шуньга. Карта с сайта [23]

Figure. Sampling sites of diatomites: 1 – Tedrillampi, 2 – Kyapeli, 3 – Tiksha; and lydites: 4 – Tetyugino, 5 – Shunga. The map adopted from [23]

Для экстракта образца лидита № 4 преобладающим ионом является К, высокие содержания отмечены для Mg, Na, Ca и Al. Для лидита № 5 ряд элементов с максимальными концентрациями выглядит так: Mg, K и Na. Содержание Al было здесь на порядок меньше, чем во всех других образцах, а концентрации

ряда элементов (Ca, P, Zn, Ba, Be и Th) незначительно превышали значения контрольного образца исходной воды, т. е. эти элементы практически не извлекались в водную фазу. В целом выщелачивание элементов в водную фазу из лидитов было ниже, чем у диатомитов.

Элементный состав экстрактов лидитов существенно различается между собой, как и состав преобладающих ионов. В экстракте образца лидита № 4 содержание ряда металлов в десятки (Sr, Mn, U) и сотни раз (Be, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Y, Ba, Tl) превышает их значения образца № 5. По-видимому, этому способствовала кислая среда этого экстракта (рН 4,5–4,6). В то же время для ряда элементов наблюдается обратная картина, концентрация V, Mo, W, Zr, Hf в экстракте лидита № 4 значительно меньше, чем в № 5, что свидетельствует о повышенной миграционной активности этих элементов в слабощелочных условиях (рН 7,4–7,5) этого образца. Ряд элементов для обоих образцов лидитов имели близкие значения (например, P, Cr, Sn, Sb, Te, Ta, Bi, Th).

Содержание легких РЗЭ (La, Ce, Nd, Pr, Sm) во всех образцах экстрактов диатомитов, особенно в образцах № 1 и 2, превышало значения для лидитов приблизительно в 4–5 раза. По-видимому, такое различие связано с условиями формирования диатомитов и лидитов. Диатомиты формировались в пресной воде маленьких озер послеледниковых ландшафтов (8–10 тыс. лет назад). Кислые докембрийские породы Карелии обогащены диоксидом кремния, а ландшафтные условия способствовали его химическому выветриванию и поступлению с подземным стоком в озера [27]. В озерах установились гидрохимические условия с уровнем минерализации и содержанием кремнекислоты благоприятными для формирования кремнистых скелетов диатомей [28]. При этом обнаружение повышенных концентраций легких РЗЭ в диатомитах свидетельствует об их интенсивном контакте с грунтовыми водами гранитогнейсовых коренных пород. Среди образцов лидитов РЗЭ явно преобладали в экстракте образца № 4.

В водных экстрактах исследованных образцов диатомитов и лидитов для ряда элементов отмечено превышение значений ПДК рыбохозяйственных водоемов [29]. Содержание Al и Mn во всех образцах значительно превышало «норму», в образце диатомита № 3 превышение для Al и Mn было в 30 и 200 раз, соответственно. Переходные элементы (Fe, Ni, Cu, Zn) показали постоянное превышение «нормы» ПДК в экстрактах диатомитов и образца лидита № 4. Наибольшие превышения, отмеченные для этого образца, составили для Mn – 60, Fe – 90, Cu – 930, Ni – 28 и Zn – 40 раз. В экстракте лидита № 5 существенные превышения значений ПДК обнаружено для V и Mo.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидов И.Н., Шелехова Т.С. Диатомиты Карелии (особенности формирования, распространения, перспективы использования). – Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2006. – 89 с.
2. Смирнов П.В. Результаты комплексных исследований вещественного состава диатомитов Ирбитского месторождения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 6. – С. 93–104.
3. Mechanical and slow-released property of poly(acrylamide) hydrogel reinforced by diatomite / J. Lu, B. Sun, J. Jin, W. Jiang // Materials Science and Engineering. – 2019. – V. 99. – P. 315–321.
4. Wu W.-L., Chen Z. Modified-diatomite reinforced rubbers // Materials Letters. – 2017. – V. 209. – P. 159–162.

Заключение

Изучен элементный состав водных экстрактов нескольких образцов диатомитов и лидитов Карелии методом ICP MS. Во всех исследованных экстрактах образцов диатомитов и лидитов преобладающими элементами являются Mg, Na, Ca, K и Al (до нескольких тысяч мкг/л). Экстракты образцов диатомитов имеют однородный состав. Максимальные содержания в них других, наиболее значимых, элементов составляли: P – до 650, Fe – до 1700 (образец № 1) и Mn – до 3300 (образец № 3) мкг/л. Концентрации в диапазоне от 10 до 100 мкг/л характерны для ряда элементов (Li, B, Ti, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Y, Zr и Ba) всех экстрактов образцов диатомитов. Экстракты образцов диатомитов № 1 и 2 имели максимальные концентрации легких РЗЭ: Nd (до 247), Ce (до 230), La (до 156 мкг/л).

Химический состав экстрактов образцов лидитов заметно отличался, как между собой, так и от состава диатомитов. Кислая среда (рН 4,5–4,6) экстракта образца № 4 способствовала накоплению ряда элементов Sr, Mn, U и особенно Be, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Y, Ba, Tl. В то же время в экстракте образца № 5, в слабощелочных условиях (рН 7,4–7,5), наблюдались максимальные концентрации V, Mo, W, Zr и Hf.

Во всех исследованных экстрактах образцов диатомитов и лидитов концентрации Al и Mn превышали значения ПДК рыбохозяйственных водоемов. Превышение «нормы» ПДК показали также переходные элементы (Fe, Co, Ni, Cu, Zn) в экстрактах всех диатомитов и образца лидита № 4, а также V и Mo в образце лидита № 5.

Исследование водных экстрактов диатомитов и лидитов показало, что при определенных условиях они могут оказать существенное влияние на состав слабоминерализованных карельских вод. При этом содержание в них ряда полезных для развития растений элементов (Mg, Ca, K, Cu, Zn, V, Mn, Sr, Y и Zr) предполагает возможность их использования как «мягких» удобрений (или добавок к минеральным удобрениям).

Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику Института геологии КарНЦ РАН Т.С. Шелеховой за любезно предоставленные для исследования образцы диатомитов и ведущему физики Аналитического центра Института геологии КарНЦ РАН А.С. Парамонову за выполнение анализов методом ICP MS.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института геологии КарНЦ РАН.

5. Hydrated lanthanum oxide-modified diatomite as highly efficient adsorbent for low-concentration phosphate removal from secondary effluents / Y. Wu, X. Li, Q. Yang, D. Wang, X. Huang // Journal of Environmental Management. – 2019. – V. 231. – P. 370–379.
6. Thermal and microstructural properties of paraffin/diatomite composite / S. Benayache, S. Alleg, A. Mebrek, J.J. Suñol // Vacuum. – 2018. – V. 157. – P. 136–144.
7. Experimental study on preparation of lauric acid/microwave-modified diatomite phase change material composites / Y. Konuklu, O. Ersoy, F. Erzin, Y.Ö. Toraman // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2019. – V. 194. – P. 89–94.
8. Nanocomposites CoPt-x/Diatomite-C as oxygen reversible electrocatalysts for zinc-air batteries: Diatomite boosted the catalytic

- activity and durability / K. Wang, Z. Tang, W. Wu, P. Xi, Sh. Chen // *Electrochimica Acta*. – 2018. – V. 284. – P. 119–127.
9. Novel hierarchically porous allophane/diatomite nanocomposite for benzene adsorption / L. Deng, P. Du, W. Yu, P. Yuan, J. Zhou // *Applied Clay Science*. – 2019. – V. 168. – P. 155–163.
10. Diatomite supported by CaO/MgO nanocomposite as heterogeneous catalyst for biodiesel production from waste cooking oil / A.M. Rabie, M. Shaban, M.R. Abukhadra, R. Hosny, N.A. Negm // *Journal of Molecular Liquids*. – 2019. – V. 279. – P. 224–231.
11. Марков К.К. Диатомит // *Полезные ископаемые Ленинградской области и Карельской АССР. Справочник. Ч. II.* – Ленинград: Горгеоиздат, 1933. – С. 67–85.
12. Варданянц П.А. Диатомиты северной Карелии // *Материалы по геологии и полезным ископаемым Карелии*. – М.; Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1936. – С. 83–93.
13. Gronlund T. Diatomite deposit in the basin of Lake Soijarvi, central Finland // *Bull. Geo.Soc. Finland*. – 1986. – V. 58. – P. 2. – P. 35–45.
14. Дистанов У.Г. Опал-кристобалитовые породы // *Минеральное сырье. Справочник*. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1998. – 28 с.
15. Влияние опал-кристобалитовых пород на содержание растворимых форм кремнезема в природных водах / Е.Н. Офицеров, Г.К. Рябов, Ю.А. Убаскина, А.Б. Климовский, Е.Г. Фетюхина // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2011. – Т. 13. – № 4 (2). – С. 558–563.
16. Karelian shungite – an indication of 2,0-Ga-old metamorphosed oil-shale and generation of petroleum: geology, lithology and geochemistry / V.A. Melezhik, A.E. Fallick, M.M. Filippov, O. Larsen // *Earth Sci. Rev.* – 1999. – V. 47. – P. 1–40.
17. Giant Palaeoproterozoic petrified oil field in the Onega Basin / V.A. Melezhik, A.E. Fallick, M.M. Filippov, Y.E. Deines, A.E. Črne, A. Lepland, A.T. Brasier, H. Strauss // *Reading the Archive of Earth's Oxygenation. V. 3. Global Events and the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project* / Eds. V.A. Melezhik, A.R. Prave, A.E. Fallick, L.R. Kump, H. Strauss, A. Lepland, E.J. Hanski. – Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer, 2013. – P. 1202–1212.
18. Виноградов Н.В. Возможность модификации поверхности минерала лидита переходными металлами // *Проблемы геологии и освоения недр: Труды XIX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых*. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – Т. 2. – С. 250–252.
19. Атлас текстур и структур шунгитоносных пород Онежского синклинали / под ред. М.М. Филиппова, В.А. Мележика. – Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. – 80 с.
20. Хворова И.В., Дмитрик А.П. Микроструктуры кремнистых пород. – М.: Наука, 1972. – 170 с.
21. Melezhik V.A., Filippov M.M., Romashkin A.E. A giant Palaeoproterozoic deposit of shungite in NW Russia: genesis and practical applications // *Ore Geol. Rev.* – 2004. – V. 24. – P. 135–154.
22. Филиппов М.М., Дейнес Ю.Е. Субпластовый тип месторождений шунгитов Карелии. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. – 261 с.
23. Диатомит // *Управление недропользования*. 2014. URL: http://nedrark.karelia.ru/mnia/diatomit_karelia.htm (дата обращения 15.01.2020).
24. Особенности химического состава природных кремневых конкреций и их водных экстрактов / В.М. Феокистов, В.В. Вапиров, С.Ю. Чаженгина, С.А. Светов // *Экологическая химия*. – 2019. – № 28 (1). – С. 10–21.
25. Руководящий документ РД 52.24.433-2005. Массовая концентрация кремния в поверхностных водах суши. Методика выполнения измерений фотометрическим методом в виде желтой формы молибдокремниевой кислоты. – Ростов-на-Дону: Изд-во Гидрохимического института, 2005. – 15 с.
26. Руководящий документ РД 52.24.495-2005. Водородный показатель и удельная электрическая проводимость вод. Методика выполнения измерений электрохимическим методом. – Ростов-на-Дону: Изд-во Гидрохимического института, 2005. – 10 с.
27. Кремнистые породы СССР / под ред. У.Г. Дистанова. – Казань: Тат. кн. Изд-во, 1976. – 412 с.
28. Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии / под ред. В.С. Самарина. – Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1987. – 151 с.
29. Перечень рыбохозяйственных нормативов: предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. – М., Изд-во ВНИРО, 1999. – 304 с.

Поступила 29.01.2020 г.

Информация об авторах

Феокистов В.М., кандидат химических наук, доцент кафедры общей химии Института биологии, экологии и агротехнологий Петрозаводского государственного университета.

Медведев П.В., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии Карельского научного центра РАН; доцент кафедры наук о Земле и геотехнологий Института лесных, горных и строительных наук Петрозаводского государственного университета.

UDC 550.4.02

TRACE ELEMENT COMPOSITION OF AQUEOUS EXTRACTS OF SOME DIATOMITE AND LYDITE SAMPLES FROM KARELIA

Vladimir M. Feoktistov¹,
feoktistov@petrsu.ru

Pavel V. Medvedev^{1,2},
pmedved@krc.karelia.ru

¹ Petrozavodsk State University,
33, Lenin avenue, Petrozavodsk, 185910, Russia.

² Karelian Research Centre of RAS,
11, Pushkinsky street, Petrozavodsk, 185910, Russia.

The relevance of the research consists in the necessity to obtain reliable information on microelemental composition of aqueous extracts of diatomite and lydite. Currently, diatomites are expected to be widely used in medical, pharmaceutical and food industries, but a detailed study of their composition has not been conducted.

The main aim of the research is to investigate the trace element composition of aqueous extracts of several samples of diatomite and lydite using ICP MS analytic method.

The objects: three samples of diatomite and two samples of lydite from Karelia (North-West of Russia).

Methods: grinding samples of diatomite and lydite infused with deionized water at room conditions. Assays of aqueous extracts of the studied samples were centrifuged and analyzed by ICP MS after 1, 3 and 10 days.

Results. The authors present the results of 54 chemical elements identification in water extracts of diatomite and lydite using ICP MS. In all water extracts Mg, Na, Ca, K and Al (up to several thousand µg/l) are the predominant elements. Extracts of diatomite samples have a more homogeneous composition. The most important elements were: P – 650, Fe – 1700 (sample no. 1) and Mn – up to 3300 (sample no. 3) µg/L. Concentrations in the range from 10 to 100 µg/l are typical for a number of elements (Li, B, Ti, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Y, Zr and Ba) of all diatomite samples. Extracts of diatomite samples no. 1 and 2 had a maximum concentration of light REE: Nd (up to 247 µg/l), Ce (up to 230 µg/l), La (up to 156 µg/l). Chemical composition of extracts of lydite was differed markedly, both among themselves and from diatomites. Acidic medium (pH 4,5–4,6) of an aqueous extract of the sample lydite no. 4 contributed to accumulation of a number of elements Sr, Mn, U and, especially, Be, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Y, Ba, Tl. At the same time, maximum concentrations of V, Mo, W, Zr, Hf were observed in the extract of sample no. 5 under slightly alkaline conditions (pH 7,4–7,5). We noted an excess of permissible limits of fishery water bodies for Al and Mn in all samples. The excess of the «normal» maximum permissible concentrations have also shown the transition elements (Fe, Co, Ni, Cu, Zn) in extracts of diatomite and sample lydite no. 4, as well as V and Mo in the sample lydite no. 5. The study of aqueous extracts of diatomite and lydites showed that diatomite and lydites under certain conditions can have a significant impact on composition of low-mineralized waters in the territory of Karelia. At the same time, the presence of useful elements for the plant growth (Mg, Ca, K, Cu, Zn, V, Mn, Sr, Y, Zr) gives the possibility of their use as a «soft» fertilizers (or additives to mineral fertilizers).

Key words:

Diatomite, lydite, trace element composition, water extracts, Karelia, Paleoproterozoic, Holocene.

The authors are grateful to T.S. Shelekhova, senior researcher of the Institute of Geology, Karelian Research Centre of RAS, for courtesy of samples of diatomite and A.S. Paramonov, leading physicist of the Analytical center of the Institute of Geology, Karelian Research Centre of RAS, for performing ICP-MS analyzes.

The research was carried out within the state task of the Institute of Geology KarNC RAS.

REFERENCES

- Demidov I.N., Shelekhova T.S. *Diatomity Karelii (osobennosti formirovaniya, rasprostraneniya, perspektivy ispolzovaniya)* [Diatomites of Karelia (features of formation, dissemination, and prospects for use)]. Petrozavodsk, Karelia Scientific center RAN Publ., 2006. 89 p.
- Smirnov P.V. Results of complex studies of the material composition of diatomites of the Irbit Deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 6. pp. 93–104.
- Lu J., Sun B., Jin J., Jiang W. Mechanical and slow-released property of poly(acrylamide) hydrogel reinforced by diatomite. *Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 99, pp. 315–321.
- Wu W.-L., Chen Z. Modified-diatomite reinforced rubbers. *Materials Letters*, 2017 vol. 209, pp. 159–162.
- Wu Y., Li X., Yang Q., Wang D., Huang X. Hydrated lanthanum oxide-modified diatomite as highly efficient adsorbent for low-concentration phosphate removal from secondary effluents. *Journal of Environmental Management*, 2019, vol. 231, pp. 370–379.
- Benayache S., Alleg S., Mebrek A., Suñol J.J. Thermal and microstructural properties of paraffin/diatomite composite. *Vacuum*, 2018, vol. 157, pp. 136–144.
- Konuklu Y., Ersoy O., Erzincan F., Toraman Y.Ö. Experimental study on preparation of lauric acid/microwave-modified diatomite phase change material composites. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, vol. 194, pp. 89–94.
- Wang K., Tang Z., Wu W., Xi P., Chen Sh. Nanocomposites CoPt-x/Diatomite-C as oxygen reversible electrocatalysts for zinc-air batteries: Diatomite boosted the catalytic activity and durability. *Electrochimica Acta*, 2018, vol. 284, pp. 119–127.
- Deng L., Du P., Yu W., Yuan P., Zhou J. Novel hierarchically porous allopheane/diatomite nanocomposite for benzene adsorption. *Applied Clay Science*, 2019, vol. 168, pp. 155–163.
- Rabie A.M., Shaban M., Abukhadra M.R., Hosny R., Negm N.A. Diatomite supported by CaO/MgO nanocomposite as heterogene-

- ous catalyst for biodiesel production from waste cooking oil. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, vol. 279, pp. 224–231.
11. Markov K.K. Diatomit. *Poleznye iskopaemye Leningradskoy oblasti i Karelskoy ASSR. Spravochnik. Ch. II* [Diatomite. Handbook. Minerals of the Leningrad region and the Karelian ASSR. P. II]. Leningrad, Gorgeoneftizdat Publ., 1933. pp. 67–85.
 12. Vardanyants P.A. *Diatomity severnoy Karelii. Materialy po geologii i poleznym iskopaemyam Karelii* [Diatomites of Northern Karelia. Materials on Geology and minerals of Karelia]. Moscow; Leningrad, ONTI NKTP SSSR Publ. 1936. pp. 83–93.
 13. Gronlund T. Diatomite deposit in the basin of Lake Soijarvi, central Finland. *Bull. Geo.Soc. Finland*, 1986, vol. 58, P. 2, pp. 35–45.
 14. Distanov U.G. Opal-kristobalitovye porody [Opal-cristobalite rocks]. *Mineralnoe syre. Spravochnik* [Mineral raw materials. Handbook]. Moscow, Geoinformmark Publ., 1998. 28 p.
 15. Ofitserov E.N., Ryabov G.K., Ubaskina Yu.A., Klimovskiy A.B., Fetyukhina E.G. Vliyaniye opal-kristobalitovykh porod na sodержanie rastvorimyykh form kremnezema v prirodnykh vodakh [Influence of opal-cristobalite rocks on the content of soluble forms of silica in natural waters]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN*, 2011, vol. 13, no. 4 (2), pp. 558–563.
 16. Melezhik V.A., Fallick A.E., Filippov M.M., Larsen O. Karelian shungite – an indication of 2,0-Ga-old metamorphosed oil-shale and generation of petroleum: geology, lithology and geochemistry. *Earth Sci. Rev.*, 1999, vol. 47, pp. 1–40.
 17. Melezhik V.A., Fallick A.E., Filippov M.M., Deines Y.E., Črne A.E., Lepland A., Brasier A.T., Strauss H. Giant Palaeoproterozoic petrified oil field in the Onega Basin. *Reading the Archive of Earth's Oxygenation. V. 3: Global Events and the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project*. Eds. V.A. Melezhik, A.R. Prave, A.E. Fallick, L.R. Kump, H. Strauss, A. Lepland, E.J. Hanski. Heidelberg, New York, Dordrecht, London, Springer, 2013. pp. 1202–1212.
 18. Vinogradov N.V. Vozmozhnost modifikatsii poverkhnosti minerala lidita perekhodnymi metallami [The possibility of modifying the surface of the mineral lyddite transition metals]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy XIX Mezhdunarodnogo simpoziuma studentov i molodykh uchenykh* [Problems of Geology and Subsurface Development: Proc. of the 18th International Scientific Symposium of students, Postgraduates and young Scientists]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2015. Vol. II, pp. 250–252.
 19. *Atlas tekstur i struktur shungitonosnykh porod Onezhskogo sinklinoria* [Atlas of textures and structures of shungite-bearing rocks of Onega synclinore]. Eds. M.M. Filippov, V.A. Melezhik. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of RAS, 2007. 80 p.
 20. Khvorova I.V., Dmitrik A.P. *Mikrostruktury kremnistykh porod* [The microstructure of siliceous rocks]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 170 p.
 21. Melezhik V.A., Filippov M.M., Romashkin A.E. A giant Palaeoproterozoic deposit of shungite in NW Russia: genesis and practical applications. *Ore Geol. Rev.*, 2004, vol. 24, pp. 135–154.
 22. Filippov M.M., Dejnes Yu.E. *Subplastovy tip mestorozhdeniy shungitov Karelii* [Subsheet type deposits of shungites of Karelia]. Petrozavodsk, KarNC RAN Publ., 2018. 261 p.
 23. Diatomite. *Subsurface use department*. 2014. Available at: http://nedrark.karelia.ru/mnia/diatomit_karelia.htm (accessed 15 January 2020).
 24. Feoktistov V.M., Vapirov V.V., Chazhengina S.Yu., Svetov S.A. Osobennosti khimicheskogo sostava prirodnykh kremnevnykh konkretyy i ikh vodnykh ekstraktov [Specific features of chemical composition of natural chert nodules and their aqueous extracts]. *Ekologicheskaya khimiya*, 2019, vol. 28, no. 1, pp. 10–21.
 25. *Rukovodyashchiy dokument RD 52.24.433-2005. Massovaya kontsentratsiya kremniya v poverkhnostnykh vodakh sushi. Metodika vypolneniya izmereniy fotometricheskim metodom v vide zheltoy formy molibdokremnievoy kisloty* [Guidance document RD 52.24.433-2005. Mass concentration of silicon in surface waters of land. The method of measurement by photometric method in the form of a yellow form of molybdenum-silicic acid]. Rostov-on-don, Hydrochemical Institute Publ. house, 2005. 15 p.
 26. *Rukovodyashchiy dokument RD 52.24.495-2005. Vodородny pokazatel i udelnaya elektricheskaya provodimost vod. Metodika vypolneniya izmereniy elektrokhimicheskim metodom* [Guidance document RD 52.24.495-2005. Hydrogen index and specific electrical conductivity of water. Methods of measurement by electrochemical method]. Rostov-on-don, Hydrochemical Institute Publ. house, 2005. 10 p.
 27. *Kremnistye porody SSSR* [Siliceous rocks of the USSR]. Ed. by U.G. Dystanova. Kazan, Tat. Publ. House, 1976. 412 p.
 28. *Resursy i geokhimiya podzemnykh vod Karelii* [Resources and geochemistry of underground waters of Karelia]. Ed. by V.S. Samarin. Petrozavodsk, Karelian Branch of USSR Academy of Science Publ., 1987. 151 p.
 29. *Perechen rybokhozyaystvennykh Normativov: predelno dopustimyykh kontsentratsiy (PDK) and orientirovochno bezopasnykh urovney vozdeystviy (OBUV) vrednykh veshchestv dlya vody vodnykh obektov, rybokhozyaystvennogo znacheniya* [Standards of water quality of water bodies of fishery value, including standards of maximum permissible concentrations of harmful substances in waters of water bodies of fishery value.]. Moscow, VNIRO Publ., 1999. 304 p.

Received: 29 January 2020.

Information about the authors

Vladimir M. Feoktistov, Cand Sc., associate professor, Petrozavodsk State University.

Pavel V. Medvedev, Cand Sc., associate professor, Petrozavodsk State University; senior researcher, Karelian Research Centre of RAS.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректура 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

Подписано к печати 29.02.2020. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 23,96. Уч.-изд. л. 21,67.
Заказ 39-20. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ