

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 329, № 7, 2018

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Редакционная коллегия

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)
Рихванов Л.П., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Шварцев С.Л., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
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)
Зиятдинов 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)
Кирынова 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, 2018

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Учредителем является Томский политехнический университет.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах www.elibrary.ru, scholar.google.com

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

Volume 329, № 7, 2018

BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY. GEO ASSETS ENGINEERING

Editorial Board

Semiletov I.P., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)
 Rikhvanov L.P., Dr. Sc. (Russia)
 Ostvald R.V., Cand. Sc. (Russia)
 Savichev O.G., Dr. Sc. (Russia)
 Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)
 Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)
 Kontorovich A.E., Dr. Sc. (Russia)
 Shvartsev S.L., Dr. Sc. (Russia)
 Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)
 Silkin V.M., PhD (Spain)
 Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)
 Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)
 Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)
 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)
 Bouzник 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 Communicationss).

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

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on
www.elibrary.ru, scholar.google.com.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Структурно-групповой состав растворенного органического вещества в водах термокарстовых озер Большеземельской тундры**
Иванова И.С., Король И.С., Широкова Л.С., Покровский О.С.
- Классификация населённых пунктов по уровню развитости рынка земельных участков индивидуального жилого строительства**
Быкова Е.Н., Балтыжакова Т.И., Волкова Я.А.
- Геохимия турмалина грейзенов и пегматитов Горного Алтая**
Гусев А.И.
- Трансформация минерального состава донных отложений от истоков к устьям рек**
Савичев О.Г., Домаренко В.А., Перегудина Е.В., Лепокурова О.Е.
- Проектирование подземных бесканальных, предварительно термически напряженных, теплопроводов со стартовыми компенсаторами**
Белиловец В.И., Липовка Ю.Л.
- Промысловая эффективность усовершенствованной конструкции гидромеханического щелевого перфоратора**
Токарев М.А., Зубаиров С.Г., Токарева Н.М.
- Влияние фильтрационно-емкостных свойств объектов разработки на величину коэффициента вытеснения нефти в различных геолого-физических условиях**
Гладких Е.А., Хижняк Г.П., Галкин В.И.
- Система стационарных всесезонных боновых заграждений с переменной плавучестью – «Стабонза» и «Стабонза-Шельф»**
Султанмагомедов С.М., Кунафин Р.Н., Султанмагомедов Т.С., Хасанов Р.Р., Кантемиров И.Ф.
- О проблеме перегрева обмотки ротора асинхронных двигателей в пусковых режимах высокоинерционных электроприводов нефтегазовой и горной промышленности**
Зюзов А.М., Метельков В.П.
- Использование элементов многомерной статистики для обработки данных наземной гамма-спектрометрии при поисках гидротермальных месторождений золота**
Соболев И.С., Орехов А.Н., Соболева Н.П.
- Математическое моделирование отказов элементов электрической сети (10 кВ) автономных энергетических систем с возобновляемой распределенной генерацией**
Карамов Д.Н., Наумов И.В., Пержабинский С.М.
- Технологические аспекты построения 3D-модели инженерных сооружений в городах арктического региона РФ**
Аврунев Е.И., Чернов А.В., Дубровский А.В., Комиссаров А.В., Пасечник Е.Ю.
- Повышение коммутационной устойчивости тяговых электродвигателей ЭДП-800 карьерных самосвалов**
Харламов В.В., Чупрына Е.Ю., Сергеев Р.В., Шкодун П.К., Попов Д.И., Москалев Ю.В.
- Оценка воздействия процессов ликвидации угольных шахт на экологическую ситуацию в Российском Донбассе**
Молев М.Д., Масленников С.А., Занина И.А., Илиев А.Г.
- 6 Structural-group composition of dissolved organic matter in waters of thermokarst lakes of Bolshezemelskaya tundra**
Ivanova I.S., Korol I.S., Shirokova L.S., Pokrovsky O.S.
- 17 Classification of inhabited localities by the level of development of individual residential land market**
Bykova E.N., Baltyzhakova T.I., Volkova Ya.A.
- 31 Geochemistry of tourmaline of greisens and pegmatites of Gorny Altai**
Gusev A.I.
- 43 Transformation of mineral composition of river sediments from sources to mouth of rivers**
Savichev O.G., Domarenko V.A., Peregudina E.V., Lepokurova O.E.
- 57 Designing underground trenchless thermally pre-stressed heat supply pipelines with expansion joints**
Belilovets V.I., Lipovka Yu.L.
- 70 Efficiency of hydro-slotting perforator advanced design**
Tokarev M.A., Zubairov S.G., Tokareva N.M.
- 77 Influence of filtration-capacitive properties of development objects on the value of oil displacement efficiency in various geological and physical conditions**
Gladkikh E.A., Khizhnyak G.P., Galkin V.I.
- 86 The stationary all-weather booms system with variable floatability – «Stabonza» and «Stabonza-Shelf»**
Sultanmagomedov S.M., Kunafin R.N., Sultanmagomedov T.S., Khasanov R.R., Kantemirov I.F.
- 96 Problem of induction motors rotor winding overheating in starting modes of high-inertia electric drives of oil and mining industry**
Zyuzev A.M., Metelkov V.P.
- 104 Use of multivariate statistics elements for ground gamma-ray spectrometry data processing in exploration of hydrothermal gold deposits**
Sobolev I.S., Orekhov A.N., Soboleva N.P.
- 116 Mathematical modelling of failures of electrical grid (10 kV) of autonomous energy systems with renewable distributed generation**
Karamov D.N., Naumov I.V., Perzhabinsky S.M.
- 131 Technological aspects of constructing 3D-model of engineering structures in the cities of the RF arctic region**
Avrunev E.I., Chernov A.V., Dubrovsky A.V., Komissarov A.V., Pasechnik E.Yu.
- 138 Enhancement of commutation stability of traction motors EDP-800 trucks**
Kharlamov V.V., Chupryna E.Yu., Sergeev R.V., Shkodun P.K., Popov D.I., Moskaev Yu.V.
- 148 Assessment of coal mines liquidation impact on ecological situation in the Russian Donbass**
Molev M.D., Maslennikov S.A., Zanina I.A., Iliev A.G.

УДК 550.47

СТРУКТУРНО-ГРУППОВОЙ СОСТАВ РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ВОДАХ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР БОЛЬШЕЗЕМЕЛЬСКОЙ ТУНДРЫ

Иванова Ирина Сергеевна^{1,2},
IvanovaIS_1986@mail.ru

Король Ирина Степановна^{2,3},
irinakorol@yandex.ru

Широкова Людмила Сергеевна¹,
lshirocova@yandex.ru

Покровский Олег Сергеевич^{4,1},
oleg.pokrovsky@get.omp.eu

¹ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова РАН, Россия, 163000, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 23.

² Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4.

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

⁴ Национальный центр научных исследований Франции, France, 31400, Toulouse, Avenue Edouard Belin, 14.

Актуальность исследования связана с интенсивным хозяйственным освоением арктической части Европейского Севера России, которое влечет за собой резкое увеличение антропогенной нагрузки на уязвимые экосистемы Крайнего Севера. В условиях потепления климата таяние вечной мерзлоты может провоцировать образование новых термокарстовых озер и просадок, что в свою очередь способствует выводу органического вещества из торфа в поверхностные воды.

Цель исследования: выявление особенностей состава растворенного органического вещества и его возможных источников в водах термокарстовых озер, расположенных на одном из ключевых участков исследований Большеземельской тундры (вблизи г. Нарьян-Мар), имеющих разные площади водного зеркала и находящихся на разных этапах развития.

Методы. Анализ содержания растворенного органического углерода в водах термокарстовых озер был выполнен в лаборатории георесурсов и окружающей среды г. Тулузы методом полного сжигания растворенного органического углерода. В лаборатории физико-химических методов исследования Института химии нефти СО РАН (г. Томск) методом трехступенчатой экстракции при различных pH были получены хлороформные концентраты, содержащие растворенные органические вещества. Концентраты изучались методом инфракрасной спектроскопии для установления условного содержания структур органических веществ. Методом хромато-масс-спектрометрии был определен структурно-групповой состав растворенных органических веществ.

Результаты. Органические соединения в водах термокарстовых озер Большеземельской тундры представлены в основном углеводородами алифатического строения, сложными эфирами карбоновых кислот и ароматическими соединениями, принадлежащими трем гомологическим рядам. Установлено, что в малом кислом озере BZ-12 преобладают низкомолекулярные n-алканы, основными источниками которых являются низшие растения (одноклеточные водоросли) и фитопланктон. В более зрелом и менее кислом озере BZ-13 n-алканы представлены длинными молекулярными цепями, характерными для высших наземных растений и прибрежно-морских водорослей. Установлено, что с развитием экосистемы озера при переработке слоя торфяных осадков в водах озер происходит смена органического вещества с автохтонного на аллохтонное.

Ключевые слова:

Большеземельская тундра, термокарстовые озера, растворенное органическое вещество, углерод, алканы.

Введение

Интенсивное хозяйственное освоение арктической части Европейского Севера России влечет за собой резкое увеличение антропогенной нагрузки на уязвимые экосистемы Крайнего Севера. Территория Большеземельской тундры (БЗТ) содержит большое количество озер, в том числе и термокарстовых, которые характеризуются простыми округлыми очертаниями, небольшой глубиной, торфяными обрывистыми берегами. В условиях потеп-

ления климата таяние вечной мерзлоты может провоцировать образование новых термокарстовых озер и просадок, что в свою очередь способствует выводу органического вещества из торфа в воды.

Органическое вещество является неотъемлемым компонентом химического состава природных вод, а также является показателем происходящих в них продукционно-деструкционных процессов. Органическое вещество (ОВ) в природных

водах имеет в основном два источника происхождения. Так, аллохтонное ОВ связано с разложением наземной растительности и поступает в воду с поверхностным стоком с водосбора; автохтонное ОВ образуется в результате протекания продукционно-деструкционных процессов в водоеме. Одноклеточные водоросли являются основным источником автохтонного ОВ в водоеме.

Исследованиями Большеземельской тундры занимаются сотрудники Института экологических проблем Севера УрО РАН, Института биологии Коми УрО РАН, Института проблем промышленной экологии Севера, Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Московского государственного университета. Тем не менее термокарстовые озера, несмотря на их большую численность, остаются слабоизученными. Изучение структурно-группового состава РОВ в водах озер является важным звеном при изучении круговорота углерода в природе.

Целью данной работы было выявление особенностей состава растворенного органического вещества в водах термокарстовых озер, расположенных на одном из ключевых участков исследований Большеземельской тундры (вблизи г. Нарьян-Мар), имеющих разные площади водного зеркала и находящихся на разных стадиях формирования. Также на основе полученных данных по химическому составу органического вещества были рассчитаны основные соотношения отдельных молекул, на основе которых были выявлены основные биопродукты ОВ, то есть основные источники ОВ.

Объекты и методы исследования

Начиная с 2015 г. на территории Большеземельской тундры сотрудниками лаборатории пресноводных и морских экосистем Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики РАН (ФИЦКИА РАН) ежегодно проводятся экспедиционные полевые работы, включающие в себя гидрохимическое, микробиологическое опробование природных вод. Так, в 2015 г. в 40 км от г. Нарьян-Мара для проведения наблюдений за состоянием экосистем термокарстовых озер был заложен один из ключевых участков исследований (рис. 1). БЗТ относится к Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции, на территории которой ведется активная добыча углеводородного сырья, стоит отметить, что в 120 км юго-восточнее от заложенного участка расположено крупнейшее в Ненецком автономном округе Харьгинское нефтяное месторождение, разрабатываемое более 45 лет. Ландшафт ключевого участка исследований представлен термокарстовыми озерами, находящимися на разных стадиях формирования (в зависимости от их размера и возраста) [1, 2]. Питание поверхностных вод, в том числе и термокарстовых озер, осуществляется в основном за счет талых снеговых вод (до 75 % стока), дождевые воды имеют подчиненное значение (15–20 % стока), до-

ля подземных вод составляет 5–10 % либо отсутствует. Территория БЗТ характеризуется наличием многолетних мерзлых пород, которые препятствуют просачиванию в подпочвенные слои атмосферных осадков [3] и ограничивают циркуляцию подземных вод [4]. В 2015–2016 гг. в период установления летней межени на данном участке было отобрано 12 проб из 9 водных объектов (3 просадки и 6 озер). Пробы воды для изучения концентрации растворенного органического углерода (РОУ) отбирались из приповерхностного слоя водной толщи с глубины 0,1–0,2 м. Для определения структурно-группового состава растворенного органического вещества пробы отбирались также с приповерхностного слоя глубиной 0,2–0,3 м в стеклянную емкость. В каждой точке опробования проводились измерения быстроизменяющихся показателей: pH, электропроводность и содержание растворенного кислорода.

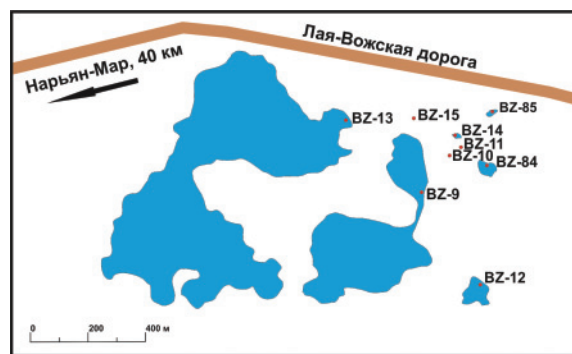


Рис. 1. Схема расположения точек опробования термокарстовых озер на ключевом участке около г. Нарьян-Мар, Большеземельская тундра

Fig. 1. Scheme of sampling plot near Naryan-Mar, Bolshezemelskaya tundra

Анализ содержания РОУ в водах термокарстовых озер был выполнен в лаборатории георесурсов и окружающей среды г. Тулузы (GET) при помощи метода полного сжигания растворенного органического углерода при 800 °C на приборе TOC-VCSN, SHIMADZY.

В 2016 г. на исследуемом участке для детального изучения состава растворенного органического вещества в водах были выбраны два термокарстовых озера BZ-12 и BZ-13, находящихся на разных стадиях формирования (рис. 1). Состав органических веществ термокарстовых озер определялся в лаборатории физико-химических методов исследования Института химии нефти СО РАН (Томск). При анализе природных вод использовалась методика 625 Агентства по защите окружающей среды МУК 4.1.663–97 [5], основанная на получении хлороформных концентратов трехступенчатой экстракцией хлороформом при значениях pH 2, 7, 11 и предназначенная для обзорного определения органических соединений. Выбор данной методики обусловлен тем, что она не позволяет экстрагировать хлороформом самые известные органические соединения, растворенные в воде, – фульвовые

(ФК) и гуминовые кислоты (ГК) [6]. С помощью данной методики из отфильтрованных от механических примесей образцов воды были выделены хлороформные концентраты (ХК), содержание органических веществ (без учета ФК и ГК) в которых составило 0,48 мг/л (BZ-12) и 1,62 мг/л (BZ-13), соответственно. Далее хлороформные концентраты были изучены методом инфракрасной спектроскопии (ИК) и методом хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС). Инфракрасные спектры (ИК-спектры) хлороформных концентратов исследовали на ИК Фурье спектрометре Nicolet 5700 TermoElectron (USA) в диапазоне 4000–400 см⁻¹, с разрешением 4 см⁻¹. Анализ органических соединений в ХК вод проводили методом хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС) на хромато-масс-спектрометре Finnigan DSQ-EI/250 (Thermo Scientific, США) и хроматографической капиллярной колонке TR-5MS длиной 30 м и диаметром 0,25 мм, с фазой Phenyl Polysilphenylene-siloxane. Режим проведения анализа: газ-носитель – гелий, температура испарителя и интерфейса 250 °С, программа нагрева термостата: $t_{\text{нач}}=80$ °С, изотерма в течение 2 мин, нагрев со скоростью 4 град/мин до $t_{\text{max}}=300$ °С.

Результаты исследований и их обсуждение

Как показали исследования (табл. 1), общая тенденция происходящих изменений в водах заключается в снижении РОУ в процессе развития экосистемы озера и увеличении его размера (рис. 2), которая, скорее всего, связана с выщелачиванием торфа на границе озера и гетеротрофным поглощением РОВ в толще воды. Данная зависимость описана в работах Л.С. Широковой, Ж. Лин, К. Му, Р.М. Манасыпова, О.С. Покровского, С.Н. Кирпотина [7–13]. По данным авторов [14] содержания биогенных элементов в термокарстовых водных объектах также изменяется в зависимости от площади объекта, максимальные значения отмечены в водах просадок. Наиболее чувствительными индикаторами изменений химико-экологических условий водных экосистем являются микроорганизмы, количество и видовое разнообразие которых характеризует процессы, протекающие в одном объекте, то есть экологическое состояние экосистемы. Так, в работе С.А. Забелиной с соавторами [15] описана тенденция снижения количества гетеротрофных бактерий с увеличением площади водного объекта с 68–79 % в просадках и малых озерах площадью до 500 м² до 44 % в больших сформировавшихся озерах и до 14 % в хасырее (спущенное термокарстовое озеро). Доля олиготрофных бактерий наоборот увеличивалась от 2–3 % в просадках и малых озерах до 23–29 % – в сформировавшихся озерах. Биологическая ситуация водоема определяется его трофическим статусом, что влияет на содержание органических соединений в нем [16]. По состоянию планктонных сообществ, согласно классификации С.П. Китаева, озера, исследуемые на данном участке, являются олиготрофными [17].

Таблица 1. Физико-химические параметры вод термокарстовых озер на исследуемом ключевом участке

Table 1. Physical and chemical parameters of waters of thermokarst lakes on sampling plot

№ пробы Sample no.	Дата отбора пробы Date of sampling	Площадь водного зеркала, м ² Water-surface area, m ²	pH	Электропроводность, мкСм/см Conductivity, mS/cm	РОУ, мг/л DOC, ppm
BZ-11	21.07.2015	1,2	3,8	62,2	89,5
BZ-10	21.07.2015	1,35	4,6	20,6	18,9
BZ-15	22.07.2015	1,8	5,9	30,7	32,9
BZ-12	21.07.2015	5000	5,1	14,4	14,3
BZ-9	21.07.2015	10988	5,9	20,4	18,8
BZ-13	22.07.2015	265578	6,7	16,7	11,0
BZ-85	24.07.2016	937	4,8	32,3	59,7
BZ-84	24.07.2016	2345	5,2	21,3	32,9
BZ-12	24.07.2016	5000	5,1	14,0	16,2
BZ-9	24.07.2016	10988	5,3	16,6	15,9
BZ-13	24.07.2016	265578	6,2	17,0	10,9

DOC – dissolved organic carbon.

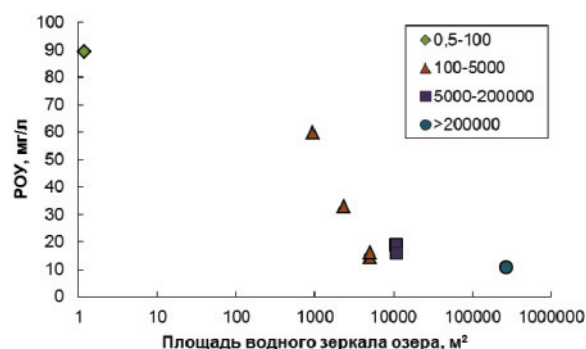


Рис. 2. Изменение содержания РОУ в зависимости от площади водного зеркала озера

Fig. 2. Changes of DOC content, depending on lake water-surface area

Анализ ИК спектров ХК, представленных на рис. 3, показал, что в выделенных органических веществах присутствуют алифатические структуры (полоса 1470 и 2922 см⁻¹), длинные алкильные структуры (полоса 720 см⁻¹), полоса поглощения 1462 см⁻¹, отвечающая за колебания СН₃-групп, а также СН₂-групп в ациклических и циклических структурах. Широкая ассиметричная полоса с максимумом 3400 см⁻¹ принадлежит ОН-группам (фенольной, спиртовой, карбоксильной), максимум около 1710 см⁻¹, обусловлен различными С=О-группами (кислоты, сложные эфиры), а полоса 1740 см⁻¹ принадлежит алифатическим эфирам. Серия слабых полос в диапазоне 930–700 см⁻¹ связана с внеплоскостными колебаниями различных ароматических СН-групп, а полоса 1600 см⁻¹ указывает на ароматические фрагменты [18].

Расчет спектральных ИК-коэффициентов позволяет сделать оценочную характеристику выделенных структур (табл. 2) и сравнить их наличие в ХК исследуемых вод [19].

Установлено, что вода малого термокарстового озера BZ-12 обогащена парафинами с более развет-

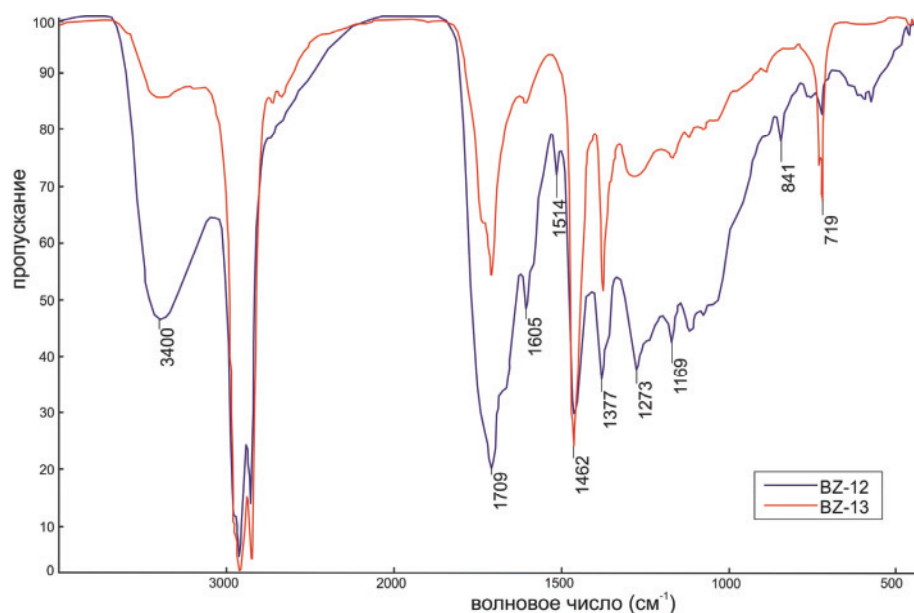


Рис. 3. Инфракрасные спектры хлороформных концентратов исследуемых термокарстовых озер

Fig. 3. Infrared ranges of chloroformed concentrates of waters of studied thermokarst lakes

вленной структурой и кислородсодержащими соединениями, содержащими ароматические фрагменты. В обоих концентратах присутствуют соединения с одинаковыми структурами, но отличаются по интенсивности полос поглощения, а значит и по содержанию. Сочетание оптических методов с другими физико-химическими методами анализа позволяет более точно установить индивидуальный состав или построить усредненную молекулу образца.

Органические вещества в изучаемых образцах воды были отнесены к соответствующим гомологическим рядам согласно классификации [20]. Всего в изученных водах термокарстовых озер установлено три гомологических ряда органических соединений. Наиболее распространенными являются алканы, метиловые эфиры высших кислот. Менее распространены ароматические углеводороды (фенантрены, метилфенантрены) (табл. 3).

Таблица 2. Спектральные ИК-коэффициенты хлороформных концентратов, полученных из вод термокарстовых озер

Table 2. Spectral IR-coefficients of the chloroformed concentrates received from waters of thermokarst lakes

Спектральные коэффициенты Spectral coefficients		Номер образца Number of sample	
		BZ-12	BZ-13
Условное содержание ароматических структур Conditional content of aromatic structures	D_{1610}/D_{1465}	0,702	0,208
Условное содержание парафиновых структур Conditional content of paraffin structures	D_{725}/D_{1465}	0,246	0,483
Условное содержание конденсированных ароматических структур Conditional content of condensed aromatic structures	D_{750}/D_{725}	1,615	0,619
Разветвленность парафиновых структур Branching of paraffin structures	D_{1380}/D_{720}	3,571	1,345
Сульфоксиды $-S=O$ Sulphoxide $-S=O$	D_{1030}/D_{1465}	0,711	0,250
Условное содержание $-C=O$ групп Conditional content of $-C=O$ groups	D_{1710}/D_{1465}	1,1315	0,608

Таблица 3. Структурно-групповой состав растворенных органических веществ в водах термокарстовых озер Большеземельской тундры

Table 3. Structural-group composition of dissolved organic matter in waters of thermokarst lakes of Bolshezemelskaya tundra

Название гомологического ряда Name of homological series	Количество соединений Number of compounds	Относительная распространенность, % Relative prevalence, %	
		BZ-12	BZ-13
Насыщенные углеводороды: Saturated hydrocarbons:			
n-алканы $C_{14}-C_{36}$ n-alkanes $C_{14}-C_{36}$	23	46,77	59,56
изоалканы $C_{19}-C_{20}$ isoalkanes $C_{19}-C_{20}$	2	23,19	0,84
Фенантрены, метилфенантрены Phenanthrenes, methylphenanthrenes	2	2,30	0,10
Метиловые эфиры высших кислот Methyl esters of higher acids	2	2,04	25,01

Как показали результаты хроматографического исследования, в изученных хлороформных концентратах органические соединения представлены углеводородами от 46,77 до 59,57 % отн., триароматическими соединениями от 0,1 до 2,3 % отн., группой кислородсодержащих соединений от 2,04 до 25,01 % отн.

Алканы (парафиновые углеводороды) являются наиболее распространенным органическим компонентом как в богатых органическими веществами болотных водах [21], так и в речных водах арктических районов [22]. Алканы используются в качестве геохимических маркеров генезиса органического вещества, поскольку преобладание тех или иных гомологов *n*-алканов отражает преимущественный вклад отдельных биопродуцентов в формирование состава ОВ [23–25]. В настоящее время для парафинов установлено несколько источников образования: 1) *n*-алканы, синтезируемые в живых организмах; 2) высокомолекулярные одноатомные спирты, входящие в состав живого вещества; 3) высшие одноосновные предельные жирные кислоты [26]. Следует отметить, что механизм декарбоксилирования жирных кислот с образованием алканов на один атом углерода меньше является наиболее распространенным в природе. В обоих образцах озерных вод, исследуемых нами, алканы также являются доминирующими в составе РОВ и представлены насыщенными углеводородами нормального и изостроения (рис. 4).

В водах малого термокарстового озера BZ-12 *n*-алканы составляют около 47 % отн., среди которых представлены низкомолекулярные гомологи

C_{15} – C_{21} , характерные в основном для гидробионтов: простейших водорослей и фитопланктона. Доминирующим гомологом является C_{17} , характерный для водорослей [27]. Гомологические ряды C_{16} , C_{20} – C_{24} соответствуют бактериальной продукции [28]. Однако в данном образце наблюдается полное отсутствие *n*-алканов с количеством атомов С более 22 (рис. 5), что еще раз указывает на то, что генезис органических веществ данного озера связан с процессом жизнедеятельности бактерий и простейших водорослей.

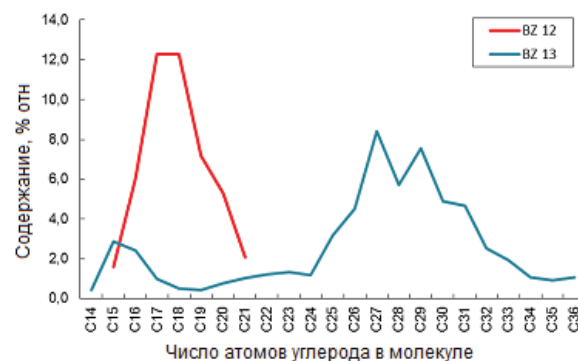


Рис. 5. Молекулярно-массовое распределение *n*-алканов в ХК исследуемых вод термокарстовых озер

Fig. 5. Molecular weight distribution of *n*-alkanes in the chloroformed concentrates received from waters of thermokarst lakes

В водах крупного озера BZ-13 содержание *n*-алканов увеличивается до 60 % отн. всех органических компонентов. При рассмотрении профиля ра-

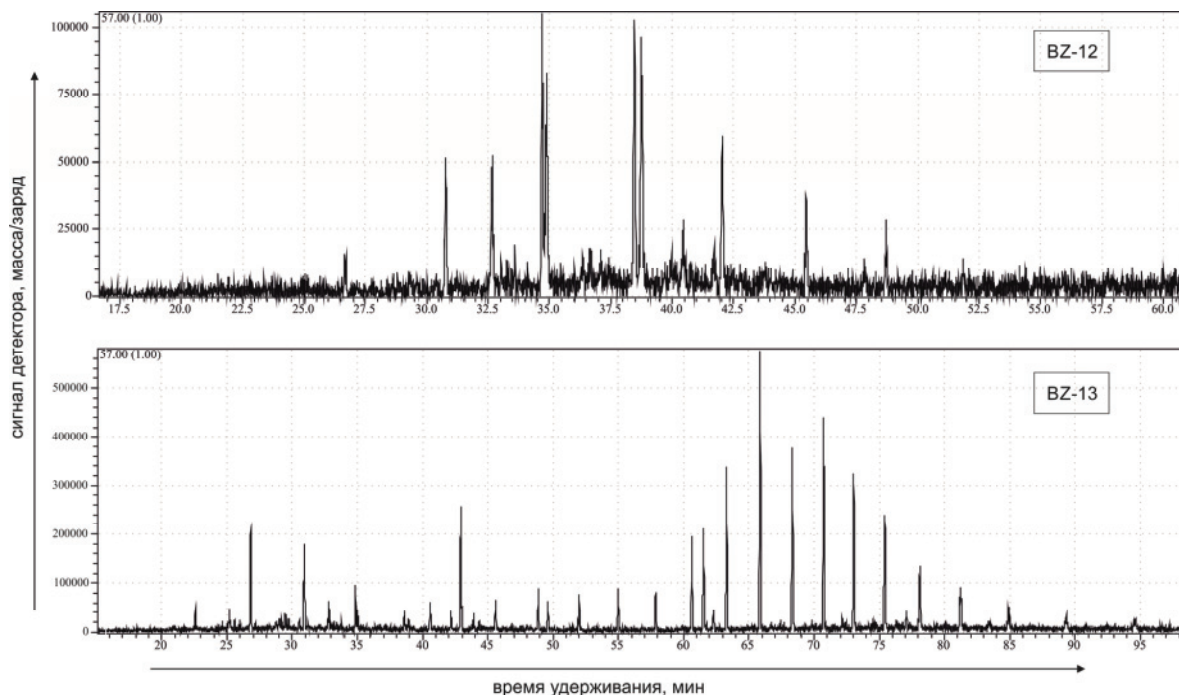


Рис. 4. Ионные хроматограммы *n*-алканов (m/z 57) термокарстовых озер BZ-12 и BZ-13 Большеземельской тундры

Fig. 4. Ion chromatograms of *n*-alkanes (m/z 57) of thermokarst lakes BZ-12 and BZ-13 of Bolshezemelskaya tundra

спределения углеводов в воде озера BZ-13 можно отметить бимодальный характер состава алканов с пиком на C_{15} , доминирующими являются высокомолекулярные гомологи $n-C_{27}$, $n-C_{29}$ и $n-C_{31}$ характерные для многих наземных растений, наличие n -алкана C_{31} свидетельствует о травянистых составляющих биомассы, n -алканы C_{27} соответствуют древесным разновидностям. В работе Г.М. Вилкинсон [29] также описано, что в северных районах США в озерах доминирующим источником ОВ являются высшие наземные растения. Относительно высокое содержание гомола C_{25} в воде озера BZ-13 указывает на существенный вклад в исходную биомассу прибрежно-морских водорослей и макрофитов [23, 24]. n -алканы с низкими молекулярными массами (менее C_{21}), которые характерны для фитопланктона, сине-зеленых водорослей и бактерий [30], присутствуют в незначительных концентрациях (рис. 5).

Одним из основных критериев, используемых при определении происхождения алканов в природных объектах, является индекс CPI (Carbon Preference Index), рассчитываемый как отношение суммы алканов с нечетным числом атомов углерода к сумме алканов четного ряда в высокомолекулярной области (C_{24} – C_{34}). CPI показывает долю алканов, образованных при деструкции высших растений [31, 32]. Значение CPI более единицы говорит о биогенном происхождении алканов, образованных за счет деятельности и деструкции высших растений. В нашем случае индекс CPI, который равен 1,36, был рассчитан только для озера BZ-13 (табл. 3). Большая часть алканов в водах озера BZ-13 могла быть образована именно за счет деятельности и деструкции высших растений. В водах озера BZ-12 наблюдаются только низкомолекулярные n -алканы, что, вероятно, связано с жизнедеятельностью бактерий. Так, в хемосинтезирующих бактериях обнаружены алканы (C_{12} – C_{31}) с примерно одинаковым числом четных и нечетных атомов углерода, что характерно для молодого развивающегося озера BZ-12. О присутствии серы в водах также свидетельствует спектральный ИК-коэффициент хлороформного концентрата, полученного из вод данного озера (табл. 2). Также были рассчитаны индексы нечетности OEP₁₇ и OEP₁₉, показывающие преобладание нечетных УВ над ближайшими четными в низкомолекулярной области. Значения индексов OEP менее и более единицы говорят о доминирующем биогенном источнике ОВ [28], что также характерно для обоих образцов вод термокарстовых озер.

По результатам данных о составе n -алканов, выделенных из исследуемых вод, были рассчитаны коэффициенты для оценки вклада в состав ОВ бактерий, фитопланктона, водорослей, водных макрофитов или сфагновых мхов (P_{aq}) [24], наземных растений (TAR) [16, 33] (табл. 5). Значения полученных коэффициентов приведены в табл. 5.

Из рассчитанных нами данных установлено, что в водах малого озера BZ-12 РОВ образуют гете-

ротрофные бактерии, водоросли и фитопланктон. В более зрелом озере BZ-13 бактериальный вклад уменьшается, но увеличивается доля ОВ из водорослей и фитопланктона, доминирующим источником ОВ являются наземные высшие растения. Следовательно, в озерах Большеземельской тундры, при развитии их экосистем, наблюдается смена генезиса ОВ от автохтонного к аллохтонному. На территории Западной Сибири в северных заболоченных районах также развиты озера с высоким содержанием аллохтонного вещества [34].

Таблица 4. Распределение n -алканов в водах озер Большеземельской тундры

Table 4. Distribution of n -alkanes in waters of thermokarst lakes of Bolshezemelskaya tundra

№ пробы Sample no.	Продукция гидробионтов Production from hydrobionts $\Sigma n-C_{15}, C_{17}, C_{19}, \%$	Бактериальная продукция Bacterial product $\Sigma n-C_{16}, C_{20}-C_{24}, \%$	OEP ₁₇	OEP ₁₉	CPI
BZ-12	21,06	11,36	1,13	0,82	–
BZ-13	4,27	5,58	0,79	0,89	1,36

Примечание: «–» – критерий не рассчитан из-за отсутствия гомологов в пробе.

Note: «–» not calculated due to the lack of homologs in the sample.

Таблица 5. Коэффициенты оценки вклада различных биопродукторов в РОВ

Table 5. Coefficients of contribution of various sources in DOM

Коэффициент Coefficient	Источник РОВ Sources of DOM	BZ-12	BZ-13
C_{16}/C_{20}	Гетеротрофы Heterotrophs	1,147	3,227
C_{18}/C_{20}	Пурпурные бактерии Purple bacteria	2,318	0,680
C_{26}/C_{20}	Сульфатредуцирующие бактерии Sulfate-reducing bacteria	2,318	0,680
$(C_{15}+C_{17})/2C_{20}$	Фитопланктон Phytoplankton	1,312	2,543
$(C_{21}+C_{23}+C_{25})/3C_{20}$	Прибрежно-морские водоросли Coast marine algae	–	2,684
$(C_{27}+C_{29})/3C_{20}$	Наземные растения Terrestrial plants	–	7,088
$P_{aq}=(C_{23}+C_{25})/(C_{23}+C_{25}+C_{29}+C_{31})$	Водные макрофиты Water macrophytes	–	0,269
$TAR=(C_{31}+C_{29}+C_{27})/(C_{15}+C_{17}+C_{19})$	Отношение наземных и водных источников Terrigenous/aquatic ratio	–	4,832

Одним из важнейших параметров, характеризующих органическое вещество, является содержание в его составе изоалканов, в частности пристана (Pr) и фитана (Ph). Известно, что образование пристана и фитана тесно связано с фитолом, входящим в структуру хлорофилла – зеленого пигмента растений. Отношение Pr/Ph в составе органического вещества может быть показателем окислительно-вос-

становительных условий образования РОВ, так в восстановительных условиях образуется преимущественно фитан, а в окислительных – пристан [35]. Отношение Pr/Ph в пробе озера BZ-12 соответствует значению 0,83, что указывает на восстановительные условия осадконакопления, однако для пробы BZ-13 данное отношение равно 1,7, что характерно для окислительной среды. Значения содержаний пристана и фитана не сильно различаются между собой, что свидетельствует о глубокой преобразованности ОВ, об этом же свидетельствуют значения индексов ОЕР, стремящихся к единице.

Наряду с алканами в изученных водах озер установлено наличие кислородсодержащих соединений, представленных метиловыми эфирами жирных карбоновых кислот (2,04–25,01). Метиловые эфиры стеариновой и эйкозановой кислот широко продуцируются в биосфере, и, вероятно, их присутствие в изученных водах связано с деятельностью живых организмов и их деструкцией. Также широко развитые в тундровых ландшафтах болота обеспечивают дополнительное поступление ОВ, в том числе и кислородсодержащее, в озера с поверхностным стоком.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 15-17-10009, гранта Президента РФ МК-4984.2016.5, а также при финансовой поддержке ФАНО России в рамках темы (проекта) № 0409-2015-0140

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирпотин С.Н. Полищук Ю.М., Брыксина Н.А. Динамика площадей термокарстовых озер в сплошной и прерывистой криолитозонах Западной Сибири в условиях глобального потепления // Вестник Томского государственного университета. – 2008. – № 311. – С. 185–189.
2. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of western Siberia / O.S. Pokrovsky, L.S. Shirokova, S.N. Kirpotin, S. Audry, J. Viers, B. Dupré // *Bio-geosciences*. – 2011. – V. 8. – P. 565–583.
3. Мажитова Г.Г., Каверин Д.А. Динамика глубины сезонного протаивания и осадки поверхности почвы на площадке циркулярного мониторинга деятельного слоя (CALM) в европейской части России // *Криосфера Земли*. – 2007. – № 11 (4). – С. 20–30.
4. Даувальтер В.А., Хлопцева Е.В. Гидрологические и гидрохимические особенности озер Большеземельской тундры // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2008. – Т. 11. – № 3. – С. 407–414.
5. МУК 4.1. 663–97. Методические указания Определение массовой концентрации органических соединений в воде методом хромато-масс-спектрометрии. – М.: Министерство здравоохранения России, 1997. – 4 с.
6. Орлов Д.С. Химия почв. – М.: Изд-во Московского университета, 1985. – 376 с.
7. Impact of cyanobacterial associate and heterotrophic bacteria on dissolved organic carbon and metal in moss and peat leachate: application to permafrost thaw in aquatic environments / L.S. Shirokova, J. Labouret, M. Gurge, E. Gérard, I.S. Ivanova, S.A. Zabbelina, O.S. Pokrovsky // *Aquatic Geochemistry*. – 2017. – V. 23. – № 95. – P. 1–28.
8. Растворенный органический углерод в термокарстовых озерах большеземельской тундры / Л.С. Широкова, И.С. Иванова,

Заключение

В результате проведенных исследований в водах термокарстовых озер Большеземельской тундры установлено 29 органических соединений, принадлежащих трем гомологическим рядам. Таким образом, растворенное органическое вещество в исследуемых водах состоит из сложных эфиров карбоновых кислот, углеводов алифатического и ароматического строения. Их присутствие связано, вероятно, с деятельностью живых организмов и процессом их деструкции.

Установлено, что в обоих образцах озерной воды присутствуют биогенные источники органических веществ. Так, в малом кислом озере BZ-12 среди источников ОВ доминируют гетеротрофные бактерии, водоросли. В более зрелом и менее кислом озере BZ-13 доминирующим источником ОВ являются высшие наземные растения. Доли вкладов в ОВ фитопланктона и водорослей несколько снижается, а вклад бактерий и водных макрофитов минимален. Соответственно, при развитии экосистемы озера происходит смена генезиса ОВ с автотонного на аллохтонное.

«Комплексные исследования биотических и абиотических компонентов водных экосистем водосборного бассейна Белого и юго-востока Баренцева морей».

- A.B. Чупаков, Р.М. Манасыпов, С.А. Забелина, О.С. Покровский // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах. Труды VI Всероссийского симпозиума с международным участием. – Барнаул: ИВЭП СО РАН, 2017. – С. 289–293.
9. Heterotrophic bacterioplankton in thawed lakes of the northern part of Western Siberia controls the CO₂ flux to the atmosphere / L.S. Shirokova, O.S. Pokrovsky, S.N. Kirpotin, B. Dupre // *The International Journal of Environmental Studies*. – 2009. – № 66. – P. 433–445.
10. Thermokarst lakes waters across permafrost zones of Western Siberia / R.M. Manasyrov, O.S. Pokrovsky, S.N. Kirpotin, L.S. Shirokova // *The Cryosphere*. – 2014. – V. 8. – P. 1177–1193.
11. Zhanju Lin, Jing Luo, Fujun Niu. Development of a thermokarst lake and its thermal effects on permafrost over nearly 10 yr in the Beiluhe Basin, Qinghai-Tibet Plateau // *Geosphere*. – 2016. – V. 12 (2). – P. 632–643.
12. Dissolved organic carbon, CO₂, and CH₄ concentrations and their stable isotope ratios in thermokarst lakes on the Qinghai-Tibetan Plateau / C. Mu, T. Zhang, Q. Wu, X. Peng, P. Zhang, Y. Yang, Y., Hou X. Zhang, G. Cheng // *Journal of Limnology*. – 2016. – V. 75 (2). – P. 313–319.
13. Western Siberia wetlands as indicator and regulator of climate change on the global scale / S. Kirpotin, A. Berezin, V. Bazanov, Y. Polishchuk, S. Vorobiov, N. Mironycheva-Tokoreva, N. Kosykh, I. Volkova, B. Dupre, O. Pokrovsky, A. Kouraev, E. Zakharova, L. Shirokova, N. Mognard, S. Biancamaria, J. Viers, M. Kolmakova // *International Journal of Environmental Studies*. – 2009. – № 66. – P. 409–421.
14. Содержание и распределение биогенных элементов (азот, фосфор, кремний) в термокарстовых водных объектах большеземельской тундры / А.А. Чупакова (Ершова), А.В. Чупаков, Л.С. Широкова, С.А. Забелина // Органическое вещество и

- биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Труды VI Всероссийского симпозиума с международным участием. – Барнаул: Институт водных и экологических проблем СО РАН, 2017. – С. 269–273.
15. Структура бактериопланктона термокарстовых озёр болотоземельской тундры / С.А. Забелина, Л.С. Широкова, О.Д. Ковалев, А.В. Чупаков, А.А. Чупакова // Труды Института биологии внутренних вод РАН. – 2017. – № 79 (82). – С. 58–62.
16. A 220 ka palaeoenvironmental reconstruction of the Fuentillejo maar (Central Spain) using biomarker analysis / J.E. Ortiz, L. Moreno, T. Torres, J. Vegas, B. Ruiz-Zapata, A. Garcia-Cortes, L. Galan, A. Perez-Gonzalez // Organic Geochemistry. – 2013. – V. 55. – P. 85–97.
17. Состав и структура зоопланктона термокарстовых озер Болотоземельской тундры (Ненецкий автономный округ) / Е.И. Собко, Р.М. Манасыпов, С.А. Забелина, А.В. Чупаков, А.А. Чупакова, Н.В. Шорина // Труды Института биологии внутренних вод РАН. – 2017. – № 79 (82). – С. 213–217.
18. Казыцына Л.А., Куплетская Н.Б. Применение УФ-, ИК- и ЯМР-спектроскопии в органической химии. – М.: Высшая школа, 1971. – 264 с.
19. Глебовская Е.А. Применение инфракрасной спектроскопии в нефтяной геохимии. – М.: Недра, 1971. – 140 с.
20. Артеменко А.И. Органическая химия. 5-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2002. – 559 с.
21. Geochemistry of wetland waters from the lower Tom basin, Southern Tomsk oblast / S.L. Shvartsev, M.A. Zdvizhkov, O.V. Serebrennikova, O.G. Savichev, O.S. Naimushina // Geochemistry International. – 2012. – V. 50. – № 4. – P. 367–380.
22. Origins and transformations of dissolved organic matter in large Arctic rivers / K. Kaiser, M. Canedo-Oropeza, R. McMahon, R. Amon // Scientific Reports. – 2017. – V. 7. – Article number: 13064.
23. Hunt J. Petroleum Geochemistry and Geology. 2nd revised edition. – New York: W.H. Freeman & Co Ltd., 1995. – 743 p.
24. An n-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes / K.J. Ficken, B. Li, D.L. Swain, G. Eglinton // Organic Geochemistry. – 2000. – V. 31. – P. 745–749.
25. Precise indices based on n-alkane distribution for quantifying sources of sedimentary organic matter in coastal systems / N. Chevalier, N. Savoye, S. Dubois, M. Lama Lama, V. David, P. Lecroart, K. Ménach, H. Budzinski // Organic Geochemistry. – 2015. – V. 88. – P. 69–77.
26. Сваровская Н.А. Химия нефти и газа. – Томск: ТПУ, 2006. – 111 с.
27. Влияние источника и условий торфонакопления на индивидуальный состав битуминозных компонентов торфа на примере двух низинных болот Западной Сибири / О.В. Серебренникова, Е.Б. Стрельникова, Ю.И. Прейс, М.А. Дучко // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 3. – С. 80–91.
28. Потурай В.А. Органическое вещество в холодных подземных водах районов азотных терм Приамурья // Региональные проблемы. – 2016. – Т. 19. – № 4. – С. 59–66.
29. Wilkinson G.M., Pace M.L., Cole J.J. Terrestrial dominance of organic matter in north temperate lakes // Global Biogeochemical Cycles. – 2013. – V. 27. – P. 1–9.
30. Ogura K., Machilara T., Takada H. Diagenesis of biomarkers in Biwa lake sediments over 1 million years // Organic Geochemistry. – 1990. – V. 16. – P. 805–813.
31. Состав и особенности изменения со временем водорастворимого комплекса органических веществ нефтезагрязненной водной среды / М.Г. Кульков, Ю.В. Коржов, В.Ю. Артамонов, В.В. Углев // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 193–199.
32. Simoneit B.R.T. A review of biomarker compounds as source indicators and tracers for air pollution // Environmental science and pollution research international. – 1999. – V. 6. – № 3. – P. 159–169.
33. Vertical distribution of organic compounds in the bottom sediments of two steppe lakes in southern Siberia / O.V. Serebrennikova, I.V. Russkikh, E.B. Strel'nikova, E.A. El'chaninova, P.B. Kadychagov // Water resources. – 2017. – V. 44. – № 5. – P. 774–783.
34. Формирование состава органических веществ в малых озерах Западной Сибири / Л.П. Паничева, Т.И. Моисеенко, Т.А. Коемлева, С.С. Волкова // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. – 2015. – Т. 1. – № 1 (1). – С. 151–163.
35. Тиссо Б., Вельте Д. Образование и распространение нефти и газа. – М.: Мир, 1981. – 501 с.

Поступила 23.11.2017 г.

Информация об авторах

Иванова И.С., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории пресноводных и морских экосистем Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова РАН; старший научный сотрудник лаборатории гидрогеохимии и геоэкологии Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Король И.С., кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории физико-химических исследований керны и пластовых флюидов Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент отделения контроля и диагностики Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Широкова Л.С., кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории пресноводных и морских экосистем Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова РАН.

Покровский О.С., кандидат геолого-минералогических наук, директор по научно-исследовательской работе Лаборатории георесурсов и окружающей среды г. Тулузы, Национальный центр научных исследований Франции; ведущий научный сотрудник лаборатории пресноводных и морских экосистем Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова РАН.

UDC 550.47

STRUCTURAL-GROUP COMPOSITION OF DISSOLVED ORGANIC MATTER IN WATERS OF THERMOKARST LAKES OF BOL SHEZEMELSKAYA TUNDRA

Irina S. Ivanova^{1,2},
IvanovaI_1986@mail.ru

Irina S. Korol^{2,3},
irinakorol@yandex.ru

Lyudmila S. Shirokova¹,
lshirocova@yandex.ru

Oleg S. Pokrovsky^{4,1},
oleg.pokrovsky@get.omp.eu

¹ Institute of Ecological Problem of the North,
23, Naberezhnaya Severnoy Dviny, Arkhangelsk, 163000, Russia.

² Tomsk branch of the Trofimuk institute of petroleum geology and geophysics
of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
4, Akademicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russia.

³ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

⁴ University of Toulouse,
14, Avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

The relevance of the research is related to the intensive economic development of the Arctic part of the European North of Russia, which entails a sharp increase in anthropogenic pressure on vulnerable ecosystems of the Far North. At climate warming, melting of permafrost can provoke the formation of new thermokarst lakes and subsidence, which in its turn facilitates the removal of organic matter from peat into natural environments.

The main aim is to reveal the features of composition of dissolved organic matter and its possible sources in the waters of thermokarst lakes of the Bolshezemelskaya tundra (near Naryn-Mar), with different water-mirror areas and at different stages of evolution.

Methods. Analysis of the dissolved organic matter content in the waters of thermokarst lakes was carried out in the laboratory of geo-resources and the environment of Toulouse by the method of complete burning of dissolved organic carbon. In the laboratory of physicochemical methods of analysis of the Institute of Petroleum Chemistry of the SB RAS (Tomsk), by a three-step extraction at various pH the chloroformed concentrates were obtained. They contain dissolved organic matter. Organic structures were studied by Infrared spectroscopy. The structural-group composition of dissolved organic matter was determined by gas chromatography–mass spectrometry method.

Results. Organic compounds in the waters of thermokarst lakes of Bolshezemelskaya tundra are mainly represented by hydrocarbons of aliphatic structure, carboxylic acid esters and aromatic compounds belonging to three homologous series. It was found, that low-molecular n-alkanes predominate in the small acid lake BZ-12, the main sources are bacteria, lower plants (unicellular algae) and phytoplankton. In the more mature and less acidic lake BZ-13, the main contribution belongs to higher terrestrial plants and coast marine algae. Phytoplankton also plays an important role in enriching water with dissolved organic matter. Accordingly, with evolution of the lake ecosystem during recycling of a layer of peat sediments, the organic matters in waters are changed from the autochthonous to the allochthonous.

Key words:

Bolshezemelskaya tundra, thermokarst lakes, dissolved organic matter, carbon, alkanes.

The research was supported by the Russian Science Foundation, projects No. 15–17–10009 and by the grant of the President of the Russian Federation MK-4984.2016.5, as well as with the financial support of the FASO Russia within the framework of the project No. 0409–2015–0140 «Complex researches of biotic and abiotic components of aquatic ecosystems in the catchment area of the White sea and southeast of the Barents Sea».

REFERENCES

1. Kirpotin S.N., Polishchuk Yu.M., Bryksina N.A. Thermokarst lakes square dynamics of West Siberian continuous and discontinuous permafrost under impact of global warming. *Vestnik Tomsk State University*, 2008, no. 311, pp. 185–189. In Rus.
2. Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Audry S., Viers J., Dupré B. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of western Siberia. *Biogeosciences*, 2011, vol. 8. pp. 565–583.
3. Mazhitova G.G., Kaverin D.A. Dynamics of the depth of seasonal thawing and sedimentation of the soil surface at the circumpolar monitoring of the active layer (CALM) in the European part of Russia. *Cryosphere of the Earth*, 2007, no. 11 (4), pp. 20–30. In Rus.

4. Dauvalter V.A., Khloptseva E.V. Hydrological and hydrochemical features of lakes of Bolshezemelskaya tundra. *Bulletin of Murmansk State Technical University*, 2008, vol. 11, no. 3, pp. 407–414. In Rus.
5. MUK 4.1. 663–97. «Metodicheskiye ukazaniya. Opreделение massovoy kontsentratsii organicheskikh soedineniy v vode metodom khromato-mass-spektrometrii» [MUK 4.1. 663–97. Methodical instructions. Determination of the mass concentration of organic compounds in water by chromatography-mass spectrometry]. Moscow, Ministry of Health of Russia, 1997. 4 p.
6. Orlov D.S. *Khimiya pochvy* [Chemistry of soils]. Moscow, Moscow University Publ. house, 1985. 376 p.
7. Shirokova L.S., Labouret J., Gurge M., Gérard E., Ivanova I.S., Zabelina S.A., Pokrovsky O.S. Impact of cyanobacterial associate and heterotrophic bacteria on dissolved organic carbon and metal in moss and peat leachate: application to permafrost thaw in aquatic environments. *Aquatic Geochemistry*, 2017, vol. 23, Iss. 95, pp. 1–28.
8. Shirokova L.S., Ivanova I.S., Chupakov A.V., Manasypov R.M., Zabelina S.A., Pokrovsky O.S. Rastvorenniy organicheskiy uglevod v termokarstovykh ozerakh Bolshezemelskoy tundry [Dissolved organic carbon in thermokarst lakes of Bolshezemelskaya tundra]. *Organicheskoe veshchestvo i biogennyye elementy vo vnutrennikh vodoyemakh i morskikh vodakh. Trudy VI Vserossiyskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiyem* [Organic matter and biogenic elements in inland waters and sea waters. Procedia of the VI All-Russian Symposium with International Participation]. Barnaul, IWEP SB RAS, 2017. pp. 289–293.
9. Shirokova L.S., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N. and Dupre B. Heterotrophic bacterioplankton in thawed lakes of the northern part of Western Siberia controls the CO₂ flux to the atmosphere. *The International Journal of Environmental Studies*, 2009, vol. 66, pp. 433–445.
10. Manasypov R.M., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Shirokova L.S. Thermokarst lakes waters across permafrost zones of Western Siberia. *The Cryosphere*, 2014, vol. 8, pp. 1177–1193.
11. Zhanju Lin, Jing Luo, Fujun Niu. Development of a thermokarst lake and its thermal effects on permafrost over nearly 10 yr in the Beiluhe Basin, Qinghai-Tibet Plateau. *Geosphere*, 2016, vol. 12, Iss. 2, pp. 632–643.
12. Mu C., Zhang T., Wu Q., Peng X., Zhang P., Yang Y., Hou Y., Zhang X., Cheng G. Dissolved organic carbon, CO₂, and CH₄ concentrations and their stable isotope ratios in thermokarst lakes on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Limnology*, 2016, vol. 75, Iss. 2, pp. 313–319.
13. Kirpotin S., Berezin A., Bazanov V., Polishchuk Y., Vorobiov S., Mironycheva-Tokoreva N., Kosykh N., Volkova I., Dupre B., Pokrovsky O., Kouraev A., Zakharova E., Shirokova L., Mognard N., Biancamaria S., Viers J., Kolmakova M. Western Siberia wetlands as indicator and regulator of climate change on the global scale. *International Journal of Environmental Studies*, 2009, no. 66, pp. 409–421.
14. Chupakova (Ershova) A.A., Chupakov A.V., Shirokova L.S., Zabelina S.A. Soderzhanie i raspredelenie biogennykh elementov (azot, fosfor, kremniy) v termokarstovykh vodnykh ob'yektakh Bolshezemelskoy tundry [Content and distribution of biogenic elements (nitrogen, phosphorus, silicon) in thermokarst water bodies of Bolshezemelskaya tundra]. *Organicheskoe veshchestvo i biogennyye elementy vo vnutrennikh vodoyemakh i morskikh vodakh. Trudy VI Vserossiyskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiyem* [Organic matter and biogenic elements in inland waters and sea waters. Procedia of the VI All-Russian Symposium with International Participation]. Barnaul, IWEP SB RAS, 2017. pp. 269–273.
15. Zabelina S.A., Shirokova L.S., Kovalev O.D., Chupakov A.V., Chupakova A.A. Structure of bacterioplankton of thermokarst lakes of the Bolshezemelskaya tundra. *Transactions of Institute of Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences*, 2017, Iss. 79 (82), pp. 58–62. In Rus.
16. Ogura K., Machilara T., Takada H. Diagenesis of biomarkers in Biwa lake sediments over 1 million years. *Organic Geochemistry*, 1990, vol. 16, pp. 805–813.
17. Sobko E.I., Manasypov R.M., Zabelina S.A., Chupakov A.V., Chupakova A.A., Shorina N.V. Composition and structure of zooplankton in thermokarst lakes of Bolshezemelskaya tundra (Nenets autonomous area, Russia). *Transactions of Institute of Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences*, 2017, Iss. 79 (82), pp. 213–217. In Rus.
18. Kazitsyna L.A., Kupletskaya N.B. *Primeneniye UF-, IR- i YAMR-spektroskopii v organicheskoy khimii* [Application of UV, IR and NMR spectroscopy in organic chemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1971. 264 p.
19. Glebovskaya E.A. *Primenenie infrakrasnoy spektrometrii v neftyanoy geokhimii* [Application of infrared spectrometry in petroleum geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1971. 140 p.
20. Artemenko A.I. *Organicheskaya khimiya* [Organic Chemistry], Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002. 559 p.
21. Shvartsev S.L., Zdvizhkov M.A., Serebrennikova O.V., Savichev O.G., Naimushina O.S. Geochemistry of wetland waters from the lower Tom basin, Southern Tomsk oblast. *Geochemistry International*, 2012, vol. 50, no. 4, pp. 367–380.
22. Kaiser K., Canedo-Oropeza M., McMahon R., Amon R. Origins and transformations of dissolved organic matter in large Arctic rivers. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, article number: 13064.
23. Hunt J. *Petroleum Geochemistry and Geology*. 2nd revised ed. New York, W.H. Freeman & Co Ltd., 1995. 743 p.
24. Ficken K.J., Li B., Swain D.L., Eglinton G. An n-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes. *Organic Geochemistry*, 2000, vol. 31, pp. 745–749.
25. Chevalier N., Savoye N., Dubois S., Lama Lama M., David V., Lacroix P., Ménach K., Budzinski H. Precise indices based on n-alkane distribution for quantifying sources of sedimentary organic matter in coastal systems. *Organic Geochemistry*, 2011, vol. 88, pp. 69–77.
26. Svarovskaya N.A. *Khimiya nefi i gaza* [Chemistry of oil and gas]. Tomsk, TPU Publ. house, 2006. 111 p.
27. Serebrennikova O.V., Strelnikova E.B., Preis Yu.I., Duchko M.A. Influence of source and condition of peat accumulation on composition of peat bitumen from two fen mires of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Chemistry and chemical technology*, 2014, vol. 325, no. 3, pp. 80–91. In Rus.
28. Poturay V.A. Organic matter in underground waters of the Amur Region geothermal fields. *Regional problems*, 2016, vol. 19, no. 4, pp. 59–66. In Rus.
29. Wilkinson G.M., Pace M.L., Cole J.J. Terrestrial dominance of organic matter in north temperate lakes. *Global Biogeochemical Cycles*, 2013, vol. 27, pp. 1–9.
30. Kulkov M.G., Korzhov Yu.V., Artamonov V.Yu., Uglev V.V. Structure and features of changing in time of organic substance water-soluble complex in oil polluted water environment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 193–199. In Rus.
31. Simoneit B.R.T. A review of biomarker compounds as source indicators and tracers for air pollution. *Environmental science and pollution research international*, 1999, vol. 6, no. 3, pp. 159–169.
32. Ortiz J.E., Moreno L., Torres T., Vegas J., Ruiz-Zapata B., Garcia-Cortes A., Galan L., Perez-Gonzalez A. A 220 ka palaeoenvironmental reconstruction of the Fuentillejo maar (Central Spain) using biomarker analysis. *Organic Geochemistry*, 2013, vol. 55, pp. 85–97.
33. Serebrennikova O.V., Russkikh I.V., Strelnikova E.B., El'chaninova E.A., Kadychagov P.B. Vertical distribution of organic compounds in the bottom sediments of two steppe lakes in southern Siberia. *Water resources*, 2017, vol. 44, no. 5, pp. 774–783.

34. Panicheva L.P., Moiseenko T.I., Kremleva T.A., Volkova S.S. Formation of the composition of organic substances in small lakes of Western Siberia. *Bulletin of the Tyumen State University. Ecology and nature management*, 2015, vol. 1, no. 1 (1), pp. 151–163. In Rus.
35. Tissot B., Welte D. *Obrazovanie i rasprostranenie nefi i gaza* [Formation and propagation of oil and gas]. Moscow, Mir Publ., 1981. 501 p.

Received: 23 November 2017.

Information about the authors

Irina S. Ivanova, Cand. Sc., senior researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Institute of Ecological Problem of the North; senior researcher, Tomsk branch of the Trofimuk institute of petroleum geology and geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

Irina S. Korol, Cand. Sc., researcher, Tomsk branch of the Trofimuk institute of petroleum geology and geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Lyudmila S. Shirokova, Cand. Sc., leading researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Institute of Ecological Problem of the North.

Oleg S. Pokrovsky, Cand. Sc., research director, GET (Geosciences and Environment Toulouse) UMR 5563, CNRS, University of Toulouse; leading researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Institute of Ecological Problem of the North.

УДК 332.628

КЛАССИФИКАЦИЯ НАСЕЛЁННЫХ ПУНКТОВ ПО УРОВНЮ РАЗВИТОСТИ РЫНКА ЗЕМЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЖИЛОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Быкова Елена Николаевна¹,
vilena@spmi.ru

Балтыжакова Татьяна Игоревна¹,
tatiyana.baltyzhakova@gmail.com

Волкова Яна Александровна¹,
yana.docenko@inbox.lv

¹ Санкт-Петербургский горный университет,
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2.

Актуальность исследования обосновывается высокой степенью влияния недостаточного количества рыночных исходных данных на результаты кадастровой оценки, что является значимой проблемой при работе с населёнными пунктами с небольшим количеством сделок. В статье представлено обоснование идеи о дифференцированном подходе к кадастровой оценке в условиях разной развитости рынка в населённых пунктах России.

Цель исследования: обоснование необходимости дифференцированного подхода к кадастровой оценке в условиях разной развитости сектора рынка «земли для индивидуального жилого строительства» в населённых пунктах России. Для достижения этой цели в рамках исследования предлагается классифицировать населённые пункты России по уровню развитости рынка земель.

Объектом исследования являются населённые пункты РФ, в которых в период с 1 января 2011 по 31 декабря 2015 г. зарегистрированы сделки с землями индивидуального жилого строительства.

Результаты. Разработана классификация населённых пунктов по уровню развитости рынка, которая является основой для создания методики кадастровой оценки земель в условиях малоразвитого рынка. Населённые пункты были разделены на три группы: населённые пункты с развитым рынком земельных участков для индивидуального жилого строительства – более 129 сделок купли-продажи в год и в среднем – более 700 за указанный период; населённые пункты с условно развитым рынком земельных участков для индивидуального жилого строительства – те населённые пункты, где количество сделок распределено неравномерно: от 10 до 150 сделок в год, в среднем за период около 300; Населённые пункты с малоразвитым рынком земельных участков для индивидуального жилого строительства – до 10 сделок в год, в среднем за весь оцениваемый период не более 50. Из чего можно сделать вывод, что идея о дифференцированном подходе к кадастровой оценке является обоснованной.

Ключевые слова:

Кадастровая оценка, налоги, индивидуальное жилое строительство, классификация населённых пунктов, метод к-средних.

Введение

В современной России в основе понятия «кадастровая стоимость» лежит концепция рыночной стоимости объекта недвижимости, определённой методами массовой оценки. Реализация такого подхода требует большого объёма информации о важнейших характеристиках объектов и данных о сделках купли-продажи на оцениваемой территории. В последние годы исследователи всё чаще отмечают, что недостаточная точность результатов кадастровой оценки вызвана не только низким качеством исходных данных, но и, в первую очередь, их недостаточным количеством.

В соответствии с градостроительными регламентами, жилая зона является базовой в составе земель населённых пунктов, в связи с чем основное бремя налогообложения ложится на плечи владельцев жилой недвижимости. Тогда как земельные участки, входящие в состав имущества многоквартирного дома, полностью освобождены от налогообложения, собственникам земель индивидуального жилого строительства (ИЖС) приходится платить налог в полном объёме [1].

Эта проблема приобретает чрезвычайную актуальность в связи с ростом заинтересованности

граждан переездом из центров больших городов на окраины, о чём свидетельствует устойчивое увеличение количества вводимых в эксплуатацию объектов ИЖС [2]. Данный факт обосновывает выбор в качестве объекта исследования именно земельные участки с видом разрешённого использования ИЖС.

Сопоставление удельных показателей кадастровой стоимости (УПКС) (стоимости 1 м²) с удельными показателями рыночной стоимости (УПРС) земельных участков индивидуального жилого строительства в населённых пунктах показывает, что кадастровая стоимость земельных участков, в большинстве случаев, выше рыночной в среднем на 30 % (рис. 1), что определяет превышение земельного налога в этом соотношении.

Тема результатов кадастровой оценки всё чаще поднимается средствами массовой информации, которые внушают властям намерение нечестно пополнить казну. Рядовые граждане-собственники объектов недвижимости выражают своё несогласие при помощи обращений в суды (рис. 2) и в территориальные комиссии Росреестра (рис. 3) с целью пересмотра результатов кадастровой оценки [3].



Рис. 1. Сопоставление УПКС и УПРС земельных участков индивидуального жилого строительства в населённых пунктах Ненецкого АО, Республики Коми и Калининградской области

Fig. 1. Correlation between specific indicators of cadastral cost (SICC) and specific indicators of market cost (SIMC) for land properties in Nenets Autonomous District, Komi Republic and Kaliningrad region

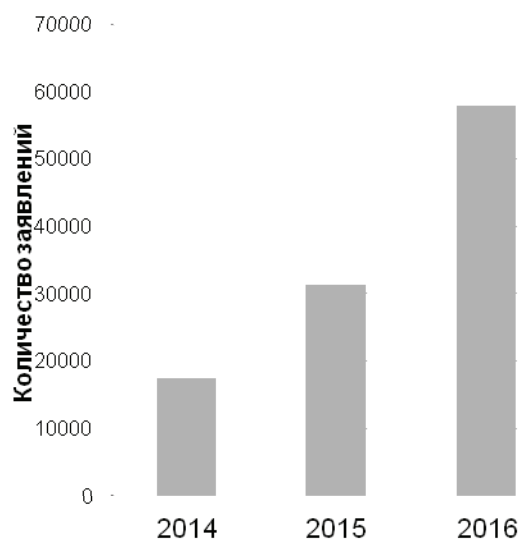


Рис. 2. Статистика обращения граждан в комиссии при территориальных органах Росреестра с целью пересмотра кадастровой стоимости недвижимого имущества за 2014–2016 гг.

Fig. 2. Statistics for citizens' petitions to commissions within Rosreestr local areas for reviewing real estate cadastral costs for 2014–2016

Совершенствованию методического обеспечения кадастровой оценки с целью уточнения её результатов посвятили свои работы А.А. Варламов, С.В. Грибовский, О.Ю. Лепихина, Л.А. Лейфер и многие другие отечественные учёные и практики. Анализ международного опыта методик кадастро-

вой оценки (или её аналогов) показал высокую актуальность направления и в других странах. Особенно стоит отметить работы Р. Борста (США), Д. Вельда (Нидерланды), Т. Кауко (Финляндия), Н. Синяка (Белоруссия).



Рис. 3. Статистика судебных споров в отношении результатов определения кадастровой стоимости объектов недвижимости за 2011–2016 гг.

Fig. 3. Statistics for legal cases on the results of real estate cadastral costs for 2011–2016

Исследователями всё чаще предлагаются технологически новые и нетривиальные методы определения стоимости методами массовой оценки, од-

нако по-прежнему остаются не разработанными направления оценки при дефиците исходных данных.

Уже на предварительных этапах исследования было выявлено, что проблема недостаточного количества исходных данных о ценах сделок купли-продажи земель ИЖС характерна для значительного количества населённых пунктов в России. В первую очередь, это населённые пункты, удалённые от центров субъектов РФ, и населённые пункты, не относящиеся ни к одной из агломераций, – там количество производимых сделок минимально. Кроме того, зачастую совершённая сделка в таких населённых пунктах не отражает реальную рыночную ситуацию и, как следствие, не должна использоваться для определения кадастровой стоимости.

Исходя из текущего положения, объективно можно сформулировать основную цель исследования – обоснование необходимости дифференцированного подхода к кадастровой оценке в условиях разной развитости сектора рынка «земли ИЖС» в населённых пунктах России. Для достижения этой цели в рамках исследования впервые предлагается классифицировать населённые пункты России по уровню развитости рынка земель.

Методы и материалы

Подготовка исходных данных

Как уже было сказано ранее, исходными данными для кадастровой оценки являются значения факторных признаков и сведения мониторинга сделок купли-продажи. Традиционные методики требуют большого объёма исходных данных для построения статистически значимой модели кадастровой стоимости, что вынуждает оценщиков

прибегать к использованию цен предложений, информации по другим видам разрешённого использования, а также рассчитывать единый для всего населённого пункта УПКС в случаях, когда это не обусловлено единообразием условий рынка [4–7]. Классификация по уровню развитости рынка недвижимости позволит определить положение населённого пункта в классификации и, в свою очередь, подобрать метод оценки, соответствующий конкретным рыночным условиям.

Для разработки классификации была собрана информация о сделках купли-продажи земель ИЖС по всем населённым пунктам Российской Федерации, сведения о которых имеются в автоматизированной информационной системе «Мониторинг рынка недвижимости».

В рамках исследования было изучено более 20000 населённых пунктов различного типа. Информация о зарегистрированных сделках купли-продажи земельных участков индивидуального жилого строительства была собрана для почти 7000 населённых пунктов за период с 1 января 2011 г. по 1 января 2016 г. Временной интервал обоснован периодом действия результатов предыдущей кадастровой оценки недвижимого имущества, которая производилась в 2011–2012 гг. (в зависимости от региона). На момент исследования не были опубликованы в полном объёме данные о сделках за 2016 г., поэтому информация за этот период не использовалась.

Поскольку развитость рынка в пределах населённых пунктов РФ может зависеть не только от количества сделок за определённый период, в качестве дополнительного параметра классификации было решено использовать плотность населения. В связи с этим была выдвинута гипотеза о

Таблица 1. Исходные данные для классификации населённых пунктов России по уровню развитости рынка земельных участков индивидуального жилого строительства (фрагмент)

Table 1. Basic data for classifying Russian inhabited localities by individual residential construction (IRC) land property market development (fragment)

Субъект Российской Федерации Subject of the Russian Federation	Населённый пункт Inhabited locality	Количество зарегистрированных сделок (за год) Number of registered deals (per year)						Плотность населения чел./км ² Population density (person per 1 km ²)
		2011	2012	2013	2014	2015	Всего за пять лет Total for five years	
Ивановская область/Ivanovo region	Лух/Lukh	0	2	0	0	0	2	952,34899
Ингушетия/Ingushetia	Магас/Magas	0	0	0	1	0	1	544,73476
Волгоградская область/Volgograd region	Манойлин/Manoylin	0	5	0	0	0	5	2,8557867
Владимирская область/Vladimir region	Меленки/Melenki	80	47	18	12	28	185	1290,0000
Кемеровская область/Kemerovo region	Мыски/Myski	98	70	45	126	39	570	385,81417
Хабаровский край Khabarovsk region	Некрасовка Nekrasovka	0	5	1	1	0	7	6738,48440
Ханты-Мансийский АО Khanty-Mansiysk Autonomous Region	Нижневартовск Nizhnevartovsk	5	8,0	2	8	0	23	998,25667
Свердловская область Sverdlovsk region	Нижний Тагил Nyzhniy Tagil	0	0	1	0	0	2	1199,62290
Томская область Tomsk region	Томск/Tomsk	515	574	170	339	67	1665	1944,13
Томская область Tomsk region	Стрежевой Strezhevoy	3	4	1	4	0	10	754,7984

том, что количество сделок связано с плотностью населения. Такое предположение обосновано тем, что:

Во-первых, конкуренция за земельные участки в населенных пунктах зависит от численности населения, которая тем выше, чем привлекательнее населенный пункт.

Во-вторых, увеличение численности населения и инвестиционной привлекательности населенного пункта влечет его развитие в пространственном отношении, то есть способствует увеличению площади в границах.

Исходя из вышесказанного в качестве исходных данных в работе, кроме данных мониторинга сделок купли-продажи, использовалась информация о площади и количестве жителей в населённых пунктах. На основании этой информации рассчитана плотность населения для 1007 населённых пунктов из исходной выборки (табл. 1).

Для проверки гипотезы связи между развитостью рынка земельных участков и плотностью населения была построена матрица корреляции (табл. 2).

Для проверки связи между количеством зарегистрированных сделок и плотностью населения был рассчитан линейный коэффициент корреляции Пирсона [4], описываемый формулой (1).

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где x_i и y_i – объекты выборок $x^m=(x_1,...,x_m)$, $y^m=(y_1,...,y_m)$; $\bar{x}$ и $\bar{y}$ – выборочные средние [8].

Выявлено, что связь между плотностью населения и количеством сделок купли-продажи земельных участков отсутствует, так как коэффициенты корреляции между этими признаками менее 0,1 (табл. 2).

В связи с этим использование плотности населения как параметра классификации является нецелесообразным, поэтому в качестве исходных данных выступает исключительно количество за-

регистрированных сделок купли-продажи (по годам). По итогам сбора и подготовки информации была сформирована выборка из 6926 объектов.

Предварительный анализ данных

Все расчеты и визуализация результатов выполнялись в системе статистических вычислений R. Это открытая программная среда, которая поддерживает широкий спектр методов обработки и визуализации данных [9].

Для аналитического осмысления исходной информации и оценки ее распределения на этапе предварительного анализа исходных данных были построены гистограммы распределения количества зарегистрированных сделок купли-продажи по годам (рис. 4–8). При этом для построения гистограммы определена ее ширина на основе размаха вариации ($R=664$) и ширина интервала ($h=2$). На оси X отложены интервалы числа сделок, а по оси Y – частота, т. е. количество населенных пунктов, попавших в данный интервал.

Прежде всего следует отметить, что согласно эмпирическим распределениям на построенных графиках, число зарегистрированных сделок купли-продажи по годам стабильно, т. е. незначительно изменяется. Кроме того, в большинстве рассматриваемых населенных пунктов количество сделок в течение года невелико. В значительном числе населённых пунктов совершается до 10 сделок в год. Меньше всего городов, в которых происходит более 100 сделок в год. Таким образом, можно предположить, что населенные пункты по уровню развитости рынка делятся на две группы: от 0 до 10 сделок в год и от 11 до 664.

Переход к обобщенным показателям развитости рынка

Рассматриваемые данные о количестве сделок обладают высокой корреляцией (табл. 2), что может привести к некорректным результатам при их анализе. Кроме того, такая тесная связь между признаками затрудняет наглядное отображение результатов. Поэтому было принято решение о переходе к обобщенным показателям развитости рынка с помощью метода анализа главных компонент.

Таблица 2. Матрица корреляции между уровнем развитости рынка и плотностью населения

Table 2. Correlation matrix between market development and population density

Количество зарегистрированных сделок (за год) Number of registered deals (per year)	Количество зарегистрированных сделок (за год) Number of registered deals (per year)						Плотность населения Population density
	2011	2012	2013	2014	2015	Всего за 5 лет Total for 5 years	
2011	1,0000	0,9484	0,8462	0,8151	0,7864	0,9456	–0,0068
2012		1,0000	0,8546	0,8128	0,7859	0,9407	–0,0069
2013			1,0000	0,9361	0,8943	0,9295	0,0016
2014				1,0000	0,8985	0,9110	0,0091
2015					1,0000	0,8882	–0,0014
Всего за 5 лет/Total for 5 years						1,0000	–0,0024
Плотность населения Population density							1,0000

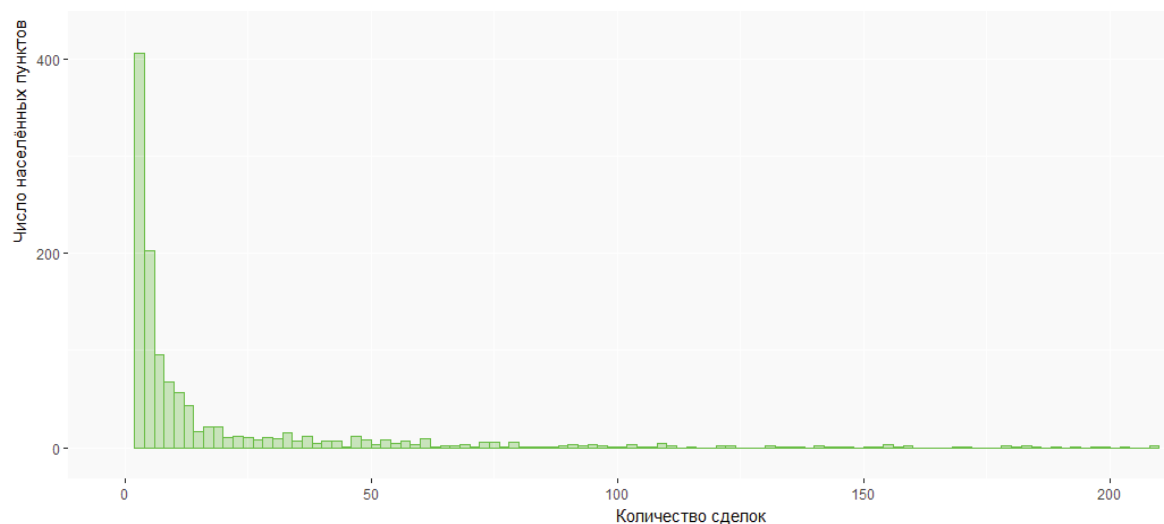


Рис. 4. Гистограмма распределения количества сделок за 2011 г.

Fig. 4. Histogram of allocation of a number of deals for 2011

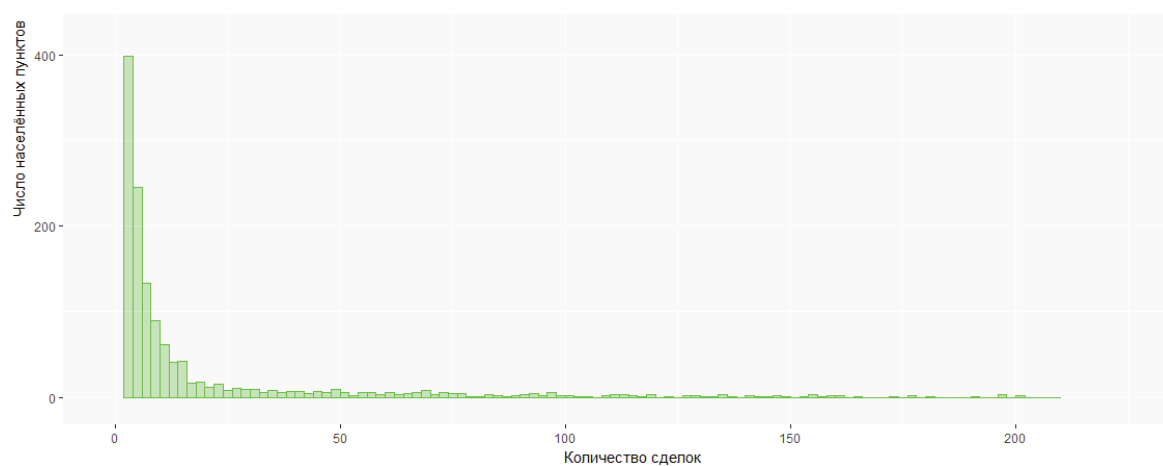


Рис. 5. Гистограммы распределения количества сделок за 2012 г.

Fig. 5. Histogram of allocation of a number of deals for 2012

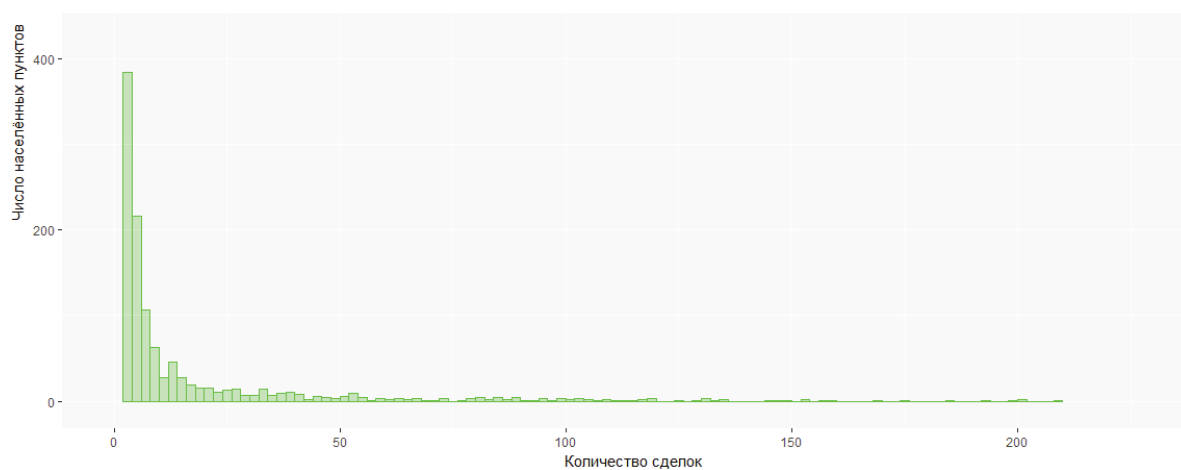


Рис. 6. Гистограмма распределения количества сделок за 2013 г.

Fig. 6. Histogram of allocation of a number of deals for 2013

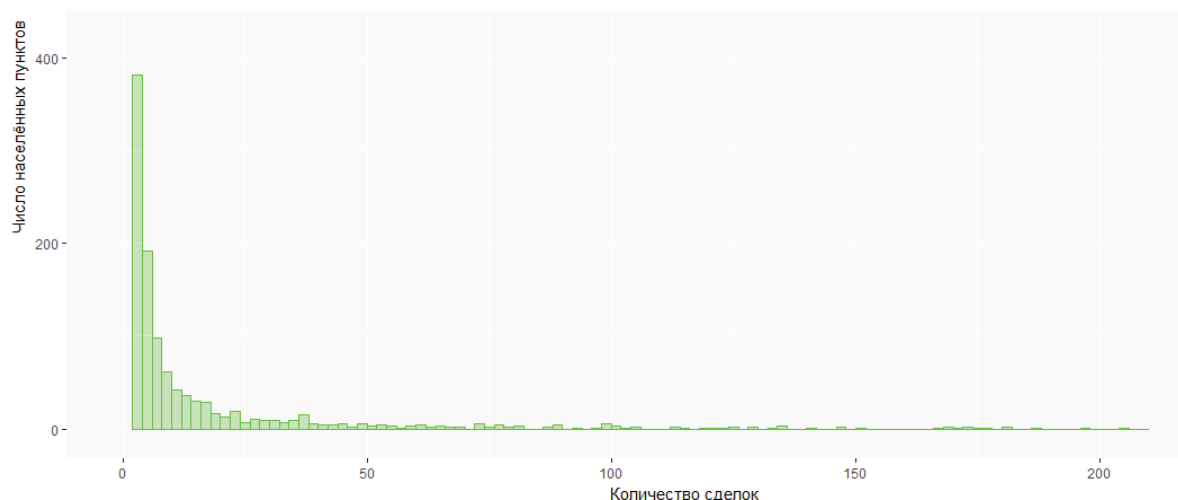


Рис. 7. Гистограмма распределения количества сделок за 2014 г.

Fig. 7. Histogram of allocation of a number of deals for 2014

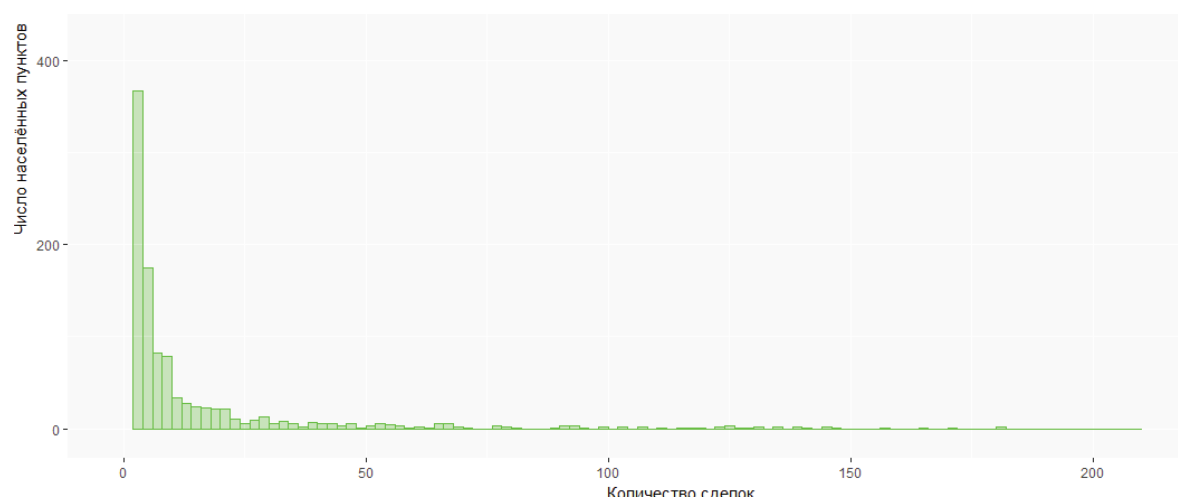


Рис. 8. Гистограмма распределения количества сделок за 2015 г.

Fig. 8. Histogram of allocation of a number of deals for 2015

Этот метод является одной из разновидностей методов классификации и факторного анализа и, как правило, применяется тогда, когда есть необходимость выявить независимые друг от друга факторы (компоненты), максимально точно описывающие данные без потери информации, и сократить размерность данных.

Метод анализа главных компонент построен на основе линейных преобразований систем координат. Исходными показателями в данном случае являются значения количества сделок по годам. На основании полученного облака данных выбирается направление, соответствующее максимальному разбросу данных, – эта ось становится первой главной компонентой, вторая главная компонента задается как перпендикулярная первой. Таким образом, происходит разворот осей и переход к новой системе независимых показателей, которые максимально точно описывают данные.

Формально метод описывается с помощью формулы (2) [10].

$$X = TP^t + E = \sum_{a=1}^A t_a p_a^t + E, \quad (2)$$

где X – матрица исходных данных; T – матрица счетов (scores), ее размерность $(I \times A)$; P – матрица нагрузок (loadings), ее размерность $(J \times A)$; E – матрица остатков, размерностью $(I \times J)$.

Новые переменные t_a называются главными компонентами (Principal Components).

Матрица счетов T дает проекции исходных образцов (J -мерных векторов $x_1, \dots, x_I$) на подпространство главных компонент (A -мерное). Строки $t_1, \dots, t_I$ матрицы T – это координаты образцов в новой системе координат. Столбцы $t_1, \dots, t_A$ матрицы T ортогональны и представляют проекции всех образцов на одну новую координатную ось.

Матрица нагрузок P – это матрица перехода из исходного пространства переменных $x_1, \dots, x_J$ (J -мерного) в пространство главных компонент (A -мерное). Каждая строка матрицы P состоит из коэффициентов, связывающих переменные t и x .

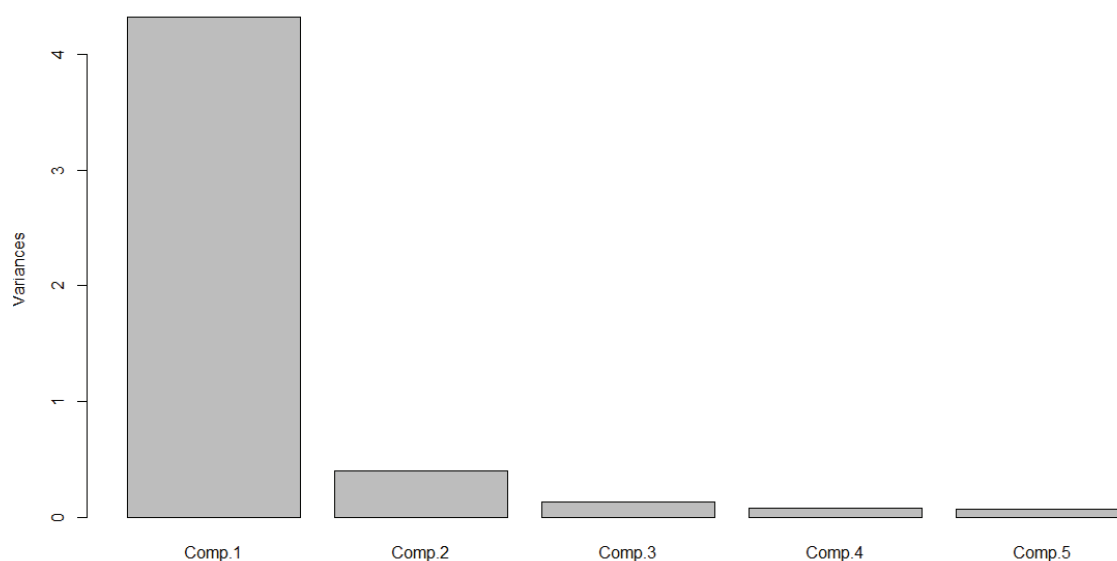


Рис. 9. Служебный график анализа главных компонент

Fig. 9. Support diagram showing the principal component analysis

Например, a -я строка – это проекция всех переменных $x_1, \dots, x_j$ на a -ю ось главных компонент. Каждый столбец P – это проекция соответствующей переменной x_j на новую систему координат [9, 11].

Особенностью реализации этого метода в R является то, что количество полученных компонент равно количеству исходных признаков. Необходимое же количество компонент определяется на основе уровня объясненной вариации данных, то есть на основе того, какой процент разброса данных объясняет каждая компонента. Самой значимой всегда является компонента под номером один, так как она вводится по направлению максимального разброса данных.

Рассмотрим служебный график, показывающий вклады каждой компоненты (рис. 9).

На графике видно, что компонент, как и факторов, пять, однако основной вклад вносят первые две. Величины дисперсий и объясненной вариации каждой компоненты приведены в табл. 3.

Таблица 3. Характеристики главных компонент

Table 3. Characteristics of principal components

Характеристики Values	Номера компонент Numbers of the components				
	C_I	C_{II}	C_{III}	C_{IV}	C_V
Дисперсия компоненты Component dispersion	2,0400	0,6947	0,3861	0,3495	0,2908
Доля в вариации Variative fraction	0,8323	0,0965	0,0298	0,0244	0,01690
Кумулятивная доля Cumulative fraction	0,8323	0,9288	0,9587	0,9831	1,0000

Из рис. 9 и табл. 3 видно, что максимальное влияние на результат оказывают первые две компоненты, поэтому при необходимости можно ограничиться только ими. Однако, так как в данном

исследовании нет необходимости в сокращении размерности, для дальнейших расчетов были использованы все пять компонент.

Для перехода от исходных показателей к компонентам применяется матрица нагрузок. Полученная матрица нагрузок приведена в табл. 4.

Таблица 4. Матрица нагрузок

Table 4. Loading matrix

	Компонента/Component				
	1	2	3	4	5
2011	-0,443	0,537	-0,171	0,101	-0,691
2012	-0,451	0,454	-0,209	0,172	0,719
2013	-0,464		0,503	-0,727	
2014	-0,428	-0,593	-0,661	-0,165	
2015	-0,449	-0,392	0,488	0,636	

Из матрицы нагрузок видно, что почти все исходные показатели влияют на первые две компоненты, причем величина этого влияния невелика. Это обусловлено, прежде всего, высоким уровнем корреляции между исходными показателями.

Выбор метода классификации

Одной из основных задач исследования является определение количества групп населенных пунктов по уровню развитости рынка и интервалов значений каждой группы. Такие задачи решаются с применением методов классификации.

Метод классификации выбирается с учетом имеющихся исходных данных, а также решаемой в исследовании задачи. В том случае, если есть объекты с известной принадлежностью к группам, либо есть информация о распределении наблюдений внутри классов, применяются методы классификации с обучением. В прочих случаях используются методы классификации без обучения.

Основными методами классификации без обучения являются методы кластеризации и метод главных компонент. Для решения поставленной задачи оптимальными являются методы кластеризации, так как неизвестна принадлежность объектов к конкретным классам (группам) и необходимо определить параметры классов.

Методы кластеризации делятся на две основные группы: иерархические и последовательные методы. Первая группа методов применяется в том случае, если предполагается иерархия групп и при анализе небольшой выборки (до 150 объектов). Во всех остальных случаях более эффективными являются последовательные методы кластеризации.

Последовательные алгоритмы кластеризации являются итеративными и применяются для больших массивов данных, так как они позволяют производить расчеты для небольших групп объектов на каждой итерации.

Среди методов последовательной кластеризации стоит выделить метод k -средних, который можно отнести к наиболее традиционным и развиваемым алгоритмам. Его достоинствами являются: прозрачность алгоритма, высокая линейная скорость работы и эффективная обработка больших объёмов данных [12].

Алгоритм метода k -средних состоит из следующих шагов:

- 1) случайным образом выбирается k центров кластеров;
- 2) каждый объект приписывается к ближайшему центру;
- 3) производится пересчет центров кластеров как среднее значение параметров всех объектов, попавших в определенный кластер;
- 4) каждый объект приписывается к ближайшему центру кластера.

Шаги 3 и 4 повторяются до тех пор, пока центры кластеров не перестанут изменяться при пересчете или пока не будет достигнуто максимально возможное количество итераций. В результате должно быть получено k кластеров с минимальным значением целевой функции.

В качестве целевой функции, как правило, используется сумма квадратов расстояний внутри кластера, которая описывается формулой (3).

$$s(k) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^p (x_{ij} - \bar{x}_{kj})^2, \quad (3)$$

где k – кластер; x_{ij} – значение j -й переменной для i -го наблюдения (объекта); $\bar{x}_{kj}$ – среднее значение j -й переменной в k -м кластере; p – количество переменных [9].

Исходными данными для проведения кластеризации с помощью метода k -средних разбиения являются: анализируемый массив данных, используемая метрика, количество кластеров и метод разбиения.

Определение количества кластеров производилось с использованием специализированного пакета NbClust [13]. Он разработан на основе исследо-

вания Г.В. Миллигана и М.С. Купер (1985), посвящённого анализу правил остановки – подходов, позволяющих определить оптимальное количество кластеров. Всего в пакете используется 30 правил остановки, таких как индекс СН (Calinski and Harabasz), индекс Дуда, Псевдо t^2 (Pseudo t^2), С-индекс, Гамма-индекс, индекс Билля (Beale), кубический критерий кластеризации (Cubic clustering criterion, CCC), коэффициент точечной двусторонней корреляции (Point-biserial correlation coefficient), Gplus-индекс и другие. В качестве критериев определения количества кластеров используются: матрица дисперсий внутри кластеров, матрица дисперсий между кластерами, общее количество данных в выборке, общее количество данных, входящих в кластер, сумма расстояний между кластерами, сумма расстояний в пределах кластеров.

Для примера, индекс Дуда описывается формулой (4):

$$Duda = \frac{Je(2)}{Je(1)}, \quad (4)$$

где $Je(2)$ – сумма квадратов внутрикластерных расстояний в случае, когда данные распределены по двум кластерам; $Je(1)$ – сумма квадратов внутрикластерных расстояний в случае одного кластера.

Гипотеза о существовании единого кластера элементов подтверждается, если значение критерия Дуда больше критического значения, определяемого по формуле (5).

$$\text{Критическое значение} = 1 - \frac{2}{\pi\rho} - z\sqrt{\frac{2(1 - \frac{8}{\pi^2\rho})}{n_m\rho}}, \quad (5)$$

где ρ – число признаков; n_m – квантиль стандартного нормального распределения уровня [14].

Критерий Дуда называют локальным правилом, так как он позволяет оценить корректность при $k=1$, то есть при отсутствии разбиения выборки на группы. При работе с данными, кластеризованными на две и более группы, необходимо использовать глобальные правила остановки. Например, индекс СН, который указывает на наиболее вероятное количество кластеров, задается с помощью формулы (6):

$$CH_{(q)} = \frac{\text{trace}(B_q) / (q-1)}{\text{trace}(W_q) / (n-q)}, \quad (6)$$

где B_q – матрица дисперсий между кластерами; W_q – матрица дисперсий внутри кластеров; n – количество наблюдений; q – количество кластеров [14]. В основе определения итогового количества кластеров на базе всех правил остановки лежит принцип большинства. Принцип большинства представляет собой правило, в соответствии с которым количество кластеров считается оптимальным, если оно получено по большинству критериев (табл. 5).

Графическое представление результатов приведено на рис. 10. На графике по оси X показано количество кластеров, а по оси Y отложено количе-

Таблица 5. Количество кластеров, определённое с использованием интегрированных в NbClust правил остановки

Table 5. Number of clusters defined by stopping rules integrated into NbClust

	KL	CH	Hartigan	CCC	Scott	Marriot	TrCovW
Number_clusters	2,000	2,000	10,000	2,000	5,000	5,000000e+00	3,0
Value_Index	6,2492	5901,491	4825,086	-34,968	3033,448	1,364096e+16	669453,2
	TraceW	Friedman	Rubin	Cindex	DB	Silhouette	Duda
Number_clusters	5,000	5,000	5,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Value_Index	3410,754	5,6843	-0,6781	0,028	0,4902	0,9581	0,6122
	PseudoT2	Beale	Ratkowsky	Ball	PtBiserial	Frey	McClain
Number_clusters	2,000	4,000	2,000	3,000	7,000	NA	2e+00
Value_Index	19,6366	1,1478	0,493	2987,084	0,8102	NA	0,1677
	Dunn	Hubert	SDindex	Dindex	SSbw		
Number_clusters	2,000	0	9,000	0	9,000		
Value_Index	0,1677	0	1,5993	0	3,6456		

Примечание: Number_clusters – количество кластеров согласно одному из критериев; Value_Index – вес правила остановки.

Note: Number_clusters is the number of clusters according to one of the criteria; Value_Index is the value of the stopping rule.

ство критериев, согласно которым получено соответствующее число кластеров.

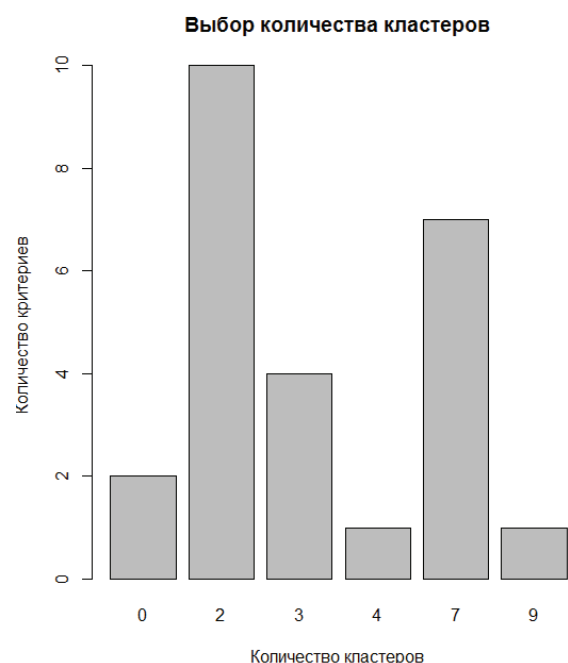


Рис. 10. Определение количества кластеров

Fig. 10. Definition of the number of clusters

Достаточная согласованность между результатами применения правил остановки позволяет сказать, что у информации, используемой для кластеризации, есть определённая структура. В результате проведенных расчетов, согласно табл. 4 и рис. 10, оптимальное количество кластеров для анализируемой совокупности составляет два.

Кроме определения количества групп, важной задачей при кластеризации является выбор метрики. По своей сути метрика – это мера сходства одного элемента выборки с другими. Для расчёта метрики используются: расстояние Чебышева, процент несогласия, а также степенное, манхэттенское и Евклидово расстояния [15]. Расстояние Чебышева применяется в том случае, если известно,

что объекты отличаются только по одной координате (по одному признаку). Степенное расстояние используется тогда, когда необходимо увеличить или уменьшить вес для той размерности, по которой объекты значительно отличаются. Для нечисловых данных применяется процент несогласия.

Для непрерывных данных наиболее распространёнными метриками при проведении кластеризации являются евклидово и манхэттенское расстояния.

Евклидово расстояние используется в том случае, если компоненты вектора наблюдений однородны по своему физическому смыслу и понятие близости объектов совпадает с понятием геометрической близости объектов в n -мерном пространстве [15] и описывается формулой (7).

$$d = \sqrt{((A_1 - B_1)^2 + (A_2 - B_2)^2 + \dots + (A_n - B_n)^2)}, \quad (7)$$

где $A_1, \dots, A_n$ – положение объекта A в n -мерном пространстве; $B_1, \dots, B_n$ – положение объекта B в n -мерном пространстве; d – расстояние между объектом A и B в n -мерном пространстве [16].

Манхэттенское расстояние (расстояние городских кварталов) по геометрическому смыслу является средним разностей по координатам. Как правило, результаты, полученные с использованием манхэттенского и евклидова расстояния, отличаются незначительно, однако следует отметить, что, если точки отличаются только по одной из координат, данная метрика сгладит эту разницу. Также следует учитывать то, что эта метрика наиболее применима в двумерном пространстве, то есть только при расчетах по двум признакам [17, 18].

Так как исследуемые данные являются числовыми, классификация производится по пяти параметрам и объекты отличаются друг от друга не по одному признаку, в качестве метрики было использовано евклидово расстояние.

Результаты кластеризации

В результате классификации по уровню развитости рынка земельных участков для ИЖС насе-

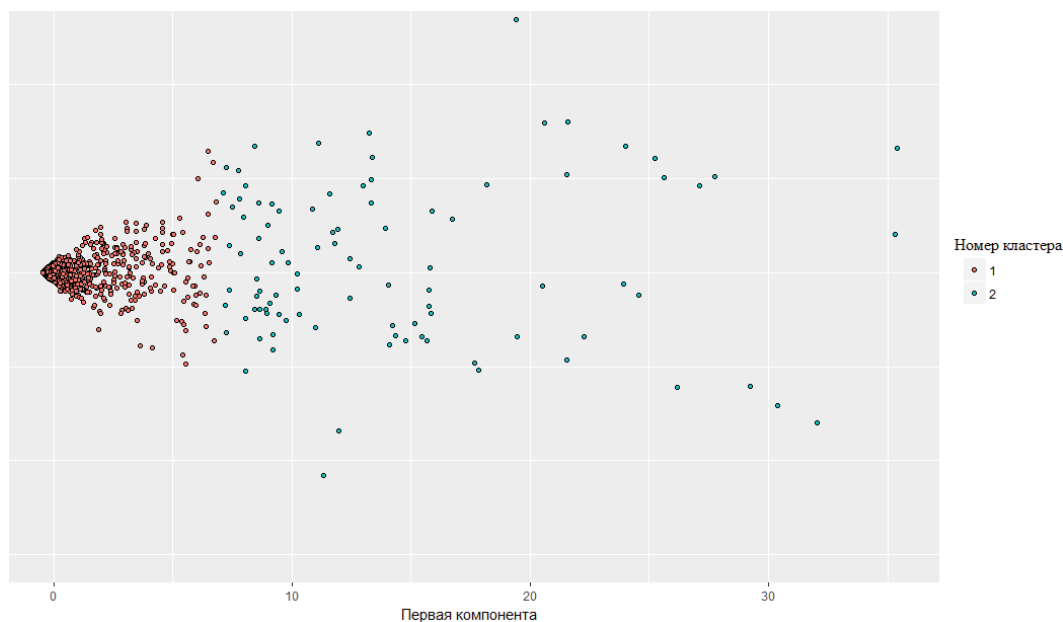


Рис. 11. Результат классификации населенных пунктов по уровню развитости рынка ИЖС

Fig. 11. Results of classification of inhabited localities by IRD property market

ленные пункты России были разделены на две группы. Результаты классификации в системе координат двух главных компонент представлены на рис. 11. На представленном графике каждый объект выборки – населенный пункт – представлен точкой [19].

Из рисунка видно, что полученные группы достаточно обособлены и практически не пересекаются, что является показателем хорошего качества проведенной кластеризации.

В первую группу попало 98 населённых пунктов. Среднее количество сделок в год составляет 129, за весь исследуемый период – более 700. Как правило, сюда входят населённые пункты, являющиеся столицами крупных и интенсивно развивающихся субъектов РФ – Красноярск, Уфа, Ульяновск, или городами федерального значения: Москва, Санкт-Петербург.

Вторая группа включает в себя 6828 населённых пунктов. Следует отметить, что населенные пункты в этой группе значительно отличаются друг от друга, поэтому было принято решение провести процедуру кластеризации еще раз только для населенных пунктов этой группы. В результате было выделено три подгруппы:

1. Населённые пункты с низким количеством зарегистрированных сделок купли-продажи земель ИЖС

К этой подгруппе относятся населённые пункты, о сделках в которых информация весьма ограничена. В среднем производится до 10 сделок в год на территории всего населённого пункта. В основном в эту группу входят сёла, посёлки, заимки и другие типы сельских населённых пунктов и малых городских населенных пунктов. Однако присутствуют и крупные города – например, Ростов-на-Дону или

Калуга. Такая ситуация может быть вызвана тем, что системе территориального планирования этих городов не характерно ИЖС, или рынок земель ИЖС на данный момент находится на стадии стагнации. Всего таких населённых пунктов 6517.

2. Населённые пункты со значительным количеством сделок в один (два) из годов периода изучения

Так называемые «скачки» количества сделок купли-продажи можно объяснить следующими обстоятельствами:

- изменение вида разрешённого использования земель в связи с перспективным развитием населённых пунктов для малоэтажной застройки (в т. ч. ИЖС). Например, в деревне Анкудиновка Нижегородской области активно осваиваются земли, предназначенные под индивидуальную жилую застройку. Общая площадь земель ИЖС составляет 22,36 га, деревня оборудована всеми необходимыми инженерными и транспортными коммуникациями [20];
- повышение инвестиционной привлекательности земель вследствие строительства новых объектов инфраструктуры и промышленности. За изучаемый период для города Бикине в Хабаровском крае было принято решение о реализации экономической программы создания локальной зоны предпринимательства;
- перспективное развитие населённых пунктов. Например, большое количество сделок в посёлке городского типа Анопино Владимирской области в 2011–2012 гг. связано с утверждением в 2010 г. нового генерального плана, который предполагает расширение площади населённого пункта и предусматривает развитие инфраструктуры.

Как правило, в таких населённых пунктах среднее количество сделок, как и для группы первого типа, находится в пределах 10 сделок в год, а в один-два года происходит резкий скачок, что является выбросом и не может учитываться при классификации.

Всего 99 населённых пунктов. Данные мониторинга сделок купли-продажи в таких населённых пунктах должны тщательно проверяться на возможность применения при построении модели кадастровой стоимости.

3. Населённые пункты, которые необходимо рассматривать отдельно

Населённым пунктам данной группы характерна достаточно высокая плотность сделок и стабильная динамика рынка. В среднем в таких населённых пунктах зарегистрировано около 30 сделок в год. При условии территориальной компактности размещения ИЖС в населённом пункте и высокой достоверности данных о сделках купли-продажи такие населённые пункты можно отнести к условно развитым.

Всего таких населённых пунктов 212.

Таким образом, классификация населённых пунктов России в зависимости от активности рынка земельных участков ИЖС представлена следующими группами:

1. Населённые пункты с развитым рынком земельных участков ИЖС – более 129 сделок купли-продажи в год, и, в среднем, более 700 за указанный период.
2. Населённые пункты с условно развитым рынком земельных участков ИЖС – те населённые пункты, где количество сделок распределено неравномерно: от 10 до 150 сделок в год, в среднем за период около 300.
3. Населённые пункты с малоразвитым рынком земельных участков ИЖС – до 10 сделок в год, в среднем за весь оцениваемый период не более 50.

Разработанная классификация предусматривает динамическую актуализацию данных, поэтому обоснованные интервалы и положение населённого пункта в классификации могут изменяться в зависимости от рыночных условий.

Заключение

Анализируя результаты классификации, можно заключить, что удельный вес населённых пунктов с развитым рынком земель индивидуального жилого строительства невелик (рис. 12). В то время как рыночные условия между группами различаются значительно, действующая в настоящее время методика кадастровой оценки земель насе-

лённых пунктов ориентирована исключительно на населённые пункты с большим количеством сделок купли-продажи.

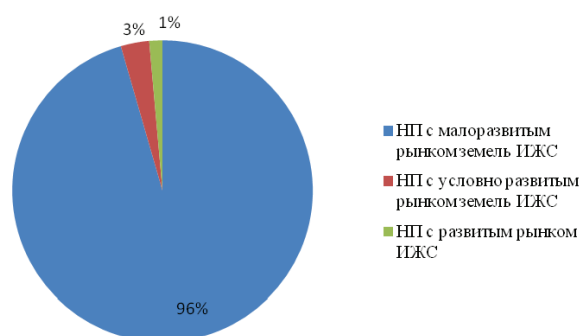


Рис. 12. Процентное соотношение групп населённых пунктов в зависимости от развитости рынка земель ИЖС

Fig. 12. Percentage of inhabited locality group by IRD land property market development

Проведенное исследование является основой для разработки предложений в области развития института кадастровой оценки недвижимости в России в условиях разного уровня развитости рынка:

1. В условиях разного уровня развитости рынка недвижимости населённых пунктов идея о дифференцированном подходе к кадастровой оценке является обоснованной, что подтверждается результатами выполненной работы.
2. С учётом того, что более 96 % населённых пунктов России имеют малоразвитый рынок земель индивидуального жилого строительства, а существующая методика предусматривает использование достаточной объективной исходной информации, следует осуществить разработку методики определения кадастровой стоимости, учитывающую недостаточность рыночной информации.
3. Представленная методика классификации населённых пунктов России должна явиться одним из этапов оценочных работ по кадастровой оценке, на основании которого должен определяться метод расчета кадастровой стоимости в различных условиях развитости рынка недвижимости.
4. Предложенная последовательность классификации населённых пунктов по уровню развитости рынка земель ИЖС может быть реализована и для других видов разрешенного использования земель, а также иного недвижимого имущества. Это обеспечит обоснование дифференцированного и объективного подхода к методическому аппарату расчета налогооблагаемой базы недвижимого имущества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Налоговый кодекс Российской Федерации от 31 июля 1998 года № 146 (ред. 27.11.2017). – М.: Эксмо, 2017. – 1120 с.
2. Бюллетень о текущих тенденциях российской экономики // Аналитический центр при правительстве Российской Федерации URL: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/10017.pdf> (дата обращения: 11.11.2017).
3. Федеральная служба государственной регистрации кадастра и картографии. URL: <https://rosreestr.ru/site/> (дата обращения: 11.11.2017).
4. Киселёв В.А., Лепихина О.Ю. Анализ достаточности и достоверности рыночной информации в малых и средних городах Северо-западного округа для оценки возможности применения статистического метода определения кадастровой стоимости земель // Записки Горного института. – 2011. – № 7. – С. 217–221.
5. Гладких Н.И., Кузнецова В.В. Определение необходимого количества аналогов при заданном числе ценообразующих факторов для целей оценки недвижимости методами корреляционно-регрессионного анализа // Имущественные отношения в РФ. – 2016. – № 6 (177). – С. 75–84.
6. Григорьев В.В. Совершенствование механизма управления государственной кадастровой оценкой в Российской Федерации // Государственное и муниципальное управление. – 2016. – № 1. – С. 83–89.
7. Бойко А.Ю. Кадастровая оценка. Проблемы и перспективы // Земля и бизнес. – 2016. – № 258. – С. 11–21.
8. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Теория вероятностей и прикладная статистика. – М.: Юнити, 2001. – 657 с.
9. Kabacoff R. R in action. – New York: Manning Publications Co., 2015. – 563 p.
10. Everitt B.S., Hothorn T. A Handbook of Statistical Analyses Using R // The Comprehensive R Archive Network. URL: https://cran.r-project.org/web/packages/HSAUR/vignettes/Ch_principal_components_analysis.pdf (дата обращения: 10.11.2017).
11. Venables W.N., Smith D.M., the R Core Team. An Introduction to R. Notes on R: a Programming Environment for Data Analysis and Graphics // The Comprehensive R Archive Network. URL: <https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/R-intro.pdf> (дата обращения: 18.11.2017).
12. Peng R. Exploratory Data Analysis with R // LeanPub: Publish Early, Publish Often. URL: <https://leanpub.com/exdata> (дата обращения: 11.11.2017).
13. NbClust: an R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set / M. Charrad, N. Ghazzali, V. Boiteau, A. Niknafs // Journal of Statistical Software. – 2014. – V. 61. URL: <https://www.jstatsoft.org/index.php/jss/article/view/v061i06/v61i06.pdf> (дата обращения: 11.11.2017).
14. Яцкив И., Гусарова Л. Методы определения количества кластеров при классификации без обучения // Transport and Telecommunication. – 2003. – № 1. – С. 23–28.
15. Leek J. The Elements of Data Analytic Style // LeanPub: Publish Early, Publish Often. URL: <https://leanpub.com/datastyle> (дата обращения: 11.11.2017).
16. Гитис Л.Х. Статистическая классификация и кластерный анализ. – М.: Изд-во московского горного университета, 2003. – 157 с.
17. Wickham H., Gromlund G. R for Data Science. – Sebastopol: O'Reilly Media, 2016. – 483 p.
18. Teetor P. R Cookbook. – Sebastopol: O'Reilly Media, 2011. – 397 p.
19. Burchell J., Vargas M. The Hitchhiker's Guide to Ggplot2 in R // LeanPub: Publish Early, Publish Often. URL: https://leanpub.com/hitchhikers_ggplot2 (дата обращения: 11.11.2017).
20. Генеральный план сельского поселения «Афонинский сельсовет» Кстовского района Нижегородской области // Кстовский район Нижегородской области. 2017. URL: http://www.kstovo-adm.ru/about/rural_councils/afoninsky_selsove/town_planning.php (дата обращения: 20.11.2017).

Поступила 21.12.2017 г.

Информация об авторах

Быкова Е.Н., кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета.

Балтыжакова Т.И., кандидат технических наук, ассистент кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета.

Волкова Я.А., аспирант, ассистент кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета.

UDC 332.628

CLASSIFICATION OF INHABITED LOCALITIES BY THE LEVEL OF DEVELOPMENT OF INDIVIDUAL RESIDENTIAL LAND MARKET

Elena N. Bykova¹,

vilena@spmi.ru

Tatiana I. Baltyzhakova¹,

tatiyana.baltyzhakova@gmail.com

Yana A. Volkova¹,

yana.docenko@inbox.lv

¹ St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St.-Petersburg, 199106, Russia.

The relevance of the research is caused by high level of effect of insufficient amount of market data on the result of cadastral appraisal. This is the great problem for inhabited localities with low level of development of land registry. The paper introduces the motivation of the idea of case-specific approach to cadastral appraisal within the different market development in Russian inhabited localities.

The aim of the research is substantiation of the need in differentiated approach to cadastral appraisal within the different development of Land for Individual Residential Development land property market in Russian inhabited localities. The authors propose the classification of Russian inhabited localities by land property market development level.

Objects of research are all Russian inhabited localities where the deals with lands for individual residential construction development were registered from January 1st, 2011 to December 31st, 2015.

Methods. The inhabited localities were classified by real estate market development level using k-means, principal component analysis, histograms, stopping rules – approaches defining the best suitable number of the clusters.

Results. The authors have developed the classification of inhabited localities by real estate market development level. It is represented by the following groups: inhabited localities with developed individual residential construction land property market (more than 129 purchase/sale deals per year and on the average more than 700 deals for the studied period); inhabited localities with relatively developed individual residential construction land property market where the number of deals is spread irregularly, from 10 to 150 deals per year with the average of 300 deals for the studied period; inhabited localities with weakly developed individual residential construction land property market (up to 10 deals per year, up to 50 deals for the studied period). It allows making a conclusion, that the idea of different approach to cadastral appraisal is reasonable.

Key words:

Cadastral appraisal, taxes, individual residential construction, classification of inhabited localities, k-means.

REFERENCES

1. *Nalogovy kodeks Rossiyskoy Federatsii* [Code of Tax Laws of the Russian Federation]. Moscow, Eksmo, 2017. 1120 p.
2. Grigorev L., Golyashev A., Buryak E., Lobanova A., Kulpina V. *Byulleten o tekushchikh tendentsiyakh v rossiyskoy ekonomike* [Report on Current Trends in Russian Economy]. Available at: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/10017.pdf> (accessed 11 November 2017).
3. *Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy registratsii kadastra i kartografii* [Federal Service for State Registration, Cadaster and Cartography]. Available at: <https://rosreestr.ru/> (accessed 11 November 2017).
4. Kiselev V.A., Lepikhina O.Yu. Analysis of sufficiency and reliability of market information in small and average settlements in the northwest district for estimating the possibility of applying the statistical method for defining ground area cadastral cost. *Zapiski Gornogo Instituta*, 2011, no. 7, pp. 217–221. In Rus.
5. Gladikh N.I., Kuznetsova V.V. Determination of the required number of analogues for a given number of pricing factors to estimate real estate using correlation-regression analysis. *Imushchestvennye otnosheniya v RF*, 2016, no. 6 (177), pp. 75–84. In Rus.
6. Grigorev V.V. Development of government mass appraisal in Russian Federation. *Gosudarstvennoe i munitsipalnoe upravlenie*, 2016, no. 1, pp. 83–89. In Rus.
7. Bojko A.Y. Mass appraisal. Problems and Prospects. *Zemlya i biznes*, 2016, no. 258, pp. 11–21. In Rus.
8. Ayvazyan S.A., Mkhitarian V.S. *Teoriya veroyatnostey i prikladnaya statistika* [Theory of probability and applied statistics]. Moscow, Unity Publ., 2011. 657 p.
9. Kabacoff R. *R in action*. New York, Manning Publications Co., 2015. 563 p.
10. Everitt B.S., Hothorn T. A Handbook of Statistical Analyses Using R. *The Comprehensive R Archive Network*. Available at: https://cran.r-project.org/web/packages/HSAUR/vignettes/Ch_principal_components_analysis.pdf (accessed 10 November 2017).
11. Venables W.N., Smith D.M., the R Core Team. An Introduction to R. Notes on R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics. *The Comprehensive R Archive Network*. Available at: <https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/R-intro.pdf> (accessed 18 November 2017).
12. Peng R. Exploratory Data Analysis with R. *LeanPub: Publish Early, Publish Often*. Available at: <https://leanpub.com/exdata> (accessed 11 November 2017).
13. Charrad M., Ghazzali N., Boiteau V., Niknafs A. NbClust: an R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set. *Journal of Statistical Software*, 2014. Available at: <http://www.jstatsoft.org/> (accessed 11 November 2017).
14. Yatzkiv I., Gusarova L. Methods of Clusters Quantity Determination without Training. *Transport and Telecommunication*, 2003, no. 1, pp. 23–28. In Rus.
15. Leek J. The Elements of Data Analytic Style. *LeanPub: Publish Early, Publish Often*. Available at: <https://leanpub.com/datastyle> (accessed 11 November 2017).

16. Gitis L.H. *Statisticheskaya klassifikatsiya i klasterny analiz* [Statistical classification and cluster analysis]. Moscow, Moscow Mining University Press, 2003. 157 p.
17. Wickham H., Golemund G. *R for Data Science*. Sebastopol, O'Reilly Media, 2016. 483 p.
18. Teetor P. *R Cookbook*. Sebastopol, O'Reilly Media, 2011. 397 p.
19. Burchell J., Vargas M. The Hitchhiker's Guide to Ggplot2 in R. *LeanPub: Publish Early, Publish Often*. Available at: https://leanpub.com/hitchhikers_ggplot2 (accessed 11 November 2017).
20. *Generalny plan Afoninskogo selsoveta v Kstovskom rayone Nizhegorodskoy oblasti* [Site Plan of Afoninsky Rural Council in Kstovsky District in Nizniy Novgorod Region]. Available at: http://www.kstovo-adm.ru/about/rural_councils/afoninsky_selsove/town_planning.php (accessed 20 November 2017).

Received: 21 December 2017.

Information about the authors

Elena N. Bykova, Cand. Sc., associate professor, St. Petersburg Mining University.

Tatiana I. Baltyzhakova, Cand. Sc., assistant professor, St. Petersburg Mining University.

Yana A. Volkova, postgraduate student, assistant professor, St. Petersburg Mining University.

УДК 550.4:549.2/.8

ГЕОХИМИЯ ТУРМАЛИНА ГРЕЙЗЕНОВ И ПЕГМАТИТОВ ГОРНОГО АЛТАЯ

Гусев Анатолий Иванович,
anzer@gmail.ru

Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М. Шукшина,
Россия, 659333, г. Бийск, ул. Советская, 11.

Актуальность проведенных исследований определяется необходимостью геохимического изучения турмалина грейзеновых и пегматитовых месторождений и проявлений Горного Алтая. С грейзенами и пегматитами пространственно и генетически связаны различные типы оруденения: грейзеновые вольфрамовые, бериллиевые, редкометалльные пегматитовые и ювелирно-поделочное сырьё.

Цель исследования: изучение состава турмалина грейзеновых и пегматитовых месторождений и проявлений с использованием экспериментальных диаграмм, позволяющих выявлять генетические проблемы и физико-химические особенности формирования грейзенов и пегматитов.

Методы. Определение главных элементов в турмалине выполнены на волновом микрозонде JEOL JXA-8100 (в Аналитическом центре Института геологии и минералогии СО РАН г. Новосибирска); изучение микроэлементного состава турмалина с применением лазерно-абляционного анализа методом индуктивно-связанной плазмы на спектрометре «OPTIMA 4300» с высокой чувствительностью определения элементов в Лабораториях Всероссийского геологического исследовательского института (г. Санкт-Петербург) и Института минералогии и геохимии редких элементов (г. Москва). Изотопный состав кислорода определен на масс-спектрометре МИ 1201В в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск).

Результаты. Приведены данные по составу турмалина грейзеновых и пегматитовых месторождений и проявлений Горного Алтая. Алумосиликат бора отнесён к шерлу и оксишерловому фойтиту. Турмалин грейзеновых и пегматитовых месторождений Горного Алтая имеет значительные геохимические отличия по содержаниям элементов-примесей, кислотности-основности кристаллизации минералов, характеру проявления ТЭФ РЗЭ М-типа. Турмалин наиболее эволюционированных, дифференцированных мигматитовых пегматитов резко отличается от шерла других объектов повышенными концентрациями Li, Cu, Zn, Sr, Ba, Ga, Sc, Mn и обильным содержанием водных флюидов с такими летучими компонентами, как F, B, Cl, Li. Наиболее высокие концентрации W в турмалине грейзенов и Nb в шерле пегматитов обусловлены повышенной кислотностью среды флюидов. Преобладающая часть турмалина в изученных месторождениях не подчиняется заряд-радиус-контролируемому поведению элементов. Для турмалинов грейзенов и пегматитов с самыми высокими концентрациями вольфрама отмечается подчинение заряд-радиус-контролируемому поведению элементов.

Ключевые слова:

Геохимия, грейзены, редкометалльные пегматиты, шерл, оксишерловый фойтит, тетрадный эффект фракционирования РЗЭ, редкоземельные элементы, W, Mo, Be, Li, Ta, Nb, U, Sc, Горный Алтай.

Введение

Турмалин – один из широко распространённых боросиликатных минералов в природных породах. Он содержит ~3 вес. % В – элемента, который присутствует в низких концентрациях в большинстве коровых и мантийных пород [1, 2]; поэтому образование турмалина отвечает эффективной концентрации бора, даже если он кристаллизуется в породах континентальной коры. Такие концентрации достигаются двумя путями: 1) магматической дифференциацией, формируя турмалин в пегматитах, обогащённых бором как результат высокой несовместимости; 2) флюид-доминантными процессами, так как имеет место высоко флюид-мобильный характер бора. Последний, необходимый для образования турмалина во флюид-насыщенных породах, может заимствоваться и с другими фазами в пределах породы, такими как глинистые минералы или слюды [3], или привноситься внешними флюидами в процессе метасоматизма [4]. Турмалин относится к высокостабильным фазам в различных породных типах в широком диапазоне Р–Т условий от поверхностных условий до значительных Р–Т поля стабильности алмаза, превышающих верхне-мантийные показатели [5–7]. Турмалин формируется при широкой вариации давле-

ний и температур, включая условия в субдуцирующем слэбе на глубинах ~250 км [8]. Он чувствителен к различным физико-химическим условиям и является идеальным индикатором условий образования и обстановок, при этом заметно меняет состав элементов-примесей [9, 10].

В Горном Алтае турмалин (шерл) встречается в турмалиновых лейкогранитах, пегматитах, грейзенах, жилах гидротермального типа. *Цель исследования* – проанализировать геохимические особенности турмалина пегматитов и грейзенов, имеющих важное значение при формировании оруденения W, Mo, Sc, Be, Zr, Ta, Nb, U, REE.

Геохимические особенности турмалина Горного Алтая

Наибольшим распространением турмалин пользуется на территории региона в грейзенах и пегматитах, где он ассоциирует с главными фазами полевых шпатов, кварца и слюд. В грейзенах Горного Алтая основная ассоциация, в которую входит турмалин, включает кварц, мусковит, вольфрамит, берилл, молибденит, пирит, халькопирит, редко висмутин. В грейзеновых месторождениях турмалин ассоциирует с минералами руд W, Mo, Sc, Be, а в пегматитовых образованиях – с Zr, Ta, Nb, U, REE.

Таблица 1. Химический состав турмалинов грейзеновых месторождений Горного Алтая (%)

Table 1. Chemical composition of tourmaline of greisen deposits of Gorny Altai (%)

Компоненты/Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO ₂	41,5	41,3	41,2	39,9	38,3	41,4	41,3	41,2	39,8	38,9	39,9	38,8
TiO ₂	0,5	1,2	0,8	0,7	0,6	0,5	1,1	0,7	0,7	0,64	0,7	0,6
Al ₂ O ₃	31,9	32,2	32,1	33,6	32,3	31,9	32,1	32,2	33,5	32,3	33,9	32,4
Fe ₂ O ₃	19,3	15,1	18,9	14,2	14,0	19,3	15,0	19,1	14,1	14,3	14,1	14,0
MnO	0,12	0,4	0,7	0,1	0,13	0,12	0,5	0,6	0,2	0,11	0,14	0,13
MgO	1,25	2,2	1,2	2,3	2,1	1,25	2,2	1,5	2,1	2,13	2,2	2,03
CaO	0,66	0,63	1,1	0,2	0,1	0,66	0,63	1,1	0,3	0,11	0,2	0,1
Na ₂ O	2,1	1,9	0,9	1,6	1,2	2,1	1,9	0,86	1,6	1,22	1,6	1,27
K ₂ O	0,1	0,5	0,1	0,1	0,05	0,1	0,5	0,11	0,13	0,08	0,1	0,05
F	0,7	0,3	0,2	1,0	1,2	0,7	0,3	0,3	1,2	1,42	1,0	1,23
B	2,8	2,9	2,85	2,82	2,88	2,8	2,9	2,81	2,84	2,8	2,81	2,82

Примечание. 1, 2 – Колыванское (W, Mo); 3, 4 – Казандинское (Be); 5–8 – Южно-Калгутинское (W, Mo, Be); Кумирское (Sc, U, Be, REE) месторождение; 9, 10 – турмалин 1 генерации; 11 – турмалин 2 генерации; 12 – Дмитриевское (W).

Notes. 1, 2 – Kolyvanskoe (W, Mo); 3, 4 – Kazandinskoe (Be); 5–8 – Yuzhno-Kalgutinskoe (W, Mo, Be); Kumirskoe (Sc, U, Be, REE) 9, 10 – tourmaline of the 1st generation, 11 – tourmaline of the 2nd generation; 12 – Dmitrievskoe (W).

Такая металлогеническая специфика грейзенов и пегматитов региона очевидно отразилась и на геохимических особенностях турмалина.

Составы турмалинов грейзеновых месторождений Горного Алтая приведены в табл. 1 и 2, пегматитовых – в табл. 3 и 4.

Согласно общепринятой номенклатуре турмалинов, анализируемые образцы турмалина относятся к щелочным разновидностям по [11]. Номенклатура турмалинов грейзеновых и пегматитовых месторождений отражена на рис. 1. На обоих диаграммах фигуративные точки составов турмалинов пегматитов и грейзенов образуют самостоятельные кластеры. По соотношению $\zeta^x/(\zeta^x+\text{Na})$ –

Mg/(Mg+Fe) анализируемый турмалин попадает в поле шерла, однако для пегматитовых объектов он ближе к границе дравита. В координатах Fe-Mg кластеры составов турмалина попадают в поле оксишерлового фойтита и пегматитовый боросиликат ближе к оксидравитовому магнезиальному фойтиту (рис. 1).

Наиболее высокие концентрации суммы редких земель свойственны шерлам грейзенового Колыванского W-Mo и второй генерации Кумирского Sc, U, Be, REE месторождений. Отношение $(\text{La}/\text{Yb})_N$ в турмалине всех объектов варьирует от 0,75 до 24,6, указывая на различную дифференцированность распределения лёгких и тяжёлых РЗЭ.

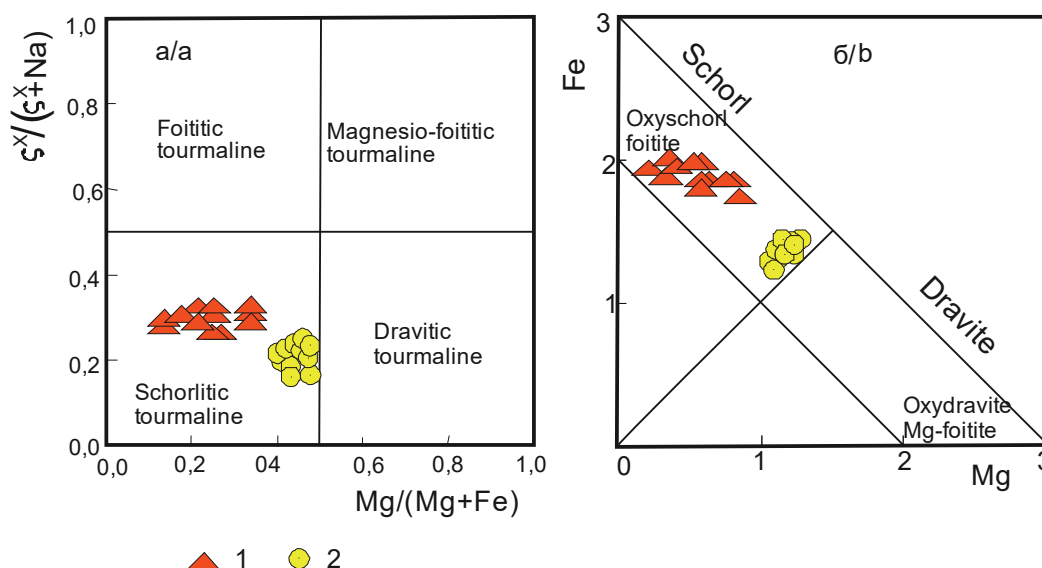


Рис. 1. Бинарные диаграммы $\zeta^x/(\zeta^x+\text{Na})$ –Mg/Mg+Fe (a) и Fe–Mg (b) в атомных количествах по [11] для турмалинов грейзеновых и пегматитовых месторождений Горного Алтая. Турмалин: 1 – грейзенов, 2 – пегматитов

Fig. 1. Binary diagram $\zeta^x/(\zeta^x+\text{Na})$ –Mg/Mg+Fe (a) and Fe–Mg (b) in atomic amount after [11] for tourmaline greisen and pegmatitic deposits of Gorny Altai. Tourmaline: 1 – greisens, 2 – pegmatites

Таблица 2. Элементы-примеси в турмалине грейзеновых месторождений Горного Алтая (г/т)

Table 2. Elements-admixture in tourmaline of greisen deposits of Gorny Altai (ppm)

Компоненты/Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
V	28,5	30,1	219	220	5,6	5,9	6,01	80,5	70,7	34,8	125,3	93
Cr	45,7	47,3	5,6	6,1	4,5	4,8	5,18	31,6	113	45,0	185,2	5,3
Co	5,57	5,8	6,0	5,8	0,6	0,7	0,65	14,2	18,6	12,4	104,3	5,5
Ni	26,6	29,3	11	10,5	1,0	1,1	1,0	31,4	21,6	20,6	74,4	3,6
Cu	232	241	134	136	25,0	25,1	24,9	3,16	4,8	5,5	273,3	13,6
Zn	616	621	65	67	251	250	247	67,2	79,9	65,6	27,6	30,6
Rb	44,3	45,2	86,9	87	543	545	534	18,6	30,1	62,1	5,1	2
Sr	249	251	185	190	18,4	18,8	19,1	150	73,2	94,6	20,8	97,4
Nb	9,8	10,0	1,43	2,3	54,0	54,1	53,1	3,05	6,27	12,5	30,1	2,94
Cs	8,62	9,3	10,5	11,5	596	599	623	0,66	0,61	0,7	10,2	0,36
Ba	871	882	90,7	92,1	32,6	32,7	33,8	49,7	79,6	29,5	50,3	5,57
Pb	1588	1479	52	55	50,5	50,1	49,0	5,02	6,09	7,1	15,7	6,9
Th	10,4	11,2	5,06	5,2	2,55	2,5	2,41	1,35	1,24	11,3	5,1	4,23
La	65,4	71,6	5,79	5,9	2,73	2,7	2,63	3,41	3,66	5,86	70,4	10,4
Ce	153	198	15,8	20,5	8,9	7,9	6,69	7,34	7,98	11,4	175,1	20,3
Pr	17,3	18,4	2,41	2,2	0,91	0,9	0,88	1,13	1,18	1,89	18,6	1,7
Nd	58	60,4	7,59	7,7	3,3	3,2	3,13	6,61	5,96	8,91	75,4	5,26
Sm	10,4	11,9	1,23	1,5	1,4	1,3	1,04	2,26	2,31	5,41	15,2	0,49
Eu	0,36	0,34	0,34	0,35	0,06	0,05	0,04	0,66	0,96	0,09	0,5	0,13
Gd	4,72	5,9	0,98	1,0	1,1	0,97	0,89	2,43	2,78	6,99	10,5	0,43
Tb	0,57	1,98	0,16	0,18	0,3	0,2	0,19	0,52	0,55	1,73	1,8	0,072
Dy	2,99	9,1	0,77	0,9	1,67	1,8	1,75	2,98	3,87	9,27	7,3	0,51
Ho	0,63	0,91	0,15	0,2	0,5	0,4	0,36	0,57	0,82	1,42	0,9	0,12
Er	2,19	3,2	0,64	0,8	1,3	1,2	1,06	1,7	2,24	3,16	1,7	0,48
Tm	0,48	0,51	0,12	0,14	0,29	0,27	0,26	0,28	0,36	0,37	0,25	0,091
Yb	4,15	5,0	1,12	2,2	2,4	2,2	2,09	1,86	2,07	2,11	4,8	0,85
Lu	0,97	1,1	0,29	0,3	0,4	0,39	0,38	0,25	0,36	0,28	0,6	0,15
Y	17,7	21,7	4,34	4,65	12,6	12,0	11,9	19,2	23,6	82,0	83,7	4,97
Ga	73,3	89,4	55	58	31,7	31,2	30,0	13,8	12,4	14,3	18,5	54,6
Zr	20,8	22,5	9,02	10,2	18,8	16,8	17,8	56,6	247	60,1	18,7	0,5
Sc	9,0	10,5	10,9	11,5	8,7	8,3	8,29	6,9	8,16	10,5	125,8	7,9
Hf	1,41	1,5	0,26	0,3	1,7	1,3	1,24	1,54	5,82	0,73	2,5	0,14
Ta	2,37	3,6	0,16	0,2	7,2	7,0	6,92	0,23	0,46	3,76	11,8	1,31
Mo	21,5	22,7	44,3	45,6	45,9	45,2	44,4	9,4	16,5	10,4	2,1	7,31
Sb	2,1	2,5	3,0	3,1	1,7	1,6	1,61	5,01	4,23	4,4	10,1	5,8
Sn	5,2	6,2	6,2	7,0	4,9	4,5	4,77	81,5	102	97	1,2	3,6
Be	5,01	6,0	23,9	24,6	7,9	7,8	7,23	1,88	1,66	10,4	5,7	7,0
W	16,2	18,9	66,1	65,6	15,6	12,6	12,1	16,5	44,9	16,9	2,6	12,9
U	2,35	3,1	0,67	0,7	29,9	29,7	28,8	0,56	0,74	2,31	2,5	0,18
Li	355	363	402	412	451	453	748	47,5	68,9	70,5	18,7	20,6
Ge	3,5	4,1	4,0	4,2	2,7	2,5	2,3	1,61	1,37	1,5	5,7	1,48
Ag	0,4	0,5	0,34	0,36	0,24	0,23	0,22	0,013	0,023	0,02	0,6	1,6
Bi	3,0	3,2	2,5	2,7	2,8	2,9	2,83	0,44	1,12	1,2	13,7	14,1
ΣREE	398,9	415,2	41,73	48,52	49,6	35,48	33,3	51,2	58,7	140,9	466,7	45,95
(La/Yb) _N	10,4	9,48	3,4	1,76	0,75	0,82	0,83	1,21	1,17	1,83	9,67	8,05
Eu/Eu*	0,14	0,11	1,02	0,86	0,14	0,13	0,12	0,87	1,17	0,04	0,12	0,86
TE _{1,3}	1,0	1,65	1,16	1,2	1,19	1,16	1,15	1,01	0,99	1,14	1,2	1,03

Примечание. Нормализация по [12]. TE_{1,3} – тетрадный эффект фракционирования REE, как среднее между первой и третьей тетрадами по [13]. 1, 2 – Кольванское (W, Mo); 3, 4 – Казандинское (Be); 5–8 – Южно-Калгутинское (W, Mo, Be); Кумирское (Sc, U, Be, REE) месторождение: 9, 10, – турмалин 1 генерации; 11 – турмалин 2 генерации; 12 – Дмитриевское (W).

Notes. Normalization carry to hondrite [12]. TE_{1,3} – tetradic effect of REE fractionation, as an average between the first and the third tetrads after [13]. 1, 2 – Kolyvanskoe (W, Mo); 3, 4 – Kazandinskoe (Be); 5–8 – Yuzhno-Kalgutinskoe (W, Mo, Be); Kumirskoe (Sc, U, Be, REE) deposits: 9, 10 – tourmaline of the 1st generation, 11 – tourmaline of the 2nd generation; 12 – Dmitrievskoe (W).

В отличие от грейзенов основная ассоциация турмалина в пегматитах охватывает альбит, ортоклаз, гранат (альмандинового ряда), биотит, редко мусковит.

Во всех пробах турмалина кроме Кумирского и Казандинского месторождений наблюдается нега-

тивная аномалия по европию (Eu/Eu* < 1). Почти повсеместно в пробах шерла проявлен тетрадный эффект фракционирования (ТЭФ) РЗЭ М-типа (превышение порогового значения TE_{1,3} > 1,1). Турмалин 2 генерации Кумирского скандий-уран-бериллий-редкоземельного месторождения можно

отности к Sc-обогащённому (Sc 125,8 г/т) и REE-обогащённому (ΣREE 466,7 г/т) турмалину по [14]. Именно в этой генерации турмалина Кумирского месторождения отмечены самые высокие концентрации таких мантийных элементов, как Cr, V, Co, Ni, Nb (табл. 2). Это является косвенным подтверждением того, что скандиевое оруденение в «тёмных рудах» на месторождении связано с базальтоидной магмой [15].

Распределение редкоземельных элементов в турмалине приведено на рис. 2. Почти во всех пробах турмалина грейзенов и пегматитов региона отчётливо видна негативная аномалия по европию, за исключением турмалина 1 генерации Кумирского грейзенового месторождения и боросиликата пегматитового месторождения Проходная Грива (рис. 2).

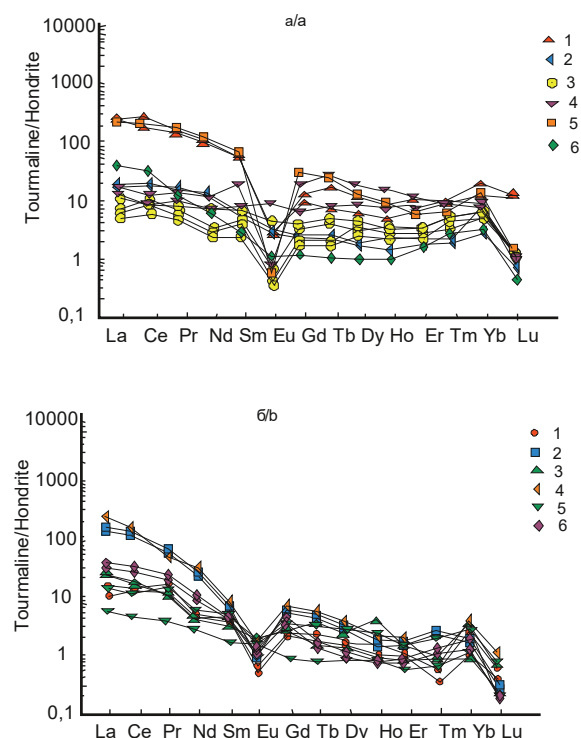


Рис. 2. Распределение РЗЭ в турмалине грейзеновых и пегматитовых месторождений Горного Алтая: а) грейзены; б) пегматиты. Грейзеновые месторождения: 1 – Кольванское (W, Mo); 2 – Казандинское (Be); 3 – Южно-Калгутинское (W, Mo, Be); Кумирское (Sc, U, Be, РЗЭ); 4 – турмалин 1 генерации; 5 – турмалин 2 генерации; 6 – Дмитриевское (W). Пегматитовые месторождения: 1 – Точильное (Ta-Nb); 2 – Берёзовское (Ta-Nb); 3 – Раиса (Ta-Nb); 4 – Устауриха (Ta-Nb); 5 – Проходная Грива (Ta-Nb); 6 – Даниловское (Ta-Nb-Sc-REE)

Fig. 2. Distribution of REE in tourmaline of greisen and pegmatite deposits of Gorny Altai: a) greisens; b) pegmatites. Greisen deposits: 1 – Kolyvanskoe (W, Mo); 2 – Kazandinskoe (Be); 3 – Yuzhno-Kalgutinskoe (W, Mo, Be); Kumirskoe (Sc, U, Be, REE); 4 – tourmaline of the 1st generation, 5 – tourmaline of the 2nd generation; 6 – Dmitrievskoe (W). Pegmatite deposits: 1 – Tochilnoe (Ta-Nb); 2 – Berezovskoe (Ta-Nb); 3 – Raisa (Ta-Nb); 4 – Ustaurikha (Ta-Nb); 5 – Prokhodnaya Griva (Ta-Nb); 6 – Danilovskoe (Ta-Nb-Sc-REE)

В турмалине пегматитов месторождения Раисы, обогащенных мусковитом, отмечается зональность с блёкло-синим ядром, сероватой промежуточной частью и светло-жёлтой каёмкой (рис. 3). Зональность проявляется и в распределении элементов-примесей. В краевых частях наблюдается увеличение концентраций V, Cr, Co и Sr и уменьшение содержаний Mn, Ni, Zn, Sc и Ga.

Таблица 3. Химический состав турмалинов пегматитовых месторождений Горного Алтая (%)

Table 3. Chemical composition of tourmaline of pegmatite deposits of Gorny Altai (%)

Компоненты Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	35,8	36,0	36,2	35,9	36,1	36,3	35,8	36,1	36,2	35,9	36,0
TiO ₂	0,6	0,3	0,4	0,55	0,33	0,35	0,53	0,31	0,34	0,42	0,33
Al ₂ O ₃	33,0	33,1	33,2	33,2	33,4	33,3	33,2	33,4	33,3	33,1	33,3
Fe ₂ O ₃	10,1	9,95	9,98	10,0	9,91	9,95	10,0	9,97	9,96	10,1	10,2
MnO	0,05	0,5	0,45	0,06	0,55	0,49	0,06	0,54	0,49	0,6	0,8
MgO	4,4	4,6	4,55	4,45	4,51	4,52	4,45	4,51	4,52	4,4	4,6
CaO	0,4	0,7	0,7	0,38	0,73	0,72	0,38	0,73	0,72	0,4	0,7
Na ₂ O	1,9	2,0	0,8	1,93	2,2	0,81	1,93	2,2	1,81	1,9	2,0
K ₂ O	0,15	0,2	0,25	0,17	0,2	0,23	0,17	0,2	0,23	0,15	0,2
F	1,7	1,8	1,8	1,77	1,83	1,8	1,77	1,83	1,8	1,75	1,88
B	2,96	3,0	2,97	2,98	3,1	2,95	2,98	3,1	2,95	3,06	3,4

Примечание. 1, 2 – Точильное; 3, 4 – Берёзовское; 5, 6 – Раиса; 7 – Устауриха; 8, 9 – Проходная Грива; 10, 11 – Даниловское.

Notes. 1, 2 – Tochilnoe; 3, 4 – Berezovskoe; 5, 6 – Raisa; 7 – Ustaurikha; 8, 9 – Prokhodnaya Griva; 10, 11 – Danilovskoe.



Рис. 3. Зональный кристалл турмалина с включениями ильменита проявления Раиса. Николи скрещены

Fig. 3. Zone crystal of tourmaline with inclusions of ilmenite of manifestation Raisa. Cross-polarized light

Физико-химические особенности рудных процессов

Для выяснения физико-химических особенностей процессов кристаллизации турмалина в пегматитах и грейзенах изучены температуры гомоген-

Таблица 4. Элементы-примеси в турмалине (шерле) пегматитовых месторождений Горного Алтая (г/т)

Table 4. Elements-admixture in tourmaline of pegmatites deposits of Gorny Altai (ppm)

Компоненты/Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
V	2,5	3,2	66,4	62,5	76,8	55,8	64,8	81,2	78,6	32,9	44,6
Cr	3,86	3,5	7,5	7,3	8,1	7,8	7,4	4,35	4,2	3,76	4,9
Co	3,5	3,6	3,4	3,8	3,9	4,0	4,0	4,1	4,1	1,1	2,4
Ni	2,5	2,7	2,6	3,0	2,9	2,8	3,1	3,2	3,2	0,9	1,6
Cu	10,1	9,8	9,7	10,3	10,2	11,7	11,8	11,9	12,9	15,6	16,7
Zn	12,5	12,7	11,8	11,9	12,0	12,1	13,5	14,1	15,3	21,5	22,7
Rb	33,9	45,8	35,1	37,4	15,9	17,9	38,6	21,7	22,7	16,4	18,9
Sr	5,89	6,8	4,6	5,2	28	30,6	6,9	29,1	31,3	35,0	37,8
Nb	14,6	13,2	4,4	4,5	3,61	4,2	5,2	11,38	5,6	6,46	7,1
Cs	5,83	6,6	2,6	2,9	0,96	1,2	3,1	1,92	2,7	2,36	3,2
Ba	6,12	8,4	11,3	12,1	23,6	26,8	13,7	7,89	8,8	34,5	35,7
Pb	12,0	12,1	13,1	13,2	13,5	13,6	14,2	14,7	14,8	16,5	17,4
Th	1,34	1,9	24,2	25,6	2,87	3,3	25,9	0,5	0,9	0,74	0,8
U	1,61	1,1	1,7	2,4	2,08	2,2	3,4	3,54	1,8	0,64	0,66
La	3,24	5,3	47	51,6	6,44	8,9	52,7	2,41	5,4	8,93	9,5
Ce	10,7	11,1	87,6	88,7	13,1	14,5	89,4	4,66	11,7	18,7	18,9
Pr	1,45	1,9	6,47	6,6	1,26	1,3	6,4	0,39	2,0	2,08	2,2
Nd	4,43	4,5	16,7	17,8	4,3	4,5	18,6	1,28	4,6	6,73	6,8
Sm	1,26	1,3	1,88	1,97	0,9	1,2	2,1	0,28	1,9	0,98	0,99
Eu	0,033	0,05	0,097	0,09	0,15	0,16	0,09	0,1	0,06	0,055	0,06
Gd	0,76	0,9	1,7	1,8	0,78	0,91	2,1	0,24	1,8	0,71	0,8
Tb	0,13	0,2	0,24	0,34	0,11	0,21	0,4	0,037	0,3	0,065	0,07
Dy	0,75	0,92	1	1,2	0,62	1,1	1,3	0,27	1,1	0,26	0,27
Ho	0,12	0,2	0,13	0,2	0,11	0,3	0,15	0,057	0,24	0,041	0,05
Er	0,36	0,4	0,39	0,43	0,26	0,31	0,44	0,14	0,44	0,14	0,21
Tm	0,062	0,2	0,07	0,1	0,035	0,04	0,2	0,029	0,11	0,031	0,04
Yb	0,62	1,6	0,56	0,9	0,31	1,5	1,6	0,22	1,2	0,24	0,7
Lu	0,094	0,2	0,087	0,1	0,043	0,3	0,34	0,037	0,3	0,031	0,05
Y	4,19	8,4	5,2	6,4	3,05	5,7	7,9	1,76	7,8	1,53	2,6
Ga	104	115	71,5	72,5	88,4	90,4	76,5	51,6	77,8	120,0	123,8
Zr	14,7	17,8	9,1	10,2	21,3	22,7	15,8	12,5	12,8	15,2	15,8
Sc	7,6	7,7	8,0	8,3	9,1	9,3	9,7	9,0	8,7	95,6	88,9
Hf	2,42	3,5	0,42	0,45	0,71	1,7	0,55	0,99	0,6	0,68	0,7
Ta	6	7,5	7,35	7,4	2,32	3,2	7,3	1,08	1,6	0,67	0,71
Mo	0,94	2,7	1,52	1,6	4,23	5,7	2,1	1,75	1,98	1,21	1,32
Sb	2,7	2,8	2,8	2,9	2,9	3,2	3,3	3,8	3,7	0,9	1,0
Sn	9,0	8,7	8,9	9,9	9,8	10,5	10,6	12,0	12,6	6,3	6,9
Be	2,4	4,5	8,3	9,1	3,12	4,8	9,5	4,79	10,5	8,64	9,1
W	19,1	23,7	29,2	30,4	49,9	45,8	32,6	16,2	33,6	15,0	16,8
Li	13,7	13,8	14,0	13,7	13,8	14,5	14,1	13,6	12,7	25,5	27,9
Ge	2,6	4,6	5,0	5,2	1,88	2,4	6,6	0,96	5,6	3,1	4,5
Ag	2,7	2,8	2,9	3,1	3,0	3,5	3,4	3,7	3,8	0,5	0,6
Bi	5,5	5,6	5,9	6,5	6,4	6,7	7,2	7,0	6,7	3,3	4,7
ΣPЗЭ	28,2	37,17	169,1	178,2	31,5	40,9	183,7	11,9	38,9	40,7	43,2
(La/Yb) _N	3,4	2,2	55,2	39,0	13,7	3,9	21,7	7,2	3,0	24,6	8,8
Eu/Eu*	0,098	0,13	0,16	0,15	0,54	0,45	0,13	1,17	0,09	0,19	0,2
TE _{1,3}	1,31	1,21	1,17	1,15	1,02	0,96	1,25	1,43	1,17	0,98	0,9

Примечание. 1, 2 – Точильное; 3, 4 – Берёзовское; 5, 6 – Раиса; 7 – Устауриха; 8, 9 – Проходная Грива; 10, 11 – Даниловское.

Notes. 1, 2 – Tochilnoe; 3, 4 – Berezovskoe; 5, 6 – Raissa; 7 – Ustaurikha; 8, 9 – Prokhodnaya Griva; 10, 11 – Danilovskoe.

низации первичных газовой-жидких включений в кварце, ассоциирующем с турмалином, общая солёность включений и изотопы кислорода. Некоторые термодинамические показатели и изотопные данные кислорода приведены в табл. 5.

Приведенные данные показывают, что кварц и ассоциирующий с ним турмалин в пегматитах и грейзенах резко отличались по температурам кристаллизации, солёности газовой-жидких включе-

ний и содержанию тяжёлого изотопа кислорода. В пегматитах температуры гомогенизации первичных газовой-жидких включений, их солёность были более высокими, чем в грейзенах, а $\delta^{18}\text{O}$ были выше чем, в хондритах и мантии (мантийное значение составляет $5,7 \pm 0,3$). Температуры гомогенизации первичных газовой-жидких включений в кварце грейзенов варьировали от 385 до 410 °C, их солёность колебалась от 5,5 до 17,3 мас. %-экв.,

Таблица 5. Термобарогеохимические и изотопные данные исследований кварца в ассоциации с турмалином грейзенов и пегматитов региона

Table 5. Thermo-barogeochemical and isotope data of study of quartz in association with tourmaline of greisen and pegmatites of the region

Минерал Mineral	n	$T_{\text{гом}}, ^\circ\text{C}$ $T_{\text{гом}}, ^\circ\text{C}$	Солёность флюидных включений, мас. %-экв. Salinity of fluid inclusion, wt. %-equ.	$\delta^{18}\text{O}$, ‰ SMOW
Кварц в ассоциации с турмалином Берёзовского проявления пегматитов Quartz in association with tourmaline of Berezovskoe pegmatite manifestation	2	550–576	23–25	+10,9–+12,6
Кварц в ассоциации с турмалином Даниловского месторождения пегматитов Quartz in association with tourmaline of Danilovskoe pegmatite deposit	3	567–580	25–27	+11,2–+13,1
Кварц в ассоциации с турмалином Колыванского грейзенового месторождения Quartz in association with tourmaline of Kolyvanskoe greisen deposit	2	395–405	16,7–17,2	+1,2–+2,3
Кварц в ассоциации с турмалином Казандинского месторождения Quartz in association with tourmaline of Kazandinskoe deposit	2	402–410	15,2–17,3	+1,3–+2,1
Кварц грейзенов жилы 87 Калгутинского месторождения* Quartz of greisen lode 87 of Kalgutinskoe deposit	7	385	5,7–17,8	–

Примечание. n – количество замеров. Знаком * отмечены данные по [16].

Notes. n – amount of tests. The data after [16] are marked with *.

а содержание тяжёлого изотопа было ниже, чем в хондритах и мантии и варьировало от 1,2 до 2,3 ‰, что свидетельствует о смешении ювенильных флюидов с метеоритной водой. Последнее обстоятельство хорошо видно на рис. 4.

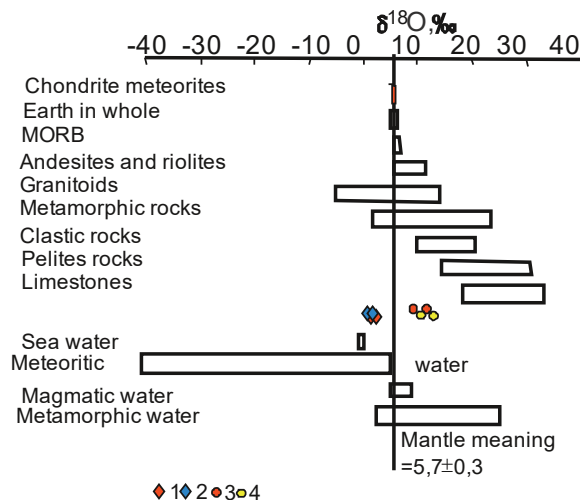


Рис. 4. Вариации $\delta^{18}\text{O}$ в разных типах пород и вод по [17] и в кварце пегматитов и грейзенов региона. Кварц грейзенов месторождений: 1 – Колыванского, 2 – Казандинского; кварц пегматитовых месторождений: 3 – Берёзовского, 4 – Даниловского

Fig. 4. Variation of $\delta^{18}\text{O}$ in different types of rocks and waters after [17] and in quartz of pegmatite and greisen deposits of the region. Quartz of greisen deposits: 1 – Kolyvanskoe, 2 – Kazandinskoe; quartz of pegmatite deposits: 3 – Berezovskoe, 4 – Danilovskoe

Интерпретация результатов

Важнейшим показателем в эндогенной геологии является проблема кислотности-основности среды. Многие исследователи единодушны в важной роли изменения кислотности среды, как одной из важнейших причин процессов минералообразо-

вания и рудогенеза [18, 19]. В.А. Жариковым [18] предложен условный потенциал ионизации минералов для количественной оценки кислотности-основности минералообразования. Чем выше потенциал ионизации минерала (y , какал/моль), тем выше кислотность.

Минералогическое изучение парагенезисов пегматитов и грейзенов региона показало, что в пегматитах турмалин чаще всего обнаруживается в зонах графических разностей, а его тесная ассоциация с определёнными минералами свидетельствует об относительно повышенной основности среды кристаллизации, по сравнению с грейзеновыми парагенезисами. Так, тесная ассоциация турмалина в пегматитах с альбитом ($y=204,7$), ортоклазом ($y=203,2$), мусковитом ($y=201,6$), алмандином ($y=197,8$), биотитом ($y=188,7$) в аддитивной характеристике условного потенциала ионизации даёт намного меньшую его величину ($y=199,2$), свидетельствуя о большей основности пегматитового парагенезиса.

Аддитивная характеристика грейзенового парагенезиса ($y=212,08$), где основную роль играет кварц ($y=227,3$), мусковит ($y=201,6$), вольфрамит, ($y=203$), берилл ($y=211,2$), молибденит ($y=211,5$), пирит ($y=218$), висмутин ($y=212$), указывает на значительно более высокую кислотность среды минералообразования.

В грейзеновых месторождениях региона главную роль в рудах играет вольфрам. А его перенос в растворах и отложение в рудных телах осуществляется преимущественно фтор-комплексами, которые в значительной степени определяют особенности проявления ТЭФ РЗЭ М-типа. В связи с этим возникает вопрос о связи активности фтор-комплексов и эффективных концентраций W в турмалине гидротермально-пневматолитовых месторождений. Эта зависимость может быть определена на диаграмме соотношений концентраций W и величин ТЭФ РЗЭ М-типа для турмалина грейзено-

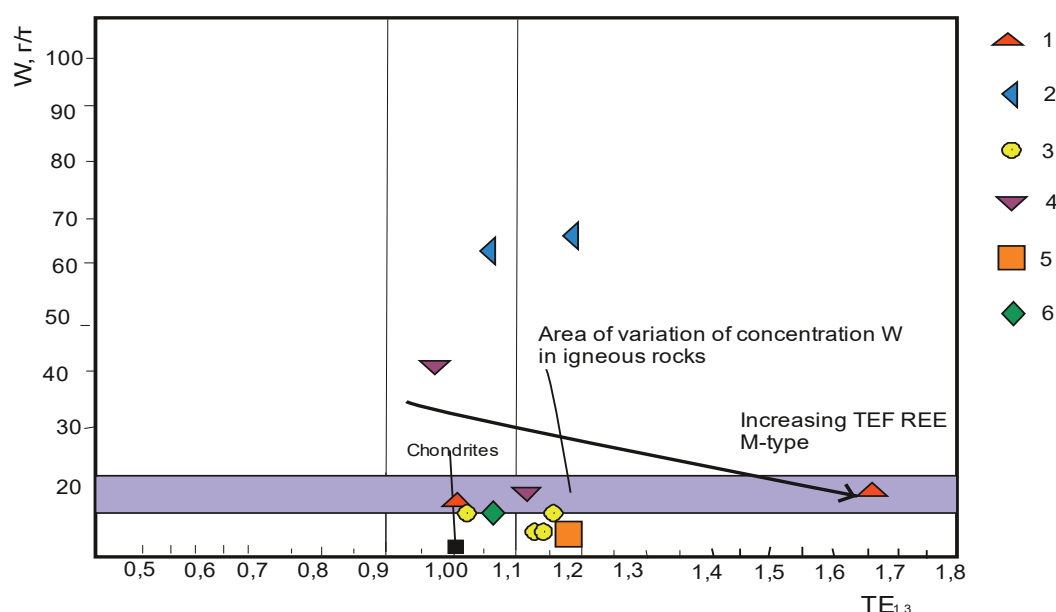


Рис. 5. Диаграмма $W-TE_{1,3}$ по [20] для турмалина грейзеновых месторождений Горного Алтая. Серая область на диаграмме выделена на основании средних содержаний вольфрама в изверженных породах по [21]. Содержания вольфрама в хондритах по [22]. Условные обозначения те же, что на рис. 2, а

Fig. 5. Plot of $W-TE_{1,3}$ after [20] for tourmaline of greisen deposits of Gorny Altai. The gray area on the diagram is detached on the basis of average contents of tungsten in igneous rocks after [21]. Contents of tungsten in chondrites are after [22]. Legend is the same as in Fig. 2, a

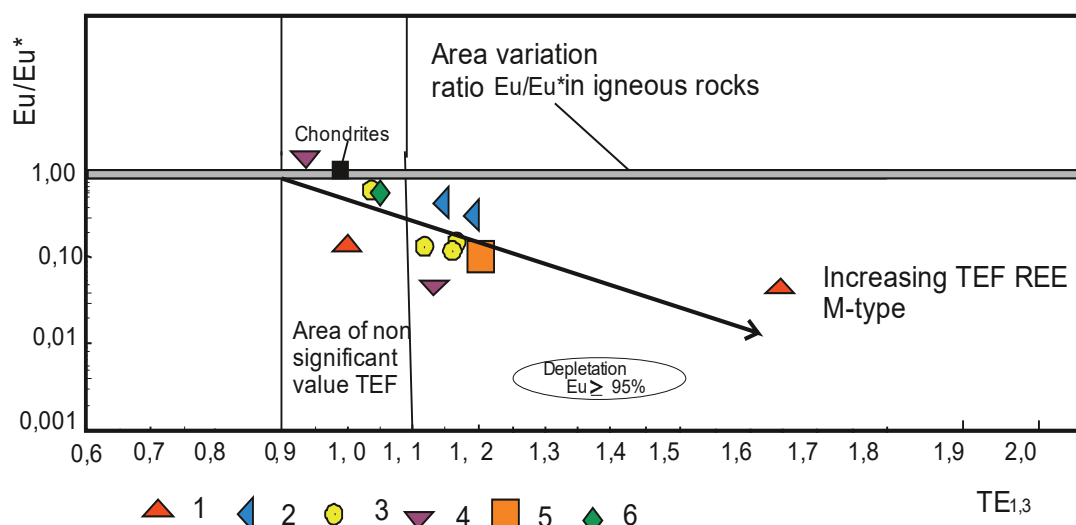


Рис. 6. Диаграмма $Eu/Eu^*-TE_{1,3}$ в турмалине грейзеновых месторождений Горного Алтая. Условные обозначения те же, что на рис. 2, а

Fig. 6. $Eu/Eu^*-TE_{1,3}$ plot in tourmaline of greisen deposits of Gorny Altai. Legend is the same as in Fig. 2, a

вых месторождений. Для грейзеновых месторождений Горного Алтая наблюдается уменьшение концентраций W со слабым увеличением величин ТЭФ РЗЭ М-типа (рис. 5).

Соотношение $Eu/Eu^*-TE_{1,3}$ в турмалине грейзеновых месторождений показывает снижение величин Eu/Eu^* с увеличением значений ТЭФ РЗЭ М-типа (рис. 6).

Увеличение величины ТЭФ REE М-типа коррелируется со слабым уменьшением значений Eu/Eu^* . Снижение величины Eu/Eu^* при проявлении

ТЭФ REE М-типа согласно рядам кислотности-щёлочности элементов [23] в спектре Sm, Gd, Eu (участвуют в расчёте величин Eu/Eu^*) в водно-сероводородных растворах при стандартных условиях отвечает повышению щёлочности среды. А высокие концентрации W в турмалине грейзеновых месторождений интерпретируются более высокой кислотностью среды.

По соотношениям Y/No и Zr/Hf элементы турмалина грейзеновых месторождений в основном не подчиняются заряд-радиус-контролируемому по-

ведению, за исключением единичных проб Казандинского и первой генерации Кумирского месторождений (рис. 7), для которых характерны повышенные концентрации вольфрама и положительное значение отношений Eu/Eu^* . Вероятно, неконтролируемое зарядом и радиусом поведение элементов (non-charge-and-radius-controlled) [24] встречается чаще всего в высоко эволюционированных расплавленных системах, которые обогащены H_2O , CO_2 и летучими компонентами, такими как Li, B, F и/или Cl на переходной стадии от силикатного расплава к водным флюидам [25]. В нашем случае максимальные концентрации вольфрама в турмалине грейзенов отвечает заряд-радиус-контролируемому поведению элементов.

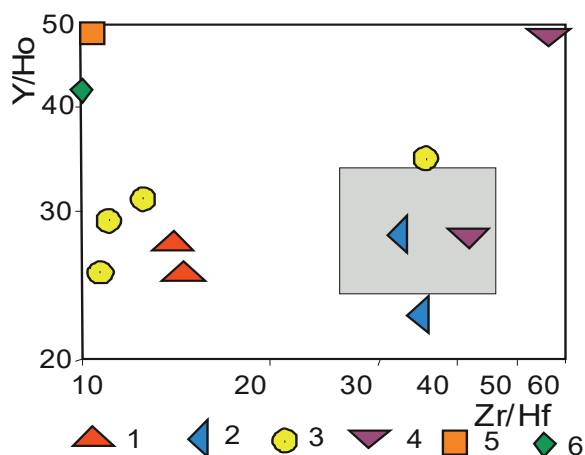


Рис. 7. Диаграмма Y/Ho – Zr/Hf в турмалинах грейзеновых месторождений Горного Алтая. Серое поле HARAC (CHARGE-and-RADIUS-CONTROLLED) на диаграмме выделено по [24]. Условные обозначения – на рис. 2, а

Fig. 7. Plot of Zr/Hf – Y/Ho for rocks of Makarevsky range. Gray field HARAC (CHARGE-and-RADIUS-CONTROLLED) is after [24]. Legend is in Fig. 2, a

В пегматитах региона наибольшее значение имеет тантал-ниобиевое оруденение. Для выяснения физико-химических особенностей формирования этого типа оруденения построена диаграмма соотношений Nb – $\text{TE}_{1,3}$ в турмалине пегматитовых месторождений (рис. 8). В этом случае увеличение концентраций ниобия в турмалине происходит с повышением значений ТЭФ РЗЭ М-типа. При этом уровень концентраций ниобия в турмалине пегматитов находится в промежутке между хондритовыми значениями и содержаниями в изверженных горных породах.

Снижение значений Eu/Eu^* происходит с увеличением величины $\text{TE}_{1,3}$ (рис. 9), что согласуется с повышением щёлочности среды. А учитывая данные диаграмм 6 и 7, можно заключить, что более высокие концентрации Nb в турмалине пегматитов отвечают также повышению кислотности среды.

По соотношениям Y/Ho и Zr/Hf элементы турмалина пегматитовых месторождений также преимущественно не подчиняются заряд-радиус-контролируемому поведению, за исключением единственной пробы пегматитового месторождения «Раиса» (рис. 10). Для турмалина последнего характерны самые высокие концентрации вольфрама и низкие ниобия.

Из всех пегматитов Алтайского региона Даниловское месторождение отличается наибольшей эволюционной продвинутостью и дифференцированностью, где в составе пегматитовых тел проявлены все зоны – кварцевое ядро, переходная, крупноблоковая. Турмалин из этих пегматитов характеризуется повышенными концентрациями Li, Cu, Zn, Sr, Ba, Ga, Sc. В них самые низкие значения тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ, а также минимальные концентрации Co, Ta, Mo, Sb, Ag, Bi. Для турмалина более эволюционированных пегматитов Требицкого плутона (Греция) повышенные концентрации отмечены для таких эл-

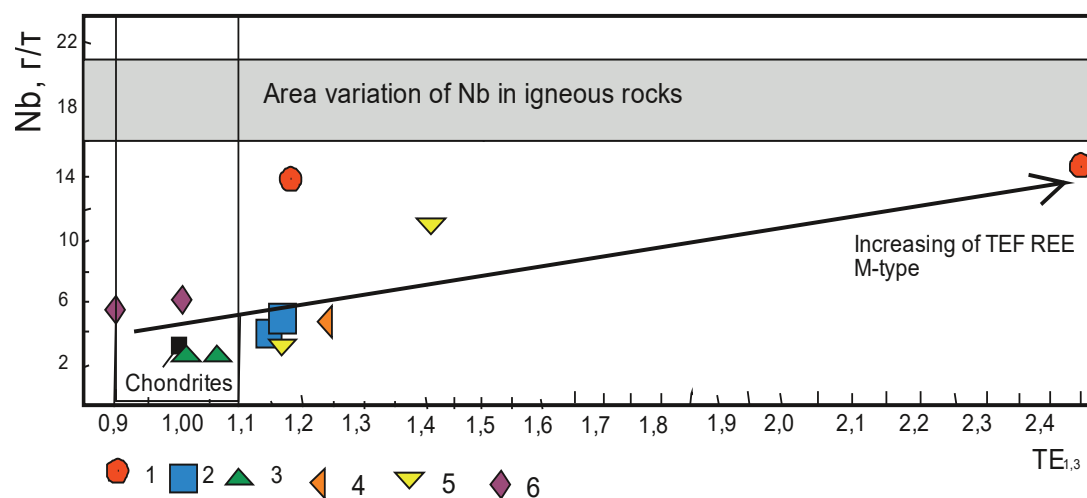


Рис. 8. Диаграмма Nb – $\text{TE}_{1,3}$ для турмалина пегматитовых месторождений Горного Алтая. Серая область на диаграмме выделена на основании средних содержаний вольфрама в изверженных породах по [21]. Содержания вольфрама в хондритах по [22]. Условные обозначения – на рис. 2, б

Fig. 8. Plot of Nb – $\text{TE}_{1,3}$ for tourmaline of pegmatite deposits of Gorny Altai. The gray area on diagram is detached on the basis of average contents of niobium in igneous rocks after [21]. Contents of niobium in chondrites is after [22]. Legend is in Fig. 2, b

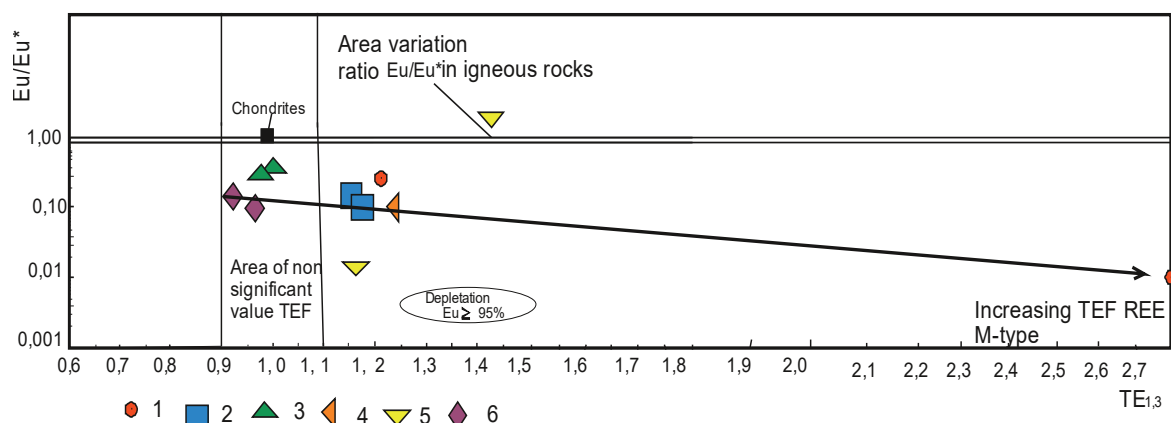


Рис. 9. Диаграмма $Eu/Eu^*-TE_{1,3}$ в турмалине пегматитовых месторождений Горного Алтая. Условные обозначения те же, что на рис. 2, б

Fig. 9. Plot $Eu/Eu^*-TE_{1,3}$ in tourmaline of pegmatite deposits of Gorny Altai. Legend is the same as in Fig. 2, b

элементов, как Ni, Co, Zn, Ga, Sc, Ce [26]. Следовательно, Даниловский турмалин близок к боросиликату пегматитов Требикского плутона, за исключением более низких концентраций Ni, Co.

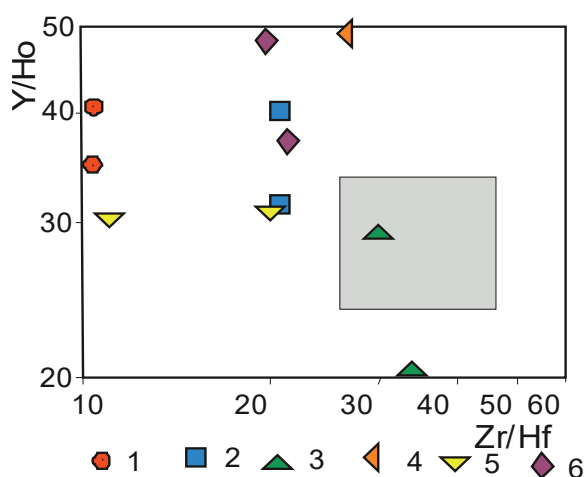


Рис. 10. Диаграмма $Y/Ho-Zr/Hf$ в турмалинах грейзеновых месторождений Горного Алтая. Серое поле HARAC (CHARGE-and-Radius-Controlled) на диаграмме выделено по [24]. Условные обозначения – на рис. 2, б

Fig. 10. Plot of $Zr/Hf-Y/Ho$ in tourmaline of greisen deposits of Gorny Altai. Gray field HARAC (CHARGE-and-Radius-Controlled) is marked after [24]. Legend is in Fig. 2, b

С другой стороны, шерл Даниловского месторождения может быть отнесён к Sc-обогащённой разновидности, обнаруживающей сходство с турмалином Краковичских пегматитов Молданубской зоны [14]. Для турмалина Краковичской зоны характерны высокие концентрации Li, Cu, Zn, Sr, Ba, Ga, Sc и повышенное содержание Mn. В турмалине Даниловского месторождения также наблюдаются повышенные концентрации MnO (0,7...0,8 вес. %).

Во всех случаях в грейзенах и пегматитах турмалин тесно ассоциирует с мусковитом, то есть оба минерала содержат в своих формулах группу OH. Это предполагает участие высоководных и бор-обо-

гащённых флюидов [7]. Появление высоко эволюционированных пегматитов с миароловыми пустотами (Даниловское, Точильное месторождения) предполагает их образование из обогащённых летучими силикатных расплавов (от 10 до 50 % H_2O) с обильными F, B, Cl, Li [27].

Наиболее высокие суммарные концентрации редких земель, а также тяжёлых РЗЭ характерны для грейзеновых месторождений Колыванского и Кумирского. Установлено, что повышенные концентрации тяжёлых РЗЭ в турмалине могут быть обусловлены формированием РЗЭ-фторидных комплексов в высокотемпературных пневматолито-гидротермальных растворах [28].

Заключение

Турмалин грейзеновых и пегматитовых месторождений Горного Алтая относится к шерлу и оксишерловому фойтиту и имеет значительные геохимические отличия по содержаниям элементов-примесей, кислотности-основности минералообразования, характеру проявления ТЭФ РЗЭ М-типа. Шерл 2 генерации Кумирского скандий-уран-бериллий-редкоземельного месторождения отнесён к Sc-обогащённому и REE-обогащённому турмалину. Боросиликат наиболее эволюционированных, дифференцированных миароловых пегматитов резко отличается от шерла других объектов повышенными концентрациями Li, Cu, Zn, Sr, Ba, Ga, Sc, Mn и обильным содержанием водных флюидов с такими летучими компонентами, как F, B, Cl, Li. Наиболее высокие концентрации W в турмалине грейзенов и Nb в шерле пегматитов обусловлены повышенной кислотностью флюидов. Для турмалинов грейзенов и пегматитов с самыми высокими концентрациями вольфрама отмечается подчинение заряд-радиус-контролируемое поведения элементов. Редкоземельное обогащение турмалина грейзенов и особенно обогащение тяжёлыми редкоземельными элементами обусловлено формированием РЗЭ-фторидных комплексов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ryan J.G., Langmuir C.H. The systematics of boron abundances in young volcanic rocks // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1993. – V. 57. – P. 1489–1498.
2. Taylor S.R., McLennan S.M. The geochemical evolution of the continental crust // *Reviews in Geophysics*. – 1995. – V. 33. – P. 241–265.
3. Nakano T., Nakamura E. Boron isotope geochemistry of metasedimentary rocks and tourmalines in a subduction zone metamorphic suite // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 2001. – V. 127. – P. 233–252.
4. Evolution of a tourmaline-bearing lawsonite eclogite from Elek-dag area (Central Pontides, N Turkey): evidence for infiltration of slab-derived B-rich fluids during exhumation / R. Altherr, G. Topuz, H. Marschall, T. Zack, T. Ludwig // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2004. – V. 148. – P. 409–425.
5. Syros Metasomatic Tourmaline: Evidence for Very High- $\delta^{11}\text{B}$ Fluids in Subduction Zones / H.R. Marschall, T. Ludwig, R. Altherr, A. Kalt, S. Tonarini // *Journal of Petrology*. – 2006. – V. 47. – P. 1915–1942.
6. On the occurrence and boron isotopic composition of tourmaline in (ultra) high-pressure metamorphic rocks / H.R. Marschall, A.V. Korsakov, G.L. Luvizotto, L. Nasdala, T. Ludwig // *Journal of the Geological Society*. – 2009. – V. 166. – P. 811–823.
7. Marschall H.R., Jiang S.-Y. Tourmaline isotopes: No Element Left Behind // *Elements*. – 2011. – V. 7. – P. 313–319.
8. Werding G., Schreyer W. Experimental studies on borosilicates and selected borates. Boron: Mineralogy, Petrology and Geochemistry // *Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy*. – 2002. – V. 33. – P. 117–163.
9. Hinsberg V.J., Henry D.J., Marschal H.R. Tourmaline: an ideal indicator of its host environment // *Can Mineral*. – 2011. – V. 49. – P. 1–16.
10. Tourmaline as a petrogenetic monitor of the origin and evolution of the Berry-Havey pegmatite (Maine, U.S.A.) / E. Roda-Robles, W. Simmons, A. Pesquera, P.P. Gil-Crespo, J. Nizamoff, J. Torres-Ruiz // *American Mineralogist*. – 2015. – V. 100. – P. 95–109.
11. Nomenclature of the tourmaline-supergrain minerals / D. Henry, M. Novak, F.C. Hawthorne et al. // *American Mineralogist*. – 2011. – V. 96. – P. 895–913.
12. Anders E., Greevesse N. Abundances of the elements: meteoric and solar // *Geochim. Cosmochim. Acta*. – 1989. – V. 53. – P. 197–214.
13. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites // *Geochim Cosmochim. Acta*. – 1999. – V. 63. – № 3/4. – P. 49–71.
14. Sc- and REE-rich tourmaline replaced by Sc-rich REE-bearing epidote-group mineral from the mixed (NYF+LCT) Kracovice pegmatite (Moldanubian Zone, Czech Republic) / R. Copjakova, R. Tkoda, M.V. Galiova, M. Novak, J. Cempirek // *American Mineralogist*. – 2015. – V. 100. – P. 1434–1451.
15. Гусев А.И., Гусев Н.И. Некоторые аспекты геохимии минералов Кумирского скандий-уран-редкоземельного месторождения Горного Алтая // *Успехи современного естествознания*. – 2014. – № 12. – С. 560–566.
16. Калгутинское редкометалльное месторождение (Горный Алтай): магматизм и рудогенез / А.А. Поцелуев, Л.П. Рихванов, А.Г. Владимиров, И.Ю. Анникова, Д.И. Бабкин, А.Ю. Никифоров, В.И. Котegov. – Томск: STT, 2008. – 226 с.
17. Rollinson H.R. Using geochemical data; evaluation, presentation. – Essex: London Group UK, 1994. – 352 p.
18. Жариков В.А. Кислотно-основные характеристики минералов // *Геология рудных месторождений*. – 1967. – № 5. – С. 75–89.
19. Helgeson H.C. Thermodynamic of hydrothermal system at elevated temperatures // *Amer. J. Sci.* – 1969. – V. 267. – P. 35–58.
20. Гусев А.И., Гусев Н.И. Магматизм и оруденение Южно-Калгутинского месторождения Горного Алтая // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. – 2016. – № 2 (26). – С. 110–120.
21. Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // *Геохимия*. – 1962. – № 7. – С. 555–572.
22. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Composition of chondrites // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* – 1988. – V. 201. – P. 535–544.
23. Маракушев А.А. Термодинамические факторы образования рудной зональности // *Сб.: Прогнозирование скрытого оруденения на основе зональности гидротермальных месторождений*. – М.: Наука, 1976. – С. 36–51.
24. Bau M., Dulski P. Comparative study of yttrium and rare-element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluids // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1995. – V. 119. – P. 213–223.
25. Veksler I.V. Liquid immiscibility and its role at the magmatic hydrothermal transition: a summary of experimental studies // *Chem. Geol.* – 2004. – V. 210. – P. 7–31.
26. Compositional trends in tourmaline from intragranitic NYF pegmatites of the Třebíč pluton, Czech Republic: an electron microprobe, Mössbauer and LA-ICP-MS study / M. Novak, R. Škoda, J. Filip, J. Macek, T. Vaculović // *Can. Mineral.* – 2011. – V. 49. – P. 359–380.
27. Thomas R., Davidson P. Origin of miarolitic pegmatites in the Königshain granite/Lusatia // *Lithos*. – 2016. – V. 260. – P. 225–241.
28. Tourmaline as a recorder of magmatic-hydrothermal evolution: an in situ major and trace element analysis of tourmaline from the Qitianling batholith, South China / S.-Y. Yang, S.-Y. Jiang, K.-D. Zhao, B.-Z. Dai, T. Yang // *Contrib. Miner. Petrol.* – 2015. – V. 170. – P. 42–56.

Поступила 30.12.2017 г.

Информация об авторах

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

UDC 550.4:549.2/.8

GEOCHEMISTRY OF TOURMALINE OF GREISENS AND PEGMATITES OF GORNY ALTAI

Anatoliy I. Gusev,

anzerg@mail.ru

Shukshin Altai Humane-Pedagogical University,
11, Sovetskaya street, Biysk, 659333, Russia.

The relevance of the discussed issue is caused by the need of researching content of tourmaline of greisen and pegmatites of Gorny Altai. Different types of ore mineralization of greisens rare earth pegmatites and jeweler-ornamental stones are related to greisens and pegmatites spatially and genetically.

The main aim of the research is to study geochemical features of tourmaline greisens and pegmatites using the experimental diagrams, which allow solving the genetic problems and the physic-chemical features of forming greisens and pegmatites.

The methods. Basic elements in tourmaline were defined on wave microprobe JEOL JXA-8100 (Analytic Centre of Institute geology and mineralogy SB RAS (Novosibirsk); rare and scattered elements were determined in rocks by inductively coupled plasma method on the mass spectrometer «OPTIMA-4300», the rest elements, including REE, were determined by La-ISP-MS methods in the Laboratory VSEGEI (Saint-Petersburg) and IMGRE (Moscow). Oxygen isotope composition was defined on the mass-spectrometer MI 1201 V in Institute of geology and mineralogy SB RAS (Novosibirsk).

Results. The paper introduces the data on geochemistry and petrology of tourmaline from greisens and pegmatites of Gorny Altai. Aluminous silicate of bore refers to schorl and oxschorl foitite. Tourmaline of greisens and pegmatites deposits of Gorny Altai have considerable geochemistry distinctions on contents elements-admixtures, acidic-basic of mineral crystallization, character of manifestation of TEF REE M-type. Tourmaline of more evolution, differentiated miarolitic pegmatites differ sharply from schorl of other objects in high concentration of Li, Cu, Zn, Sr, Ba, Ga, Sc, Mn and abundant content of water fluids with such volatile components as F, B, Cl, Li. The highest concentration of W in tourmaline of greisens and Nb in schorl of pegmatites are caused by high acidity of fluid media. Predominant part of tourmaline in the studied deposits does not comply with the charge-radius-control behavior of elements. Tourmaline of greisen and pegmatites with high concentration of tungsten comply with charge-radius-control behavior of elements.

Key words:

Geochemistry, greisens, rare metal pegmatite, schorl, oxschorl foitite, tetradic effect of REE fractionation, rare-earth elements, W, Mo, Be, Li, Ta, Nb, U, Sc, Gorny Altai.

REFERENCES

1. Ryan J.G., Langmuir C.H. The systematics of boron abundances in young volcanic rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, vol. 57, pp. 1489–1498.
2. Taylor S.R., McLennan S.M. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews in Geophysics*, 1995, vol. 33, pp. 241–265.
3. Nakano T., Nakamura E. Boron isotope geochemistry of metasedimentary rocks and tourmalines in a subduction zone metamorphic suite. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, vol. 127, pp. 233–252.
4. Altherr R., Topuz G., Marschall H., Zack T., Ludwig T. Evolution of a tourmaline-bearing lawsonite eclogite from Elekdag area (Central Pontides, N Turkey): evidence for infiltration of slab-derived B-rich fluids during exhumation. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2004, vol. 148, pp. 409–425.
5. Marschall H.R., Ludwig T., Altherr R., Kalt A., Tonarini S. Syros. Metasomatic Tourmaline: Evidence for Very High- $\delta^{11}\text{B}$ Fluids in Subduction Zones. *Journal of Petrology*, 2006, vol. 47, pp. 1915–1942.
6. Marschall H.R., Korsakov A.V., Luvizotto G.L., Nasdala L., Ludwig T. On the occurrence and boron isotopic composition of tourmaline in (ultra) high-pressure metamorphic rocks. *Journal of the Geological Society*, 2009, vol. 166, pp. 811–823.
7. Marschall H.R., Jiang S.-Y. Tourmaline isotopes: No Element Left Behind. *Elements*, 2011, vol. 7, pp. 313–319.
8. Werding G., Schreyer W. Experimental studies on borosilicates and selected borates. Boron: Mineralogy, Petrology and Geochemistry. *Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy*, 2002, vol. 33, pp. 117–163.
9. Hinsberg V.J., Henry D.J.H.R., Marschal H.R. Tourmaline: an ideal indicator of its host environment. *Can Mineral*, 2011, vol. 49, pp. 1–16.
10. Roda-Robles E., Simmons W., Pesquera A., Gil-Crespo P.P., Nizamoff J., Torres-Ruiz J. Tourmaline as a petrogenetic monitor of the origin and evolution of the Berry-Havey pegmatite (Maine, U.S.A.). *American Mineralogist*, 2015, vol. 100, pp. 95–109.
11. Henry D., Novak M., Hawthorne F.C. Nomenclature of the tourmaline-super group minerals. *American Mineralogist*, 2011, vol. 96, pp. 895–913.
12. Anders E., Greevesse N. Abundances of the elements: meteoric and solar. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1989, vol. 53, pp. 197–214.
13. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochim Cosmochim. Acta.*, 1999, vol. 63, no. 3, 4, pp. 49–71.
14. Copjakova R., Škoda R., Galiova M.V., Novak M., Cempirek J. Sc- and REE-rich tourmaline replaced by Sc-rich REE-bearing epidote-group mineral from the mixed (NYF+LCT) Kracovice pegmatite (Moldanubian Zone, Czech Republic). *American Mineralogist*, 2015, vol. 100, pp. 1434–1451.
15. Gusev A.I., Gusev N.I. Some aspects of geochemistry of minerals in Kumirskii scandium-uranium-rare earth elements deposit of Gorny Altai. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2014, no. 12, pp. 560–566. In Rus.
16. Potceluev A.A., Rikhvanov L.P., Vladimirov A.G., Annikova I.Yu., Babrin D.I., Nikiforov A.Yu., Kotegov V.I. *Kalgutinskoe redkometallnoe mestorozhdenie (Gorniy Altai): magmatizm i rudogenez* [Kalgutinskoye rare-metal deposition (Gorniy Altai): magmatism and ore genesis]. Tomsk, STT Publ., 2008. 226 p.
17. Rollinson H.R. *Using geochemical data; evaluation, presentation*. Essex, London Group UK, 1994. 352 p.
18. Zharikov V.A. Acidic-basic characteristics of minerals. *Geology of ore deposits*, 1967, no. 5, pp. 75–89.
19. Helgeson H.C. Thermodynamic of hydrothermal system at elevated temperatures. *Amer. J. Sci.*, 1969, vol. 267, pp. 35–58.

20. Gusev A.I., Gusev N.I. Magmatism and ore mineralization of South-Kalgutinskii deposit of Gorny Altai. *Geologiya i mineralno-syrevye resursy Sibiri*, 2016, no. 2 (26), pp. 110–120. In Rus.
21. Vinogradov A.P. Srednie sodержaniya khimicheskikh elementov v glavnykh tipakh izverzhennykh porod zemnoy kory [Average contents of chemical elements in basic type of igneous rocks of Earth crust]. *International Geochemistry*, 1962, no. 7, pp. 555–572.
22. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Composition of chondrites. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1988, vol. 201, pp. 535–544.
23. Marakushev A.A. Termodinamicheskie factory obrazovaniya rudnoy zonalnosti [Thermodynamic factors of forming ore zoning]. *Prognozirovanie skrytogo orudeneniya na osnove zonalnosti gidrotermal'nykh mestorozhdeniy* [Latent ore mineralization on the basis of zoning hydrothermal deposits]. Moscow, Nauka Publ., 1976. pp. 36–51.
24. Bau M., Dulski P. Comparative study of yttrium and rare-element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluids. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1995, vol. 119, pp. 213–223.
25. Veksler I.V. Liquid immiscibility and its role at the magmatic hydrothermal transition: a summary of experimental studies. *Chem. Geol.*, 2004, vol. 210, pp. 7–31.
26. Novak M., Škoda R., Filip J., Macek J., Vaculović T. Compositional trends in tourmaline from intragranitic NYF pegmatites of the Třebíč pluton, Czech Republic: an electron microprobe, Mössbauer and LA-ICP-MS study. *Can. Mineral*, 2011, vol. 49, pp. 359–380.
27. Thomas R., Davidson P. Origin of miarolitic pegmatites in the Königshain granite Lusatia. *Lithos*, 2016, vol. 260, pp. 225–241.
28. Yang S.-Y., Jiang S.-Y., Zhao K.-D., Dai B.-Z., Yang T. Tourmaline as a recorder of magmatic–hydrothermal evolution: an in situ major and trace element analysis of tourmaline from the Qitianling batholith, South China. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2015, vol. 170, pp. 42–56.

Received: 30 December 2017.

Information about the authors

Anatoliy I. Gusev, Dr. Sc., professor, Shukshin Altai Humane-Pedagogical University.

УДК 556.06:551.482.212

ТРАНСФОРМАЦИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОТ ИСТОКОВ К УСТЬЯМ РЕК

Савичев Олег Геннадьевич¹,
OSavichev@mail.ru

Домаренко Виктор Алексеевич¹,
victor_domarenko@mail.ru

Перегудина Елена Владимировна¹,
pere-elena@mail.ru

Лепокурова Олеся Евгеньевна^{2,1},
LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

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

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4.

Актуальность. Эффективность поисков полезных ископаемых определяется глубиной понимания процессов аккумуляции и рассеяния вещества. Исследование этих процессов предполагает анализ минерального и химического состава коренных пород, продуктов их переработки в зоне гипергенеза и их переотложения водными потоками.

Цель работы: выявление закономерностей изменения минерального и химического состава донных отложений по длине рек.

Методы исследования: методы определения минерального и химического состава донных отложений, ландшафтно-геохимический и статистические методы, термодинамические расчеты, математическое моделирование.

Результаты и выводы. Проведено обобщение данных о минеральном составе донных отложений водотоков в бассейнах рек Обь (Российская Федерация: реки Томь, Актру, Правая Сарала, Киргизка, Омутная) и Хонг (Вьетнам: реки Бан Тхи, Ченгу, Дай, Намду, Фодай), полученных в 2000–2017 гг. Показано, что основные закономерности изменения минерального состава донных отложений связаны с возрастанием доли кварца от истоков к устьям рек протяженностью более 11–20 км при одновременном снижении вклада минералов с показателем гипергенной устойчивости (логарифм произведения плотности и твердости) менее 1,26–1,27. Установлено, что участки с характерным минеральным составом донных отложений расположены ниже по течению от участков с условно однородным (или слабо меняющимся в многолетнем разрезе) химическим составом речных вод (смещение границ до 100 км). Сделан вывод о роли состава коренных пород и характера гипергенных геохимических процессов в формировании минерального состава донных отложений, определяющих условия разрушения частиц и аккумуляции продуктов взаимодействий в системе «вода–порода», устойчивых к химическому и физическому выветриванию.

Ключевые слова:

Донные отложения, минеральный и химический состав, трансформация минерального состава, бассейн реки Обь, бассейн реки Хонг.

Введение

Реки представляют собой постоянно действующие каналы перемещения значительной части вещества и энергии в пределах бассейнов стока. Соответственно, возникает закономерный вопрос – возможно ли использовать характеристики состояния рек для оценки геохимических особенностей водосбора? Положительный ответ на этот вопрос в части изучения химического состава речных вод представляет собой методологическую основу экологического мониторинга и нормирования воздействий на поверхностные водные объекты. Позитивный опыт получен и при проведении гидрогеохимических поисков полезных ископаемых с использованием данных о химическом составе вод малых водотоков в меженный период, когда в речном стоке преобладает подземная составляющая. Кроме того, определенное внимание уделяется и изучению химического состава донных отло-

жений – нижней границы поверхностных водных объектов, одновременно являющихся верхней границей геологической среды, причем как в целях поисков полезных ископаемых, так и при решении геоэкологических задач [1, 2]. Все это нашло отражение в огромном количестве публикаций и серии методических и нормативно-методических документов в Российской Федерации и других странах [1–5].

Минеральный состав донных отложений рек рассматривается обычно в рамках поисков твердых полезных ископаемых в комплексе с другими методами [1, 2], в ряде случаев – при проведении геоэкологических исследований. Однако такой важный аспект изучения минерального состава донных отложений, как трансформация его по всей протяженности водотока, исследован с нашей точки зрения недостаточно полно, что и определило цель исследования.

Объекты и методика исследования

Объектами исследования выбраны реки горных районов и прилегающих к ним территорий в Северной и Юго-Восточной Азии, отличающиеся геотектоническими обстановками (табл. 1). Водосборы этих рек сложены различными по составу и возрасту горными породами, что предопределило формирование в их пределах разнообразных полезных ископаемых, в том числе:

1) в Северной Азии:

1.1) в водосборе реки Правая Сарала в восточной части Кузнецкого Алатау (элемент речной сети «Правая Сарала – Сарала – Черный Июс – Чулым – Обь – Карское море» разрабатываются россыпные месторождения золота [6–8]); в геологическом строении этой территории принимают участие отложения венда-кембрия и девона, представленные метаморфогенно-осадочными и вулканогенными образованиями и интрузивными массивами гранитоидов кембро-ордовика и щелочными интрузивами девона;

1.2) в водосборе реки Томь (речная сеть «Томь – Обь – Карское море») и ее некоторых притоков в верхнем течении (река Бискамба – элемент речной сети «Бискамба – Тузуксу – Томь – Обь – Карское море») расположен ряд крупных разрабатываемых месторождений угля, черных, цветных и благородных металлов; водосбор Томи охватывает части горно-складчатых сооружений Кузнецкого Алатау, Горной Шории, Колывань-Томской складчатой зоны и Кузнецкой котловины и характеризуется значительным разнообразием геологических условий;

1.3) в водосборах реки Киргизка (элементе речной сети «Киргизка – Томь – Обь – Карское море») и ее притока – реки Омутной (Мутная), расположенных в нижнем течении Томи, в северной части Колывань-Томской складчатой зоны, находится Туганское циркон-ильменитовое месторождение и ряд проявлений полиметаллической и благородно-металлической минерализации, в том числе россыпные месторождения золота [8, 9]); водосбор сложен палеоген-четвертичными отложениями, залегающими на каменноугольных осадках, представленных песчаниками, алевролитами, глинистыми сланцами;

1.4) в горно-ледниковом бассейне Актру на северном макросклоне Северо-Чуйского хребта Центрального Алтая (элемент речной сети «Актру (Актур) – Чуя – Катунь – Обь – Карское море» выявлены рудоперспективные участки, приуроченные к Актуринской магмо-рудно-метасоматической системе [10]); водосбор реки Актру сложен гранитоидами Актуринского массива пермо-триасового возраста;

2) в Юго-Восточной Азии – в северной низко- и среднегорной части Вьетнама, в пределах бассейна реки Хонг (Красной) – в водосборах рек Бан Тхи, Дай, Ченгу (приток реки Бан Тхи), Фодай, Намду (притоки реки Дай)), в пределах которых расположены ряд проявлений и мелких месторождений свин-

ца, цинка, железа, марганца, разрабатываемых в настоящее время или ранее; в геологическом строении бассейна рек Бан Тхи, Ченгу, Дай, Фодай, Намду принимают участие осадки ордовик-силурийского и девонского возрастов, прорванные разновозрастными интрузивами габбро-гранитной серии [11, 12].

По размеру площади водосбора (табл. 1) река Томь относится к категории «больших» (гиперзональная река, основная часть водного стока которой формируется в горных районах (южная и восточная части); северо-западная часть бассейна относится к лесостепной зоне, северная часть – к подтаежной зоне), а остальные изученные водотоки – к «малым» (река Дай – в пределах исследованного участка). При этом особенностью реки Актру является наличие в ее водосборе семи ледников общей площадью 16,7 км² (снеговая линия на высоте 3200 м и выше), водосбора реки Правая Сарала – снежников, сохраняющихся в ряде случаев и в теплый период года, а водосборов рек Дай (в пределах исследованной части), Бан Тхи, Ченгу, Фодай, Намду – расположением в субэкваториальном поясе, в зоне переменно-влажных лесов. Таким образом, водосборы изученных рек расположены в различных природно-климатических и геологических обстановках, что позволяет охарактеризовать широкий спектр вариантов формирования донных отложений.

Методика исследования включала сбор и анализ материалов исследований, выполненных при непосредственном участии авторов в 2000, 2013, 2016, 2017 гг., и других данных. В июле 2000 г. О.Г. Савичевым были отобраны три пробы донных отложений реки Томь в г. Междуреченск (преобладающий тип руслового процесса – островно-осередковый), пгт. Крапивинский (пойменная многорукавность) и с. Тахтамышцево (выше г. Томск; ограниченное меандрирование и русловая многорукавность) в 0,2–1,0 м от уреза воды из верхнего слоя 0,2 м. Вес каждой из проб составил около 1 кг. Лабораторные работы выполнены в Томском государственном университете (ТГУ) и Аналитическом центре Объединенного Института геологии, геофизики и минералогии (ОИГГиМ СО РАН). Высушенные пробы были истерты и разделены на 3 группы: 1) 0,25–1,00; 2) 0,10–0,25; 3) менее 0,10 мм. В третьей группе дополнительно была отмыта фракция диаметром менее 0,02 мм. Отсортированный материал был подвергнут минералогическому, химическому (ТГУ) и рентгенофлуоресцентному анализу (ОИГГиМ СО РАН). В последнем случае навески всех фракций проб массой 3 г предварительно истирались до состояния пудры в агатовой ступке. Кроме того, выполнен рентгеноструктурный анализ глинистой фракции (ОИГГиМ СО РАН). Более подробно методика изучения проб донных отложений реки Томь, сведения об их минеральном и химическом составе изложены в [13].

Отбор проб донных отложений реки Актру выполнен В.В. Паромовым в июле–августе 2013 г. также в 0,2–1,0 м от уреза воды из слоя

0,2 м. Определение химического состава фракции до 1 мм проводилось в Томском политехническом университете (ТПУ) с использованием следующих методов: рН водной вытяжки – потенциометрический; концентрации Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , углерода водорастворимых органических веществ $\text{C}_{\text{орг}}$ в водной вытяжке – фотометрический; SO_4^{2-} в водной вытяжке – турбидиметрический; Na^+ , K^+ в водной вытяжке – ионная хроматография; NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ в водной вытяжке – фотометрический; Li, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Cd, Sn, Ba, Pb – метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой с извлечением кислоторастворимых форм элементов. Анализ проводился для фракции до 1 мм, полученной ситовым способом. Рентгенофазовый анализ подготовленных проб донных отложений выполнен в ТГУ. Информация о методике и результатах исследования приведена в [14].

Отбор проб донных отложений малых рек в северной части Вьетнама проведен в феврале 2016 г. Нгуен Ван Луеном из верхнего слоя 0,2 с последующим отсевом фракции менее 0,5 мм. Лабораторные работы по определению химического состава водных вытяжек из донных отложений выполнены в ТПУ с использованием потенциометрического (рН), титриметрического (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , CO_2 , Cl^- , перманганатная и бихроматная окисляемость), турбидиметрического (SO_4^{2-}), фотометрического (Si, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-}) методов, масс-спектрометрического метода с индуктивно-связанной плазмой (с использованием масс-спектрометра NexION 300D: Si, Li, Al, P, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Se, Rb, Sr, Cd, Sn, Sb, Ba, La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Au, Hg, Pb, Bi), ионной хроматографии (Na^+ , K^+). Кроме того, на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т ТПУ был проведен количественный нейтронно-активационный анализ проб донных отложений на 28 химических элемента и электронная микроскопия с использованием сканирующего электронного микроскопа HITACHI S-3400N с энерго-дисперсионной приставкой Bruker X Flash 4010. Более подробные сведения о методике и результатах изучения донных отложений малых рек в бассейне реки Хонг представлены в [15].

Отбор проб донных отложений рек Киргизка, Омутная, Сарала, Бискамба выполнен О.Г. Савичевым в июле 2017 г. из слоя 0,2 м. В реках Сарала и Бискамба отбор проводился в 0,2–1,0 м от уреза, в реках Киргизка и Омутная – смешанная проба из трех одинаковых частей, отобранных в точках, соответствующих 0,25; 0,5; 0,75 от ширины реки в створе. Масса пробы – 6 кг. Определение химического состава донных отложений и водных вытяжек (фракция до 1 мм) проводилось в ТПУ с использованием тех же методов, что и в случае рек Вьетнама. Рентгенофазовый анализ проб донных отложений без разделения на фракции проводился в Институте геологии и минералогии СО РАН (Мирошниченко Л.В.) на автоматизированном порошковом дифрактометре ДРОН-4 (излучение CuK_α ,

графитовый монохроматор). Дифракционные картины были отсканированы в интервале 2θ от 3° до 65° с шагом $0,05^\circ$, время сканирования в точке – 4 с, щель $0,5$ мм. Результаты изучения минерального и химического состава донных отложений рек Киргизка, Омутная, Правая Сарала, Бискамба приведены в табл. 2.

Во всех случаях, помимо проб донных отложений, проводился отбор проб речных вод из слоя 0,3–0,5 м от поверхности. Лабораторные работы выполнены в ТПУ с использованием следующих методов: рН – потенциометрический; SO_4^{2-} – турбидиметрический; Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , бихроматная окисляемость – титриметрический; соединения азота, фосфаты, Si – фотометрический; Al – флуориметрический; Na^+ , K^+ , Fe – атомная абсорбция, ионная хроматография; Zn, Pb, Cu – инверсионно-вольтамперометрический; в 2013 г. – Li, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Sr, Cd, Ba – атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой; в 2016–2017 гг. – Si, Li, Al, P, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Cd, Ba, La, Ce, Sm, Au, Hg, Pb и ряд других микроэлементов – масс-спектрометрический метод с индуктивно-связанной плазмой. Результаты изучения химического состава водных вытяжек из донных отложений и речных вод приведены в табл. 3 (показатели выбраны с учетом специфики расположенных вблизи месторождений или рудопроявлений).

Анализ результатов рассматриваемого исследования включал: 1) корреляционный и регрессионный анализ с уровнем значимости 5 % с использованием условия $R^2 > 0,36$, где R^2 – квадрат корреляционного отношения [16]; 2) расчет индексов насыщения η речных вод и водных вытяжек из донных отложений относительно ряда минералов (1) методом констант с использованием уравнения Дэвиса для определения коэффициентов активности заряженных частиц:

$$\eta = \lg \Pi A - \lg K_{\text{неq}}, \quad (1)$$

где ΠA – произведение активностей группы веществ; $K_{\text{неq}}$ – константа неустойчивости, кроме ряда минералов; описание методики расчетов приведено в [13].

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ данных о минеральном и химическом составе донных отложений изученных рек проводился с учетом следующих положений.

Во-первых, изменения гранулометрического состава донных отложений в целом описываются уравнением Штенберга (2), основанным на предположении пропорциональности изменения веса частицы произведению ее веса на протяженность участка перемещения [17–19].

$$d_{\text{sb},x} = d_{\text{sb},0} \exp(-k_d x), \quad (2)$$

где $d_{\text{sb},0}$ и $d_{\text{sb},x}$ – диаметр частицы донных отложений в начале и конце участка длиной x ; k_d – коэффициент, зависящий от прочности горной породы.

Таблица 1. Общая характеристика объектов исследования

Table 1. General characteristic of researched objects

Река/River	Пункт (широта; долгота, °) Points of water sampling (latitude, longitude, °)	Дата отбора Sampling date	Источник Information source	L, км (km)	F, км ² (km ²)	F _U , км ² (km ²)	Z, м/м (m/m)	Q _a , м ³ /с (m ³ /s)	Q _i , м ³ /с (m ³ /s)	Σ _i , мг/дм ³ (mg/dm ³)
Томь/Tom	г. Междуреченск Mejdurechensk town (53,40°; 88,06°)	11.07.00	[13]	169	5880	–	242	163	–	112,3
	пгт. Крапивинский Krapivinsky town (55,00°; 86,48°)	13.07.00		457	42600	–	128	804	–	204,3
	с. Тохтамышшево Tokhtamyshevo settlement (84,89°; 56,37°)	14.07.00		739	56050	–	72	1128	452	163,9
Актру/Aktru	исток/source	19.07.13	[14]	0,5	7,0	4,0	2487	0,19	1,70	63,4
	альплагерь/camp (50,08°; 87,82°)	18.07.13		5,0	33,4	15,7	2127	0,91	5,20	114,4
	нижняя часть поймы the bottom part of river plain	18.07.13		8,1	52,9	15,9	2056	1,44	5,30	125,6
	перевалка/crossing	18.07.13		12,6	76,5	16,1	1771	2,08	5,60	153,2
	устье р. Корумду the mouth of the Korumdu river	18.07.13		17,6	96,0	16,3	1582	2,62	5,70	150,1
	устье р. Актру the mouth of the Aktru river	20.07.13		24,2	158,7	17,5	1487	4,32	5,80	141,8
Бискамжа Biskamzha	выше п. Бискамжа Biskamzha settlement (53,46°; 89,57°)	18.07.17	Табл. 2, 3	22	95,0	5,0	655	2,63	–	214,4
	выше п. Бискамжа Biskamzha settlement (53,46°; 89,54°)	18.07.17		23,5	100,0	5,0	621	1,89	–	199,7
Правая Сарала Pravaya Sarala	10 м от выхода из озера flow out the lake (54,68°; 88,60°)	20.07.17		0,01	3,1	1,9	1100	0,05	–	39,2
	выше п. Приисковый Priiskovy settlement (54,65°; 88,68°)	20.07.17		6,8	34,0	15,3	908	0,57	–	25,2
	ниже п. Приисковый Priiskovy settlement (54,65° 88,74°)	20.07.17		10,4	48,0	20,0	804	0,81	–	68,7
Приток Саралы Sarala tributary	устье/mouth (54,64°; 88,63°)	20.07.17		2,8	6,1	3,0	1009	0,10	–	28,7
Киргизка Kirgizka	с. Халдеево/Khaldeev settlement (56,63 ; 85,61°)	24.07.17		4,4	14,0	6,2	180	0,09	0,01	585,3
	выше п. Семилужки Semiluzhki settlement (56,63°; 85,39°)	24.07.17		21,8	185	31	138	1,16	0,24	505,6
	п. Кузовлево/Kuzovlevo settlement (56,58°; 85,04°)	24.07.17		74,5	820	35	78	5,14	0,37	514,3
Омутная Omutnaya	с. Александровское Aleksandrovskoe settlment (56,38°; 85,38°)	24.07.17		14	65,0	16	151	0,41	0,01	378,3
Бантхи/Ban Thi	M1604 (105,51°; 22,24°)	19.02.16	[15]	3,68	16,1	4	291	0,74	0,23	309,6
	M1603 (105,49°; 22,22°)	19.02.16		7,84	71,4	20	264	3,30	0,42	315,9
	M1602 (105,49°; 22,21°)	19.02.16		8,99	75,4	27	228	3,48	0,42	333,3
	M1601 (105,46°; 22,21°)	19.02.16		13,14	134	27	147	6,19	0,71	318,4
Ченгу/Che Ngu	M1605 (105,48°; 22,20°)	19.02.16		7,98	48,0	7	173	2,22	0,29	290,0
Дай/Day	M1611 (105,57°; 22,13°)	20.02.16		16,12	43,8	7,7	296	2,02	0,98	277,0
	M1609 (105,54°; 22,07°)	20.02.16		29,57	110,5	12	238	5,11	1,24	231,0
	M1608 (105,53°; 22,06°)	20.02.16		32,82	164,8	13	225	7,61	3,46	224,7
	M1607 (105,55°; 22,01°)	20.02.16		41,68	182,3	23	206	8,42	4,39	193,3
Намду/Namdu	M1610 (105,52°; 22,09°)	20.02.16		11,32	40,8	6	254	1,88	1,11	264,5
Фодай/Pho Day	M1606 (105,56°; 22,02°)	20.02.16		32,9	129	10	215	5,96	1,53	102,6

Примечание: L – расстояние от истока реки до створа отбора пробы; F – площадь водосбора в створе отбора пробы; F_U – площадь верхней части водосбора без выраженной русловой сети; Z – высота пункта отбора пробы; Q_a и Q_i – расходы воды в среднем и на момент отбора пробы; Σ_i – сумма главных ионов (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻, Cl⁻) на момент отбора пробы; символ «–» означает отсутствие сведений.

Note: L is the distance to source; F is the basin area; F_U is the area of the top part of a basin without channel networks; Z is the gauge altitude; Q_a and Q_i are the water discharges: annual and at the sampling moment; Σ_i is the sum of the main ions (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻, Cl⁻) at the sampling moment; the symbol «–» means absence of data.

Таблица 2. Гранулометрический, минеральный и химический состав донных отложений малых рек в бассейне р. Обь в июле 2017 г.

Table 2. Fractional, mineral and chemical composition of river sediments of the minor rivers in the Ob river basin in July, 2017

Показатель Index		Ед. изм. Units	Бискамжа the Biskamzha river		р. Правая Сарала the Pravaya Sarala river			Приток р. Сарала, 2,8 км от истока Tributary of Sarala	р. Киргизка the Kirgizka river			р. Омутная – выше с. Александровское Omutnaya river
			23,5 км от истока 23,5 km to the source	22 км от истока 22 km to the source	10 м от озера 10 m out the lake	6,8 км от озера 6,8 km out the lake	0,4 км от озера 10,4 km out the lake		выше с. Халдеево Khaldeev	выше п. Семилужки Semiluzhki	выше п. Кузовлево Kuzovlevo	
Гранулометрический состав/Fraction composition												
Фракция (мм)/Fraction (mm)	>10	%	66,9	0,0	54,0	59,7	66,8	74,4	63,2	65,8	0,0	0,0
	7–10		5,6	0,0	16,8	19,4	13,5	7,3	15,7	16,6	0,0	0,0
	5–7		7,9	0,0	13,5	3,7	4,4	5,1	4,7	9,0	0,0	9,7
	3–5		8,6	0,0	5,9	2,7	4,6	6,6	4,6	2,5	0,0	6,0
	2–3		3,1	8,7	1,9	5,0	3,7	2,3	3,6	1,4	0,0	20,3
	1–2		0,5	52,6	4,1	3,5	2,9	2,3	1,7	1,9	21,1	47,8
	0,25–1		7,1	3,9	3,4	3,7	2,5	1,3	2,5	1,4	48,9	12,6
	<0,25	0,4	34,9	0,4	2,5	1,6	0,7	4,1	1,3	30,0	3,6	
	Средний диаметр Average diameter	мм mm	18,1	1,1	13,4	15,6	18,6	21,8	11,4	30,1	0,7	2,1
Минеральный состав/Mineral composition												
Содержание/Content, %	>50	–	–	–	–	–	–	Qz	Qz	Qz	Qz	–
	≈25–50	Pc	Pc, De	Pc, Cl	Pc, Cl	Pc, Cl	Pc, Cl	–	–	–	–	–
	≈15–25	–	–	–	–	–	–	–	mc	–	–	–
	≈5–15	Qz, K–Fs, Ap, Cl	Qz, Cl, K–Fs, Ap	Qz, Ap	Qz, Ap, mc	Qz, Ap, mc	Qz, Ap, De	Pc, mc, Cl, K–Fs	Pc, Cl, Ce	Pc, K–Fs	–	–
	≈3–5	tc, mc	mc, Ce	mc	K–Fs	De	mc, K–Fs, Ae	Ce	K–Fs, De	Cl, mc	Pc, K–Fs	–
	≈1–3	Ka	–	–	–	Ae	tc, Ka, Ge	Ka, Px	Px	Ap	Px	–
	≤1	Px	Ka, Px	Ka, Px	De, Px	tc, Px	Px	Ap, Py	Ap	Mg–Ce	Ap, Px	–
Химический состав/Chemical composition												
Na	%	0,92	0,71	0,83	0,92	–	0,80	0,97	0,90	1,01	0,97	–
K		2,29	3,27	1,60	1,34	–	1,00	1,00	<1	1,00	<1	–
Ca		1,36	1,97	1,26	1,57	–	1,50	1,57	1,37	1,44	1,20	–
Fe		3,307	3,446	3,144	3,462	–	3,602	4,339	3,679	3,579	3,429	–
Cr	мг/кг mg/kg	93,25	92,36	94,15	98,75	–	100,58	105,15	92,57	105,49	97,91	–
Zn		70,6	56,6	66,0	68,6	–	65,6	69,0	83,0	88,1	66,1	–
Rb		99	92	86	108	–	102	91	96	89	90	–
Sr		<60	219	<60	105	–	60	<60	105	<60	131	–
Ba		360	388	330	421	–	429	434	398	363	337	–
Au		0,024	0,020	0,027	0,012	–	0,010	0,021	0,048	0,032	0,024	–
La		31,82	27,36	29,57	33,34	–	30,43	33,50	34,69	36,01	34,85	–
Ce		72,56	64,07	68,93	78,87	–	71,70	69,96	72,00	73,98	71,12	–
Sm		5,58	4,89	5,05	6,00	–	5,37	6,22	6,29	6,19	5,97	–
Th		9,75	8,56	9,45	10,94	–	9,53	10,05	9,66	10,10	9,41	–
U		2,49	2,45	1,85	2,85	–	2,27	2,86	3,36	2,82	2,81	–

Примечание: Pc – плагиоклаз; K-Ps – калиевый полевой шпат; Ap – амфибол; Px – пироксены; Qz – кварц; Cl – хлорит; Ka – каолинит; Ce – кальцит (Mg-кальцит); Ae – арагонит; De – доломит; Ge – гетит; Py – пирит; mc – слюда; tc – тальк.

Note: Pc – plagioclase; K-Ps – Potassium feldspar; Ap – amphibole; Px – pyroxene; Qz – quartz; Cl – chlorite; Ka – kaolinite; Ce – calcite (Mg-calcite); Ae – aragonite; De – dolomite; Ge – Goethite; Py – pyrite; mc – mica; tc – talc.

Во-вторых, учитывалась зависимость между средней скоростью течения речных вод v_a и средним диаметром частиц донных отложений d_{sba} , выражаемая формулами Шези, Маннинга и Штриклера [17–19]:

$$v_a = C_\tau \sqrt{RJ},$$

$$C_\tau = n_\tau^{-1} h_a^{\frac{1}{6}},$$

$$n_\tau = k_\tau^{-1} d_{sba}^{\frac{1}{6}},$$

где C_τ – коэффициент Шези; R и h_a – гидравлический радиус и средняя глубина потока; J – уклон водной поверхности; k_τ – коэффициент, согласно [18], $k_\tau=33$, а по [19] $k_\tau=21,1$.

В-третьих, для многих рек наблюдается постоянство или незначительное изменение скорости течения с ростом площади водосбора и расхода воды [20]. С учетом того, что уклоны водной поверхности от истоков к устью в целом снижаются, следует ожидать и одновременное уменьшение среднего диаметра частиц донных отложений.

В-четвертых, при поисках полезных ископаемых обосновано использование показателя гипергенной устойчивости K_{HS} , предложенного Н.А. Шилов при изучении россыпных месторождений и учитывающего твердость H_m и плотность минералов ρ_m [6]:

$$K_{HS} = \lg(H_m \rho_m).$$

С учетом указанных выше положений можно предположить, что коэффициент k_d в уравнении (2) является функцией твердости H_m минералов, а при отсутствии локальных источников вещества при перемещении твердых частиц от истоков к устью вероятно уменьшение доли содержащихся в них минералов с минимальной твердостью и увеличение доли более твердых минералов.

Результаты выполненного анализа в целом подтверждают эти предположения. Наиболее заметные изменения минерального состава проявляются при изучении рек протяженностью более 11–20 км и заключаются в общих чертах в последовательном снижении доли минералов с показателем гипергенной устойчивости менее 1,23 и твердостью менее 7 (для кварца $K_{HS} \approx 1,26$ –1,27 и $H_m=7$) – олигоклаза, роговой обманки, мусковита, хлорита, каолинита и ряда других минералов (рис. 1). Доля кварца, напротив, увеличивается (рис. 2, 3).

Статистически значимая зависимость между твердостью минералов и коэффициентом k_d в ур. (2) по данным, полученным на реке Томь, выявлена только для фракции 0,06–0,10 мм (рис. 4). Причем критическое значение твердости минерала ($H_m=6,3$), при которой размеры частицы практически не меняются, несколько выше твердости кварца ($H_m=7$), являющегося, согласно [6], репером для определения группы россыпеобразующих минералов с $K_{HS} \geq 1,27$.

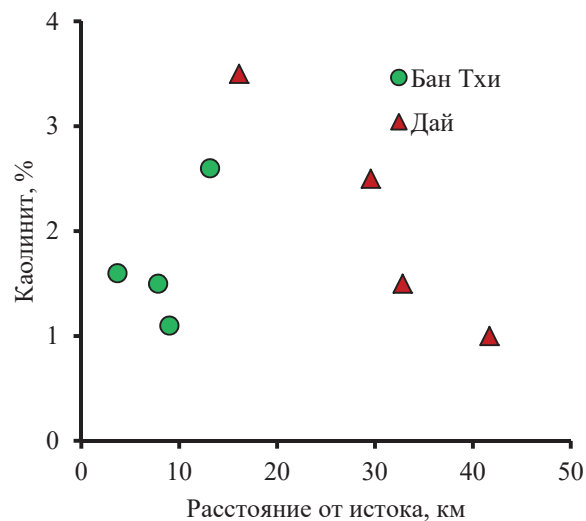


Рис. 1. Изменение доли каолинита во фракции донных отложений рек Бан Тхи и Дай (Вьетнам) менее 0,5 мм в 2016 г.

Fig. 1. Change of a part of kaolinite in the fraction of river sediments of the Ban Thi and Day rivers (Viet Nam) less than 0,5 mm in 2016

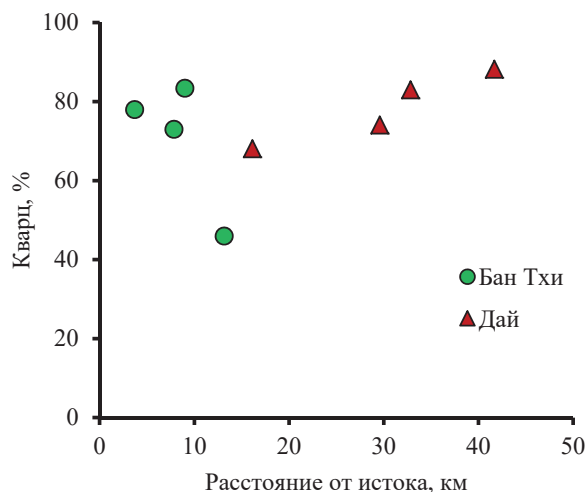


Рис. 2. Изменение доли кварца во фракции донных отложений рек Бан Тхи и Дай (Вьетнам) менее 0,5 мм в 2016 г.

Fig. 2. Change of a part of quartz in fraction of river sediments of the Ban Thi and Day rivers (Viet Nam) less than 0,5 mm in 2016

Обычно предполагается, что значения k_d характеризуют физическое воздействие на частицы донных отложений, максимум которого связан с истиранием мелкого гравия и дробления мелкой гальки [17]. В гидрогеохимии традиционно большое внимание уделяют растворению и выщелачиванию химических элементов из горных пород [21–23]. Общее представление о том, что значительная часть ионного состава вод (особенно катионного) формируется за счет растворения и выщелачивания водовмещающих и подстилающих горных пород является базовым постулатом в гео-

Таблица 3. Химический состав водных вытяжек донных отложений и воды малых рек в бассейне р. Обь в июле 2017 г.

Table 3. Chemical composition of water extracts of river sediments and river waters in the Ob river basin at July, 2017

Показа- тель Index	Ед. изм. Units	р. Бискамжа (выше п. Бискамжа) the Biskamzha river		р. Правая Сарала the Pravaya Sarala river			Приток р. Сарала, 2,8 км от истока Tributary of the Sarala, 2,8 km to source	р. Киргизка/the Kirgizka river				р. Омутная – выше с. Александровское the Omutnaya – Aleksandrovskoe settlement
		23,5 км от истока 23.5 km to source	22 км от истока 22 km to source	10 м от истока (озера) 10 m out lake	6,8 км от озера 6.8 km out lake	10,4 км от озера 10.4 km out lake		выше с. Халдеево Khaldeev settlement	выше п. Семилужки Semilujki settlement	выше п. Кузовлево Kuzovlevo settlement		
Химический состав водных вытяжек из донных отложений / Chemical compound of water extracts from ground adjournment												
pH	–	8,29	7,29	5,09	6,79	7,12	6,68	7,69	8,1	7,23	7,4	
$\Sigma t_{(ws)}$	мг/дм ³ mg/dm ³	54,5	81,1	67,5	44,4	56,6	53,0	154,7	113,7	251,5	77,2	
Na	мг/кг mg/kg	21,51	16,73	16,88	17,32	15,34	121,63	66,71	47,09	22,37	17,94	
Mg		84,84	56,81	17,97	21,57	28,33	52,67	72,96	72,03	40,52	23,56	
Al		177,32	45,47	61,32	41,27	38,80	96,06	43,17	91,39	38,63	12,30	
Si		402,9	118,7	72,6	87,1	81,2	176,7	135,1	183,3	121,4	47,0	
P		6,98	6,57	7,22	5,97	1,40	12,16	12,57	9,92	11,74	5,59	
K		98,53	34,85	86,81	30,28	21,52	113,38	72,30	67,24	84,99	133,17	
Ca		274,90	229,74	55,72	148,22	183,35	271,49	484,90	444,91	468,93	158,41	
Ti		2,252	1,256	2,611	1,864	1,126	6,685	0,899	1,624	1,046	0,375	
Cr		0,26902	0,07458	0,07887	0,04174	0,01795	3,49798	0,04257	0,13948	0,05499	<0,00125	
Mn		2,96186	1,65268	5,06949	3,88262	3,23029	21,24060	11,28676	7,68351	5,36103	1,85538	
Fe		155,893	70,549	51,299	64,462	51,629	133,256	88,170	120,012	154,789	29,859	
Ni		0,30980	0,08679	0,11326	0,05290	0,04750	0,73436	0,16315	0,22485	0,11146	0,03993	
Cu		0,43350	0,34649	0,15603	0,42334	0,28654	0,76533	0,33469	0,61997	0,24644	0,07795	
Zn		0,42866	0,15338	0,24293	0,28257	0,37558	0,83505	0,26477	0,30783	0,23861	0,05675	
Rb		0,14702	0,06465	0,14737	0,04414	0,02601	0,11470	0,08151	0,10340	0,08182	0,03451	
Sr		1,35421	0,87506	0,29502	0,68332	1,01556	2,54314	2,71129	2,43164	2,20829	0,83579	
Y		0,15595	0,13725	0,06099	0,04495	0,05048	0,09910	0,06877	0,16385	0,06956	0,01803	
Zr		0,07744	0,02904	0,03322	0,02244	0,02521	0,02223	0,05918	0,14769	0,06311	0,01438	
Cd		0,00231	0,00128	0,00370	0,00847	0,00449	0,02863	0,00118	0,00226	0,00123	0,00032	
Ba		2,2980	0,9934	0,6562	0,4664	0,5839	1,6958	1,1516	2,3212	1,6006	0,3373	
Au	<0,00012	<0,00012	<0,00012	0,00018	<0,00012	0,00013	<0,00012	<0,00012	<0,00012	<0,00012		
Hg	0,00207	<0,00125	<0,00125	0,00399	<0,00125	0,01941	<0,00125	<0,00125	<0,00125	<0,00125		
Pb	0,11565	0,07044	0,11618	0,24274	0,10487	0,16854	0,08610	0,23116	0,14016	0,01836		
La	0,16495	0,13432	0,05000	0,03582	0,03745	0,08177	0,09317	0,19172	0,08137	0,01945		
Ce	0,34809	0,18927	0,08915	0,08951	0,09313	0,23001	0,19206	0,45566	0,19717	0,04020		
Sm	0,03719	0,02638	0,01534	0,00983	0,01027	0,02337	0,02014	0,04732	0,02034	0,00463		
Th	0,00494	0,00182	0,00360	0,00162	0,00113	0,00193	0,00305	0,00141	0,00452	0,00134		
U	0,01055	0,01176	0,00624	0,00779	0,00583	0,00739	0,00309	0,00739	0,00455	0,00070		
Химический состав речных вод/Chemical composition of river waters												
pH	–	8,35	8,30	7,75	7,46	7,83	7,31	8,18	8,20	8,11	8,02	
CO ₂	мг/дм ³ mg/dm ³	1,5	1,5	4,4	3,5	3,5	3,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
$\Sigma t_{(w)}$		214,4	199,7	39,2	25,2	68,7	28,7	585,3	505,6	514,3	378,3	
PO ₄ ³⁻		0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,144	0,121	0,201	0,092	
Si		5,28	5,03	1,03	2,68	3,10	2,91	6,12	5,50	5,37	5,69	
Fe		0,0764	0,0876	0,0204	0,3157	0,1678	0,5844	0,5096	0,7570	0,6879	1,1249	
Al	мкг/дм ³ mkg/dm ³	14,4	13,1	10,8	226,9	125,7	56,3	60,2	65,8	49,0	35,0	
Ti		0,85	0,74	0,21	18,38	8,01	2,85	2,91	2,64	2,35	1,98	
Cr		0,73	0,65	0,26	1,83	0,03	109,98	1,83	1,67	2,83	1,28	
Mn		4,36	5,55	3,35	7,69	3,71	6,26	329,42	115,67	136,61	159,36	
Ni		0,19	0,21	0,11	0,55	0,03	18,91	1,54	1,53	1,57	2,15	
Cu		0,68	0,62	0,21	1,13	0,96	2,13	0,85	1,07	1,44	1,05	
Zn		0,20	0,18	0,15	1,77	1,67	3,69	0,76	0,59	1,43	1,19	
Rb		0,342	0,345	0,160	0,276	0,202	0,120	0,518	0,637	2,741	0,602	
Sr		161,5	142,5	17,2	24,9	52,4	16,7	529,4	494,4	413,1	330,0	
Y		0,120	0,118	0,008	0,165	0,090	0,078	0,191	0,201	0,184	0,163	
Zr		0,024	0,021	0,007	0,106	0,025	0,031	0,150	0,173	0,098	0,152	
Cd		0,003	0,001	0,002	0,015	0,024	0,014	0,009	0,005	0,010	0,009	

Окончание табл. 3

Table 3

Показатель Index	Ед. изм. Units	р. Бискамжа (выше п. Бискамжа) the Biskamzha river		р. Правая Сарала the Pravaya Sarala river			Приток р. Сарала, 2,8 км от истока Tributary of the Sarala, 2,8 km to source	р. Киргизка/the Kirgizka river			р. Омутная – выше с. Александровское the Omuthaya – Aleksandrovskoe settlement
		23,5 км от истока 23,5 km to source	22 км от истока 22 km to source	10 м от истока (озера) 10 m out lake	6,8 км от озера 6,8 km out lake	10,4 км от озера 10,4 km out lake		выше с. Халдеево Khaldeev settlement	выше п. Семилужки Semilujki settlement	выше п. Кузовлево Kuzovlevo settlement	
Ba	мкг/дм ³ mkg/dm ³	21,720	25,23	6,94	9,71	6,83	10,63	31,99	38,71	56,86	43,13
Au		<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Hg		<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050
Pb		0,03	0,02	0,03	0,49	0,24	0,09	0,15	0,14	0,21	0,12
La		0,078	0,077	0,006	0,133	0,081	0,044	0,165	0,150	0,168	0,139
Ce		0,081	0,071	0,013	0,255	0,113	0,077	0,316	0,285	0,348	0,263
Sm		0,0238	0,0180	<0,0005	0,0310	0,0173	0,0139	0,0371	0,0299	0,0358	0,0318
Th		<0,005	<0,005	<0,005	0,013	<0,005	<0,005	0,013	0,014	0,018	0,017
U		0,542	0,490	0,009	0,025	0,084	0,004	2,198	0,910	1,042	0,619

Примечание: $\Sigma_{t(w)}$ и $\Sigma_{t(sw)}$ – сумма главных ионов (табл. 1) в речных водах и водных вытяжках из донных отложений.

Note: $\Sigma_{t(w)}$ is the sum of the main ions (table 1) in river waters and water extracts from river sediments.

химии природных вод [24, 25]. Однако непосредственно с уменьшением размера частиц донных отложений эти процессы, как правило, не связываются, либо их роль не считается определяющей в предположении того, что скорость переноса частиц, их истирания и дробления больше скорости геохимических процессов.

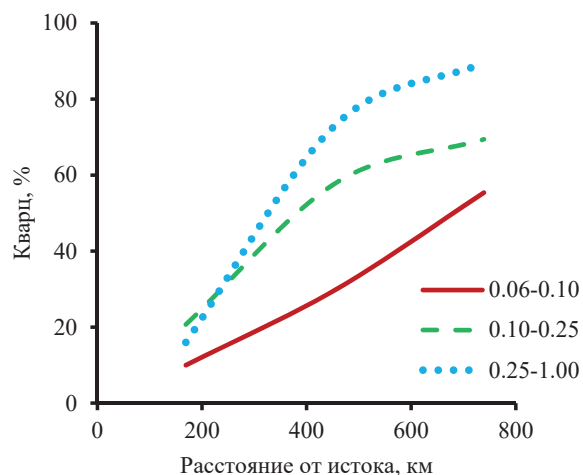


Рис. 3. Изменение доли кварца во фракциях 0,06–0,11, 0,10–0,25, 0,25–1,00 мм донных отложений реки Том в 2000 г.

Fig. 3. Change of a part of quartz in fractions of 0,06–0,11, 0,10–0,25, 0,25–1,00 mm of river sediments of the river Tom in 2000

Для проверки гипотезы о возможном влиянии растворения и выщелачивания на изменение размера и состава частиц донных отложений были выполнены расчеты индексов насыщения речных вод и водных вытяжек из донных отложений изученных рек (табл. 2, 3; данные [13–15]). Химический состав водных вытяжек в первом приближении ха-

рактеризует уровень содержания наиболее подвижных форм химических элементов в донных отложениях и может использоваться в качестве характеристики условий взаимодействия донных отложений, речных наносов и вод. Анализ результатов термодинамических расчетов показал, что и речные воды, и водные вытяжки из донных отложений неравновесны относительно минералов группы полевых шпатов на всем протяжении изученных участков водотоков. В то же время речные воды и водные вытяжки близки к равновесию с кварцем и глинистыми минералами, особенно каолинитом (рис. 5). Последний минерал обнаружен во многих пробах, но присутствует обычно в небольших количествах, что объясняется выносом глинистых частиц из русла в виде взвешенных наносов и осаджением на плесах и в пойме на спаде половодья и паводков [26].

Относительно кальцита водные вытяжки более недонасыщены, чем речные воды. Так, диапазон изменения индексов насыщения $\eta(\text{CaCO}_3)$ для вытяжек изменяется в диапазоне от $-10,1$ до $-0,7$, а для речных вод – от $-9,5$ до $0,6$. Характерной особенностью является то, что, во-первых, отрицательные значения $\eta(\text{CaCO}_3)$ чаще всего наблюдаются на участках длиной до 42 км от истока при средней протяженности 16 км, что в общих чертах согласуется с указанными выше фактами о наиболее заметных изменениях минерального состава донных отложений на участках, удаленных от истоков на 11–20 км и более. Во-вторых, значения $\eta(\text{CaCO}_3)$ менее $-1,5$ с наибольшей вероятностью приурочены к участкам рек с отсутствием кальцита в минеральном составе донных частиц, а способность растворения кальцита в водных вытяжках из донных отложений сохраняется даже в случае насыщения речных вод.

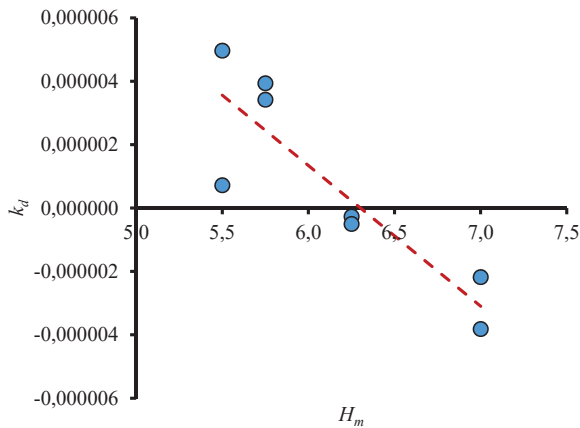


Рис. 4. Зависимость коэффициента k_d в ур. (2) от твердости H_m породообразующих минералов (олигоклаз, роговая обманка, пироксены, кварц) во фракции 0,06–0,10 мм донных отложениях реки Томь (2000 г.); $k_d = 2,798 \cdot 10^{-5} - (4,440 \cdot 10^{-6}) H_m$; $R^2 = 0,77$

Fig. 4. Dependence of k_d factor in equation (2) on hardness H_m of minerals (oligoclase; hornblende, pyroxene, quartz) in fraction of 0,06–0,10 mm of river sediments of the Tom river (in 2000); $k_d = 2,798 \cdot 10^{-5} - (4,440 \cdot 10^{-6}) H_m$; $R^2 = 0,77$

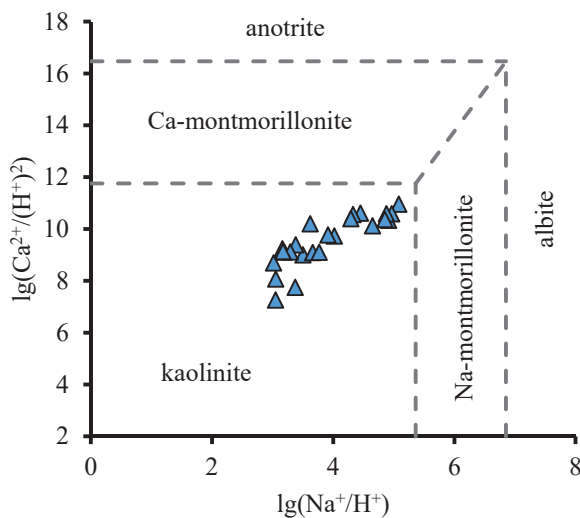


Рис. 5. Система $\text{HCl-H}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-CO}_2\text{-CaO-SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ при 25 °C, $\lg[\text{H}_4\text{SiO}_4] = -3,5$ и $P_{\text{CO}_2} = 101,5$ Па с нанесением данных по составу вод изученных рек (табл. 1, 3)

Fig. 5. System $\text{HCl-H}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-CO}_2\text{-CaO-SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ at 25 °C, $\lg[\text{H}_4\text{SiO}_4] = -3,5$ и $P_{\text{CO}_2} = 101,5$ Pa with drawing data of the researched river waters (table 1, 3)

Следовательно, уменьшение размеров донных частиц, в составе которых присутствует кальцит, может быть связано не только с физическими, но и химическими процессами. Такой же вывод можно сделать и применительно к другим минералам с показателем гипергенной устойчивости меньше, чем у кварца, содержание которого, напротив, возрастает. Одновременно с этим увеличивается и степень пересыщения речных вод относительно кварца. При содержании кварца в донных отложениях в диапазоне 5–15 % индекс насыщения относи-

тельно кварца $\eta(\text{SiO}_2)$ изменяется от –0,37 до 0,32 при среднем значении 0,08, а при содержании более 50 % – в интервале от 0,34 до 0,39 при среднем значении 0,36. Аналогичные выводы можно сделать и на основе данных, приведенных в работах Г.П. Карнауховой, Н.А. Рослякова и соавторов [27, 28].

Общее представление о механизме совместного влияния физических и геохимических процессов на изменение размеров, минерального и химического состава частиц донных отложений может быть получено при анализе структуры модели выщелачивания минералов, описанной в [29]:

$$v_{MR} = k_0 A \exp\left(-\frac{E_a}{R_c T}\right) a_{H^+}^{n(H^+)} f_1(I) \Pi_j a_j^{n(j)} f_j,$$

где v_{MR} – скорость растворения (выщелачивания) минерала в водной среде; k_0 – константа скорости растворения минерала; E_a , R_c , T – энергия активации, газовая постоянная и температура среды; a – активность иона; $f_1(I)$ – функция связи v_{MR} с ионной силой раствора I ; f_j – функция, характеризующая отклонение от равновесия; $n(H^+)$ и $n(j)$ – параметры, по смыслу близкие к стехиометрическим коэффициентам иона водорода и других веществ, участвующих в реакции; A – площадь поверхности минерала, которая в пористой среде, согласно [30], обратно пропорциональна диаметру частиц породы, соприкасающихся с водой, и плотности минерала, в них содержащегося; по [31] величина A почв возрастает с увеличением доли глинистых частиц.

При этом следует иметь в виду, что частицы донных отложений разной формы должны существенно отличаться друг от друга по величине скорости растворения (выщелачивания) содержащихся в них минералов не только из-за разной площади взаимодействия воды и породы (площадь поверхности куба со стороной d примерно в 1,9 раза больше площади шара такого же диаметра), но и вследствие неравномерного выщелачивания их отдельных элементов с одной массой, но разной площадью соприкосновения с раствором. Очевидно, что сглаживание граней частицы вещества будет происходить тем быстрее, чем меньше твердость породообразующих минералов и больше транспортирующая способность потока (больше количество частиц, выше скорость их перемещения и частота столкновений). Следовательно, процессы растворения (выщелачивания) минералов, входящих в состав частиц донных отложений, на первом этапе могут ослабить механическую прочность частиц, что способствует их истиранию и/или растрескиванию. Затем, после растрескивания крупных частиц и увеличения суммарной поверхности взаимодействия их водным раствором, дополнительно усиливается процесс растворения (выщелачивания), ограничением которого является образование слоя из вторичных минералов, равновесных к водному раствору. В ряде случаев продукты растворения горных пород могут образовывать не

только геохимический, но и физический барьер, например, при кольматации поверхностного слоя донных отложений.

Уравнение (8) позволяет получить только самое общее описание скорости растворения минералов в статистическом смысле, поскольку исследуемые процессы в целом являются нестационарными и случайными, часто – дискретными. Поэтому получение универсальных количественных оценок взаимосвязей между минеральным и химическим составом донных отложений, минеральным составом донных отложений, стоком наносов, речных вод и их химическим составом для всех природных зон и геологических условий сопряжено с многочисленными проблемами. Например, общая картина соотношения месторождений полезных ископаемых и рудопроявлений с содержаниями химических элементов в донных отложениях, водных вытяжках из них и, особенно, речных водах без учета геологического строения и преобладающих ландшафтов водосбора весьма неопределенная (табл. 2, 3).

Поэтому более продуктивным, по нашему мнению, является, с одной стороны, выявление общих региональных закономерностей для природных зон или крупных районов, а с другой – поиск эмпирических зависимостей на основе упрощения уравнения (8) для конкретных локальных условий. Исходя из этого, для малых водотоков в северной части Вьетнама были получены уравнения связи между концентрациями Pb и Zn в речных водах, водных вытяжках из донных отложений, значениями скорости течения, модуля водного стока, коэффициента дисперсии, а также уравнения связи между содержанием в донных отложениях урана и каолинита [15, 32].

На региональном уровне, судя по результатам анализа данных как по северной части Вьетнама, так и в Сибири, наиболее очевидным является отмеченное выше закономерное изменение содержания некоторых порообразующих минералов, например, увеличение вклада кварца от верховий к устьям рек и уменьшение доли минералов с меньшими, чем у кварца, значениями показателя гипергенной устойчивости. Тяжелые россыпеобразующие рудные минералы с $K_{HS} > 1,27$ накапливаются на локальных участках с линейными параметрами до 10–100 км, что в случае малых водотоков в целом совпадает с выводами, полученными в [33] для металлов платиновой группы. При этом необходимо отметить, что существенные изменения химического состава речных вод при наличии достаточно мощных источников загрязнения (сброс сточных вод предприятий гг. Новокузнецка, Кемерово, Томска в реку Томь [34], горно-обогатительных фабрик, связанных с добычей свинцово-цинковых руд во Вьетнаме, – в реки Дай и Бан Тхи [12]) обычно наблюдаются в пределах 10–11 км, что примерно соответствует пути осаж-

дения карбонатов в случае пересыщения ими речных вод [15].

С учетом этого можно предположить, что в случае длительного функционирования источника вещества при условно однородных условиях водного стока и водного режима, определяющих общие черты выноса и аккумуляции, размеры участков с характерным изменением химического состава речных вод, минерального и химического состава донных отложений взаимосвязаны (табл. 2, 3). Как правило, участки с характерным минеральным составом донных отложений расположены ниже по течению от участков с условно однородным (или слабо меняющимся в многолетнем разрезе) химическим составом речных вод, причем смещение границ таких участков достигает 100 км.

Заключение

В результате выполненного исследования получены следующие выводы:

- 1) основные закономерности изменения минерального состава донных отложений связаны с возрастанием доли кварца от истоков к устьям рек при одновременном снижении вклада минералов с показателем гипергенной устойчивости менее 1,26–1,27; указанные закономерности проявляются на участках рек, удаленных от истоков на 11–20 км и более;
- 2) при длительном функционировании источников вещества и относительно неизменных условиях формирования гидрологического режима границы участков со сменой минерального состава донных отложений расположены в 1–100 км ниже по течению от границы участков с однородным химическим составом речных вод;
- 3) транспортировка и формирование россыпей тяжелых рудных минералов ограничены участками ориентировочно 10–100 км;
- 4) отмечена двойственная роль геохимических процессов при уменьшении размеров частиц донных отложений по длине рек: 4.1) вначале процессы растворения и выщелачивания ослабляют механическую прочность крупных частиц, причем тем сильнее, чем больше форма частиц отличается от шара; 4.2) затем, после механического разрушения частиц в результате столкновения с другими частицами, происходит резкое увеличение площади соприкосновения воды и породы; 4.3) это, в свою очередь, приводит к усилению растворения и/или выщелачивания вплоть до момента, когда в поверхностном слое донных отложений не накапливается достаточное количество продуктов выветривания, устойчивых и к химическому, и к физическому выветриванию, в частности кварца.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-05-00042.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:200000. – М.: Институт минералогии, геохимии и кристаллографии редких элементов, 2002. – 92 с.
2. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. – М.: Недра, 1983. – 228 с.
3. Water Quality Assessments. A guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring. 2nd edition / Ed. by D. Chapman. – London: Chapman & Hall, 1996. – 651 p.
4. Guide to Hydrological Practices. V. I. Hydrology – from Measurement to Hydrological Information. WMO-No. 168. Sixth edition. – Geneva: World Meteorological Organization, 2008. – 296 p.
5. РД 52.24.309–2016. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши. Дата введения 2017–04–03. Министерство природных ресурсов и экологии РФ, Росгидромет. – Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2016. – 135 с.
6. Россыпные месторождения России и других стран СНГ (миро- рения, промышленные типы, стратегия развития минерально- сырьевой базы) / Н.Г. Патык-Кара, Б.И. Беневоольский, Л.З. Быховский, Л.Б. Зубков, А.А. Кременецкий, Е.В. Матве- ева, В.А. Мелкий, В.Е. Минорин, А.Г. Мочалов, Н.М. Рин- дзюнская, Б.В. Рыжов, Л.В. Спорыхина, Е.А. Черемисина / отв. ред. Н.П. Лавёров, Н.Г. Патык-Кара. – М.: Научный мир, 1997. – 479 с.
7. Саралинский золоторудный узел Кузнецкого Алатау / И.Н. Широких, Н.А. Росляков, В.И., Сотников А.С. Вассков / под ред. Г.В. Полякова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГТМ, 1998. – 236 с.
8. Недра России. В 2 т. Т. 1. Полезные ископаемые / А.А. Смы- слов, Н.В. Межеловский, А.Ф. Морозов, Е.А. Басков, А.И. Бурдэ, К.Б. Ильин, А.В. Козлов, Л.В. Кулачков, В.С. Ли- твиненко, Ю.В. Лир, Д.В. Рундквист, И.Г. Савина, С.В. Сен- дек, Л.И. Тихомиров, М.Г. Харламов / под ред. Н.В. Межелов- ского, А.А. Смыслова. – СПб.; М.: Горный ин-т, Межрегион. Центр по геол. Картографии, 2001. – 547 с.
9. Циркон-ильменитовые россыпные месторождения как потен- циальный 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 / под ред. Е.Н. Три- бунского, М.С. Паровича. – Кемерово: ООО «Сарс», 2001. – 214 с.
10. Магмо-рудно-метасоматическая система Актур в Горном Ал- тае / А.И. Гусев, А.Ф. Коробейников, А.Я. Пшеничкин, В.А. Домаренко // Успехи современного естествознания. – 2014. – № 7. – С. 75–79.
11. Nguyen Kinh Quoc. The Map of geological conditions and mineral resources in scale 1:200000 of Bac Kan province, sheet F48-XV. – Hanoi: General Department of Geology and Minerals of Vietnam, 2001. – 3 p.
12. Improved method for hydrochemical exploration of mineral re- sources / Nguyen Van Luyen, O.G. Savichev, V.A. Domarenko, Quach Duc Tin // Vietnam Journal of Earth Sciences. – 2017. – № 39 (2). – P. 167–180. DOI: 10.15625/0866-7187/39/2/9703.
13. Савичев О.Г., Колоколова О.В., Жуковская Е.А. Состав и рав- ноеие донных отложений р. Томь с речными водами // Гео- экология. – 2003. – № 2. – С. 108–119.
14. Savichev O., Matveenko I., Paromov V. Chemical Composition of Bottom Sediments in Small Mountain Rivers (Altai, the Russian Federation) // MATEC Web of Conferences. – 2016. – № 85. – P. 1–7. DOI: 10.1051/mateconf/20168501031.
15. Минералого-геохимические особенности донных отложений малых рек в междуречье рек Лю и Кау (Северный Вьетнам) / О.Г. Савичев, В.А. Домаренко, Е.В. Перегудина, Нгуен Ван Луюн, М.В. Шалдыбин, А.В. Канаки // Известия Томского по- литехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 9. – С. 102–113.
16. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conce- ptual models. P. I – A discussion of principles // Journal of Hy- drology. – 1970. – № 10 (3). – P. 282–290.
17. Чалов П.С. Руслвые процессы (руслведение). – М.: ИНФРА- М, 2017. – 569 с.
18. Караушев А.В. Речная гидравлика. – Л.: Гидрометеозидат, 1969. – 416 с.
19. Chang H.H. Fluvial Processes in River Engineering. – Malabar, Florida: Krieger publishing, 2008. – 432 p.
20. Виноградов Ю.А., Виноградова Т.А. Математическое модели- рование в гидрологии. – М.: ИЦ «Академия», 2010. – 304 с.
21. Перельман А.И. Геохимия эпигенетических процессов. – М.: Недра, 1965. – 272 с.
22. Lerman A. Geochemical Processes of Water and Sediment Envi- ronments. – New York: Wiley – Interscience Public, 1979. – 481 p.
23. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth // Geochemistry International. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
24. Алекин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеорологи- ческое изд-во, 1970. – 444 с.
25. Meybeck M. Global chemical weathering of surficial rocks estima- ted from river dissolved loads // American Journal of Science. – 1987. – V. 287. – P. 401–428.
26. An integrated sedimentary systems analysis of the R'io Bermejo (Argentina): Megafan character in the overfilled southern Chaco foreland basin / M.M. McGlue, P.H. Smith, H. Zani, A. Silva, B. Carrapa, A.S. Cohen, M.B. Pepper // Journal of Sedimentary Research. – 2016. – V. 86. – P. 1359–1377. DOI: http://dx.doi.org/10.2110/jsr.2016.82.
27. Катунь: экогеохимия ртути / Н.А. Росляков, В.С. Кусковский, Г.В. Нестеренко, С.Л. Шварцев, А.В. Геря, Ю.А. Калинин, Д.Ю. Крестовоздвиженский, А.А. Лукин, С.Р. Осинцев, С.Т. Рыбакова, А.Ю. Туровинин / под ред. Н.А. Рослякова, А.Н. Дмитриева. – Новосибирск: ОИГТМ СО РАН, 1992. – 180 с.
28. Карнаухова Г.А. Цикличность осадконакопления и физиче- ские свойства донных осадков в искусственных водоемах // Доклады академии наук. – 2016. – Т. 471. – № 5. – С. 567–570.
29. Lasaga A.C. Fundamental approaches in describing mineral disso- lution and precipitation rates // Reviews in Mineralogy. Chemi- cal Weathering Rates of Silicate Minerals / Mineralogical Society of America. – 1995. – V. 31. – P. 23–86.
30. White Ar.F. Chemical weathering rates of silicate minerals in so- ils // Reviews in Mineralogy. Chemical Weathering Rates of Sili- cate Minerals. – 1995. – V. 31. – P. 405–462.
31. Coupled modeling of biospheric and chemical weathering proces- ses at the continental scale / C. Roelandt, Y. Goddérès, M.-P. Bon- net, F. Sondag // Global Biogeochemical Cycles. – 2010. – V. 24. – № 2. – P. 6357–6374. DOI: 10.1029/2008GB003420.
32. Нгуен Ван Луюн. Эколого-геохимическое состояние подземных и речных вод, донных отложений водотоков в северной части Вьетнама (на примере уезда Чодонь, провинция Баккан): авто- реф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2017. – 22 с.
33. Минералы металлов платиновой группы из аллювия – инди- каторы коренной минерализации (на примере россыпей юга Си- бири) / С.М. Жмодик, Г.В. Нестеренко, Е.В. Айрияни, Д.К. Белянин, В.В. Колпаков, М.Ю. Подлипский, Н.С. Карма- нов // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 10. – С. 1828–1860. DOI: 10.15372/GiG20161005.
34. Савичев О.Г. Водные ресурсы Томской области. – Томск: Изд- во Томск. политехн. ун-та, 2010. – 248 с.

Поступила 31.01.2018 г.

Информация об авторах

Савичев О.Г., доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Домаренко В.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

Лепокурова О.Е., кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556.06:551.482.212

TRANSFORMATION OF MINERAL COMPOSITION OF RIVER SEDIMENTS FROM SOURCES TO MOUTH OF RIVERS

Oleg G. Savichev¹,
OSavichev@mail.ru

Viktor A. Domarenko¹,
viktor_domarenko@mail.ru

Elena V. Peregudina¹,
pere-elena@mail.ru

Olesya E. Lepokurova^{2,1},
LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

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

² Tomsk Branch of the Trofimuk institute of petroleum geology and geophysics of SB RAS,
4, Akademicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russia.

Relevance. The efficiency of mineral exploration is determined by the depth of understanding a matter accumulation and scattering. The study of these processes involves an analysis of mineral and chemical composition of bedrock, the products of their processing in the zone of hypergenesis and their redeposition by water streams.

The aim of the research is to reveal the trends of change in mineral and chemical composition of river sediments along the length of rivers.

Methods: landscape-geochemical and statistical methods, methods of definition of chemical and mineral composition of river bottom sediments, mathematical modelling.

Results and conclusions. The authors have generalized the data on mineral composition of river sediments in basins of the Ob river (in the Russian Federation: the Tom, Aktru, Pravaya Sarala, Kirgizka, Omutnaya rivers) and the Red river (Viet Nam: the Ban Thi, Che Ngu, Day, Namdu, Pho Day rivers), received in 2000–2017. It is shown that the main regularities of changes in the mineral composition of bottom sediments are associated with an increase in the share of quartz from the sources to the mouths of rivers with a length of more than 11–20 km, while reducing the contribution of minerals to the hypergenic resistance index (logarithm of factum of density and hardness) less than 1,26–1,27. It is established that the sites with a characteristic mineral composition of bottom sediments are located downstream from the sites with a conditionally uniform (or slightly variable in long-time period) chemical composition of river water (displacement of the boundaries to 100 km). A conclusion is drawn on the role of composition of bedrocks and the nature of hypergenic geochemical processes in formation of mineral composition of bottom sediments, which determine the conditions for destruction of particles and accumulation of products of interaction in the water–rock system resistant to chemical and physical weathering.

Key words:

River sediments, mineral and chemical composition, transformation of mineral composition, the Ob river basin, the Red river basin.

The research was financially supported by the RFBR grant no.17–05–00042.

REFERENCES

1. *Trebovaniya k proizvodstvu i rezultatam mnogotselevogo geokhimicheskogo kartirovaniya masshtaba 1:200000* [Requirements to multi-purpose geochemical mapping of scale 1:200000 and its results]. Moscow, IMGRE Press, 2002. 92 p.
2. *Instruktsiya po geokhimicheskim metodam poiskov rudnykh mestorozhdeniy* [The instruction on geochemical methods of searching ore deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 228 p.
3. *Water Quality Assessments. A guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring*. 2nd ed. Ed. by D. Chapman. London, Chapman & Hall, 1996. 651 p.
4. *Guide to Hydrological Practices*. Vol. I. *Hydrology – From Measurement to Hydrological Information*. WMO-No. 168. Sixth edition. Geneva, World Meteorological Organization, 2008. 296 p.
5. RD 52.24.309–2016. *Organizatsiya i provedeniye rezhimnykh nablyudeniya za sostoyaniem i zagryazneniem poverkhnostnykh vod sushii. Data vvedeniya 2017–04–03* [Organization and regime observations of state and pollution of surface waters of the land. Introduction 2017–04–03]. Moscow, Rostov-on-Don, Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, Roshydromet. Roshydromet, FGBU «SCI», 2016. 135 p.
6. Patyk-Kara N.G., Benevol'skiy B.I., Byhlovskiy L.Z., Zubkov L.B., Kremenetskiy A.A., Matveev E.V., Melkiy V.A., Minorin B.E., Mochalov A.G., Ridzyunskaya N.M., Ryzhov B.V., Sporykhina L.V., Cheremisina E.A. *Rossypnye mestorozhdeniya Rossii i drugikh stran SNG (mineragiya, promyshlennyye tipy, strategiya razvitiya mineralno-syrevooy bazy)* [Placer deposits of Russia and other CIS countries (Minerageny of places, geological and commercial types and development of raw materials base)]. Eds. N.P. Laverov, N.G. Patyk-Kara. Moscow, Nauchny mir Publ., 1997. 479 p.
7. Shirokikh I.N., Roslyakov N.A., Sotnikov V.I., Vaskov A.S. *Saralinskiy zolotorudny uzel Kuznetskogo Alatau* [Saralinsky gold ore cluster of the Kuznetsk Alatau]. Ed. by G.V. Polyakov. Novosibirsk, SB RAS Publ., 1998. 236 p.
8. Smyslov A.A., Mezhelevskiy N.V., Morozov A.F., Baskov E.A., Burde A.I., Ilin K.B., Kozlov A.V., Kulachkov L.V., Litvinenko V.S., Lir Yu.V., Rundkvist D.V., Savina I.G., Sendek S.V.,

- Tikhomirov L.I., Kharlamov M.G. *Nedra Rossii. V 2 t. T. 1. Poleznye iskopyayemye* [The bowels of Russia. In 2 vol. Vol. 1. Minerals]. Eds. N.V. Mezhelovsky, A.A. Smyslov. St-Petersburg, Moscow, Mining Institute, Center for geol. cartography, 2001. 547 p.
9. 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* [Zirkon-ilmenite placer deposits as a potential source of development of the West Siberian region]. Eds. E.N. Tribunsky, M.S. Parovinchak. Kemerovo, Sars LLC Publ., 2001. 214 p.
 10. Gusev A.I., Korobeynikov A.F., Pshenichkin A.Ya., Domarenko V.A. *Magmo-rudno-metasomaticheskaya sistema Akturu v Gornom Altaye* [Magmo-ore-metasomatic system of Akturu in the Gorny Altai]. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya – Successes of modern natural science*, 2014, no. 7, pp. 75–79.
 11. Nguyen Kinh Quoc. *The Map of geological conditions and mineral resources in scale 1:200000 of Bac Kan province, sheet F48-XV*. Hanoi, General Department of Geology and Minerals of Vietnam, 2001. 3 p.
 12. Nguyen Van Luyen, Savichev O.G., Domarenko V.A., Quach Duc Tin. Improved method for hydrochemical exploration of mineral resources. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 2017, no. 39 (2), pp. 167–180. DOI: 10.15625/0866-7187/39/2/9703.
 13. Savichev O.G., Kolokolova O.V., Zhukovskaya E.A. Sostav i ravnovesie donnykh otlozheniy r. Tom s rechnymi vodami [Composition and balance of river sediments of the Tom river with river waters]. *Geokhologiya – Geoecology*, 2003, no. 2, pp. 108–119.
 14. Savichev O., Matveenkov I., Paromov V. Chemical Composition of Bottom Sediments in Small Mountain Rivers (Altai, the Russian Federation). *MATEC Web of Conferences*, 2016, no. 85, pp. 1–7. DOI: 10.1051/mateconf/20168501031.
 15. Savichev O.G., Domarenko V.A., Peregudina E.V., Nguyen Van Luyen, Shal'dybin M.V., Kanaki A.V. Mineral-geochemical features of the minor river sediments in the interfluvial area of the Lo and Kau rivers (Northern Vietnam). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 9, pp. 102–113. In Rus.
 16. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, no. 10 (3), pp. 282–290.
 17. Chalov R.S. *Ruslovyte protsessy (ruslovedenie)* [Channel processes (course study)]. Moscow, INFRA-M Publ., 2017. 569 p.
 18. Karaushev A.V. *Rechnaya gidravlika* [River hydraulics]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969. 416 p.
 19. Chang H.H. *Fluvial Processes in River Engineering*. Malabar, Florida, Krieger publishing, 2008. 432 p.
 20. Vinogradov Yu.A., Vinogradova T.A. *Matematicheskoe modelirovanie v gidrologii* [Mathematical modeling in hydrology]. Moscow, Akademiya Publ., 2010. 304 p.
 21. Perelman A.I. *Geokhimiya epigeneticheskikh protsessov* [Geochemistry of epigenetic processes]. Moscow, Nedra Publ., 1965. 272 p.
 22. Lerman A. *Geochemical Processes of Water and Sediment Environments*. New York, Wiley – Interscience Public, 1979. 481 p.
 23. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
 24. Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Bases of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p.
 25. Meybeck M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *American Journal of Science*, 1987, vol. 287, pp. 401–428.
 26. McGlue M.M., Smith P.H., Zani H., Silva A., Carrapa B., Cohen A.S., Pepper M.B. An integrated sedimentary systems analysis of the Rio Bermejo (Argentina): Megafan character in the overfilled southern Chaco foreland basin. *Journal of Sedimentary Research*, 2016, vol. 86, pp. 1359–1377. DOI: <http://dx.doi.org/10.2110/jsr.2016.82>.
 27. Roslyakov N.A., Kuskovskiy V.S., Nesterenko G.V., Shvartsev S.L., Gerya A.V., Kalinin Yu.A., Krestovozdvizhenskii D.Yu., Lukin A.A., Osintsev S.R., Rybakova S.T., Turonin A.Yu. *Katun: ekogeokhimiya rtuty* [the Katun river: ecology geochemistry of mercury]. Eds. N.A. Roslyakov, A.N. Dmitriev. Novosibirsk, SB RAS Publ., 1992. 180 p.
 28. Karnaukhova G.A. Cyclicity of sedimentation and physical properties of bottom sediments in artificial reservoirs. *Doklady akademii nauk – Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 471, no. 5, pp. 567–570.
 29. Lasaga A.C. Fundamental approaches in describing mineral dissolution and precipitation rates. *Reviews in Mineralogy. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals. Mineralogical Society of America*, 1995, vol. 31, pp. 23–86.
 30. White Ar.F. Chemical weathering rates of silicate minerals in soils. *Reviews in Mineralogy. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals / Mineralogical Society of America*, 1995, vol. 31, pp. 405–462.
 31. Roelandt C., Goddérès Y., Bonnet M.-P., Sondag F. Coupled modeling of biospheric and chemical weathering processes at the continental scale. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, vol. 24, no. 2, pp. 6357–6374. DOI: 10.1029/2008GB003420.
 32. Nguen Van Luen. *Ekologo-geokhimicheskoe sostoyanie podzemnykh i rechnykh vod, donnykh otlozheniy vodotokov v severnoy chasti Vetnama (na primere uezda Chodon, provintsiiya Bakkan)*. Dis. Kand. Nauk [Ecological and geochemical condition of ground and river waters, river sediments of the minor rivers in the Northern part of Vietnam (by the example of Chodon district, Baccan province). Cand. Diss.]. Tomsk, 2017. 22 p.
 33. Zhmodik S.M., Nesterenko G.V., Ayriyants E.V., Belyanin D.K., Kolpakov V.V., Podlipkiy M.Yu., Karmanov N.S. Minerals of platinum group metals from alluvium are indicators of indigenous mineralization (on the example of placers of southern Siberia). *Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 10, pp. 1828–1860. DOI: 10.15372/GiG20161005.
 34. Savichev O.G. *Vodnye resursy Tomskoy oblasti* [Water resources of the Tomsk region]. Tomsk, TPU Publ. house, 2010. 248 p.

Received: 31 January 2018.

Information about the authors

Oleg G. Savichev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Viktor A. Domarenko, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elena V. Peregudina, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Olesya E. Lepokurova, Cand. Sc., head of Laboratory, Tomsk Branch of the Trofimuk institute of petroleum geology and geophysics of SB RAS; associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 624.042.12

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ БЕСКАНАЛЬНЫХ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ТЕРМИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННЫХ, ТЕПЛОПРОВОДОВ СО СТАРТОВЫМИ КОМПЕНСАТОРАМИ

Белиловец Виталий Игоревич¹,
vitaliy.belilovec@mail.ru

Липовка Юрий Львович¹,
lipovka.j.l@gmail.com

¹ Сибирский федеральный университет,
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

Актуальность. Значимым направлением в теплоснабжении является проектирование подземных бесканальных тепловых сетей, которые позволяют существенно снизить капиталовложения по сравнению с надземными или полностью канальными сетями. Использование оптимального количества стартовых компенсаторов позволяет проектировать протяженные прямолинейные участки подземных бесканальных теплопроводов. В настоящее время проектирование и строительство предварительно термически напряженных бесканальных трубопроводов тепловых сетей вызывает существенные вопросы у специалистов. Современной специализированной литературы по данному направлению не так много. Бесканальная прокладка требует более строгого внимания к решению вопросов компенсации температурных расширений. Таким образом, уточненные методы расчета компенсации температурных расширений труб и применение бесканального способа прокладки участков тепловых сетей позволяют экономить десятки миллионов рублей.

Цель: разработка методики расчета компенсации температурных расширений подземных бесканальных, предварительно термически напряженных, стальных трубопроводов водяных тепловых сетей со стартовыми компенсаторами.

Методы: математическое моделирование напряженно-деформированного состояния участка бесканального теплопровода со стартовыми компенсаторами; численное решение тестовой задачи для участка теплопровода с известными характеристиками с использованием разработанной методики.

Результаты. Предложена методика расчета подземных бесканальных, предварительно термически напряженных, трубопроводов тепловых сетей со стартовыми компенсаторами на компенсацию температурных расширений. Методика позволяет определить оптимальное количество стартовых компенсаторов на протяженных участках теплопроводов за счет максимального использования запасов прочности. Получены графические зависимости величины напряжения от длины участка и количества установленных на нем стартовых компенсаторов. Построение по разработанной методике подобных зависимостей позволяет получать полную картину напряженно-деформированного состояния для участков теплопроводов со стартовыми компенсаторами.

Ключевые слова:

Тепловые сети, бесканальный теплопровод, температурные расширения трубопроводов, предварительно напряженный теплопровод, осевые стартовые компенсаторы.

Введение

Тепловые сети являются самым дорогостоящим звеном системы теплоснабжения. Теплопроводы в процессе эксплуатации испытывают различные нагрузки и воздействия. Правильно выполненные расчеты теплопроводов на нагрузки и воздействия обеспечивают надежность тепловых сетей. В работе [1] представлена оценка надежности городских тепловых сетей с точки зрения прочностных расчетов. Совокупность нагружающих факторов зависит от способа прокладки теплопровода, который может быть надземным, подземным канальным или бесканальным. Однако, независимо от способа прокладки, для трубопроводов тепловых сетей главным нагружающим фактором является температурное расширение. Как известно, стальные трубы расширяются в продольном направлении после начала движения по ним теплоносителя. Если не предусмотреть на теплотрассе специальных компенсирующих устройств, воспринимающих на себя эти расширения, то неизбежны порывы труб на участках сетей, повреждение опор и подключенного к трубопроводам оборудования.

Бесканальная прокладка по сей день остается перспективным направлением в теплоснабжении и позволяет существенно снизить капиталовложения по сравнению с надземными или полностью канальными сетями, но имеет собственную специфику при проектировании.

Авторы статьи, основываясь на собственном опыте, определили сравнительную полную стоимость сооружения одного километра канальной и бесканальной теплотрассы при различных диаметрах трубопровода. Результаты представлены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, экономия капиталовложений при использовании бесканального способа прокладки тепловых сетей составляет от 20 до 50 % по сравнению с канальной прокладкой. Процент экономии зависит от диаметра трубопровода: наибольшая экономия (50 %) наблюдается при использовании диаметра 100 мм, далее, по мере роста диаметра, экономия снижается и при диаметре 1200–1400 мм составляет 20 %. Средний процент экономии по всему диапазону диаметров от 100 до 1400 мм составляет 30 %.

Задача проектирования бесканального теплопровода значительно сложнее, чем надземного или

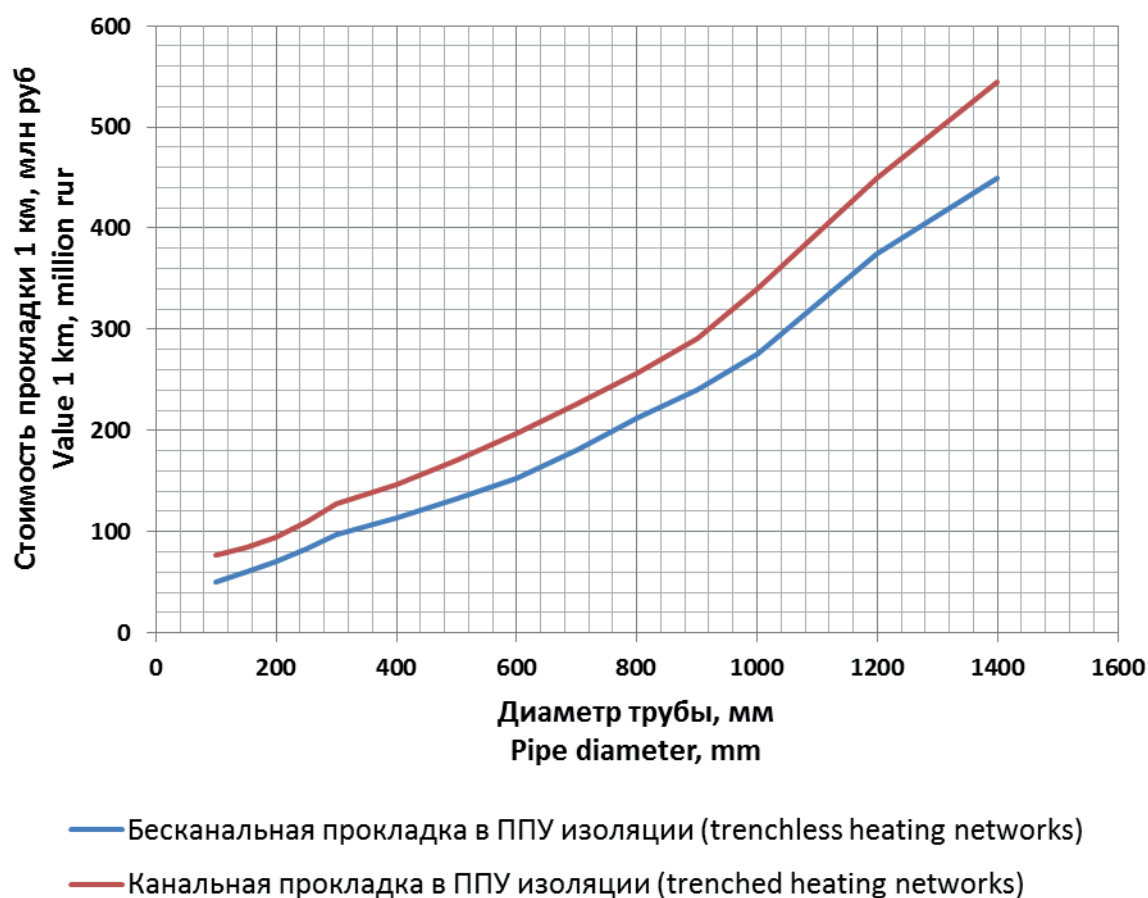


Рис. 1. Стоимость одного километра канальной и бесканальной теплотрассы при разных диаметрах

Fig. 1. Cost of 1 km of trenched and trenchless heating networks at different diameters

канального. В работе [2] отражены некоторые теоретические стороны расчета температурных деформаций подземных бесканальных теплопроводов. Алгоритмы для поэтапного анализа напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов представлены в работе [3]. Бесканальная теплотрасса на всем своем протяжении имеет зоны скольжения и зоны неподвижности. В зонах скольжения осуществляется компенсация

температурных расширений теплопровода за счет угловых и линейных деформаций. В зонах неподвижности температурные расширения труб компенсируются осевыми напряжениями растяжения-сжатия.

На рис. 2 изображен пример схемы участка бесканального теплопровода, когда зоны неподвижности отсутствуют, а между зонами скольжения образуются мнимые неподвижные опоры – есте-

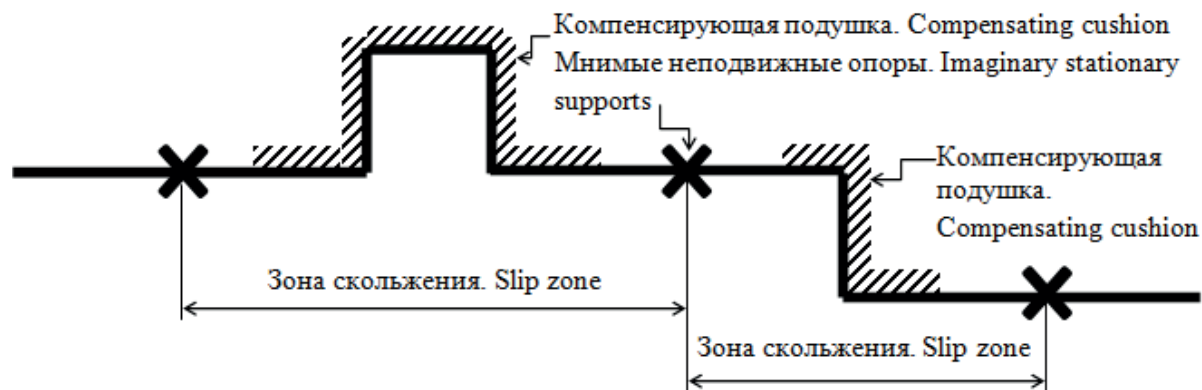


Рис. 2. Участок тепловой сети только с зонами скольжения и мнимыми неподвижными опорами

Fig. 2. Section of a heat supply network with slip zones and imaginary stationary supports

ственные неподвижные точки. Теплопровод на рис. 2 распадается на самокомпенсирующие участки П- и Z-образной конфигурации. Сопротивление грунта продольным и боковым перемещениям бесканального теплопровода приводит к тому, что осевые усилия возрастают на порядок, по сравнению со свободными от заземления грунта трубами. Таким образом, бесканальные участки теплосетей имеют низкую компенсирующую способность и большие нагрузки на реальные неподвижные опоры. Мнимые неподвижные опоры дают возможность уменьшить количество реальных неподвижных опор, однако определение местоположения этих опор на участках подземной бесканальной прокладки теплопроводов представляет достаточно трудоемкую задачу.

На рис. 3 представлен пример схемы участка бесканального теплопровода с зонами скольжения и неподвижности. Этот пример представляет собой более общий случай, встречающийся на практике, когда зоны скольжения, в местах самокомпенсации теплопровода, чередуются зонами неподвижности. В таких случаях не удастся обеспечить компенсацию участка от температурных расширений только путем поворотов теплотрассы, то есть самокомпенсацией. Поэтому, если изменить трассировку сети не представляется возможным, следует прибегнуть к другим методам компенсации температурных расширений, например, произвести предварительное термическое напряжение протяженных прямых участков теплопроводов с помощью стартовых компенсаторов или использовать осевые сильфонные компенсаторы.

Сильфонные компенсаторы воспринимают расширения за счет гофрированной стальной оболочки сильфона. Вопросы расчета сильфонных компенсаторов в тепловых сетях рассмотрены в работе [4]. В работе [5] представлен способ снижения потерь тепловой энергии и затрат при строительстве и эксплуатации тепловых сетей за счет применения осевых сильфонных компенсаторов для компенсации температурных расширений теплопроводов. В работе [6] рассмотрены вопросы назначенной наработки осевых сильфонных компенсаторов.

Известен способ предварительного термического напряжения изолированного теплопровода при помощи его разогрева до значения температуры,

равноудаленного от максимального и минимального эксплуатационного. Такой разогрев происходит в открытых траншеях, после чего они засыпаются грунтом. Таким образом, в теплопроводе возникают эксплуатационные напряжения растяжения и сжатия, которые по модулю не превышают половину расчетного напряжения. Расчетное напряжение приравнивается к напряжению, возникающему в теплопроводе при изменении его эксплуатационной температуры от минимального до максимального значения.

В условиях города нет возможности держать траншеи долгое время открытыми. Поэтому вариант с применением предварительного термического напряжения изолированного теплопровода в открытых траншеях нецелесообразен. В этом случае решение находят в применении осевых сильфонных стартовых компенсаторов. Стартовые компенсаторы основаны на принципе действия сильфонных компенсаторов. Отличие здесь в том, что стартовый компенсатор срабатывает только один раз (после предварительного нагрева теплопровода). При этом траншеи, кроме мест расположения стартовых компенсаторов, закрыты. После срабатывания стартовых компенсаторов их кромки завариваются, и компенсаторы с теплопроводом представляют единую конструкцию. С точки зрения строительной механики такая конструкция называется неразрезной.

Главные трудности при проектировании участка со стартовыми компенсаторами вызывает выбор оптимального количества компенсаторов на расчетном участке, а также расстояния между ними. В работе [7] рассмотрены вопросы проектирования и строительства предварительно напряженных теплопроводов со стартовыми компенсаторами.

При проектировании бесканальных, предварительно термически напряженных участков теплопроводов очень важен корректный выбор расчетных температур. При бесканальной прокладке грунт препятствует выпадению температур в область отрицательных значений и участвует в формировании температурного поля. Например, в работах [8, 9] представлены теоретические исследования процессов теплопереноса в зонах размещения теплопроводов.

Все температуры при расчете должны рассматриваться применительно к стальной части тепло-

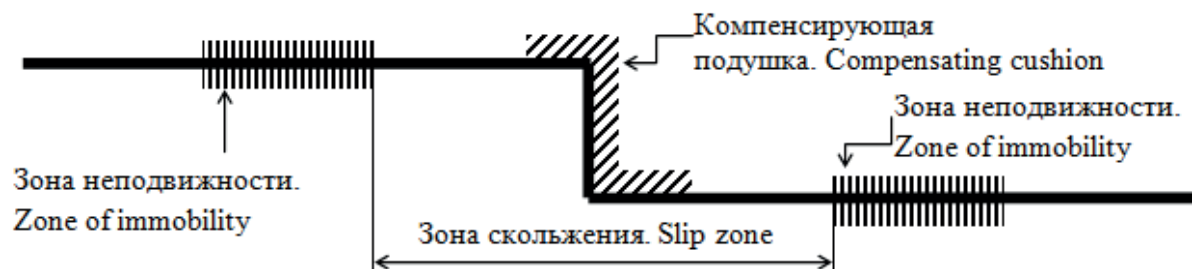


Рис. 3. Участок тепловой сети с зонами скольжения и зонами неподвижности

Fig. 3. Section of a heating network with slip zones and zones of immobility

проводов. При помощи графика отпуска тепловой энергии определяется максимальная эксплуатационная температура. Минимальная эксплуатационная температура подбирается путем прогнозирования. При выборе этой температуры часто возникают сложности. Однако можно руководствоваться следующей рекомендацией: если теплопроводы эксплуатируются как в отопительный период, так и круглогодично, то целесообразно принять значение минимальной эксплуатационной температуры $+8^\circ\text{C}$. Это объясняется тем, что после завершения отопительного сезона температура труб всегда превышает $+8^\circ\text{C}$, а когда сезон только начинается, значение соответствует температуре грунта, то есть около $+8^\circ\text{C}$. С большим запасом можно выбрать минимальную температуру эксплуатации, равную 0°C . Такое решение, при возможных авариях на теплопроводе, обеспечит на время ремонта положительную температуру труб.

Далее необходимо правильно выбрать температуру монтажа. Эта температура относится к стальной части теплопровода и характеризует начало его термического напряжения. Монтажная температура не соотносится с минимальной эксплуатационной температурой и определяется методом интерполяции с учетом текущего значения температуры окружающего воздуха и температуры грунта на глубине заложения теплопровода.

Наконец следует определиться с температурой предварительного нагрева. Эта температура определяется расчетом и ее значение отображает меру нагрева стальной части теплопроводов, когда закончен процесс термического напряжения и кроме того стартовых компенсаторов завариваются.

Математическая модель расчета предварительно термически напряженного участка теплопровода со стартовыми компенсаторами

В рамках данной работы подготовлена математическая модель расчета предварительно термически напряженного участка теплопровода со стартовыми компенсаторами.

Величина допускаемых осевых напряжений в стальных трубах определяется исходя из следующей формулы

$$\sigma_{dop} = 1,25\varphi_u \sqrt{1,04[\sigma]^2 - 0,4[\sigma]P \left[\frac{D_{int}^2}{2(D_{int} + \delta_{st})\delta_{st}\varphi_w} + 1 \right]},$$

где $[\sigma]$ – номинальное допускаемое напряжение, МПа; φ_u – понижающий коэффициент на прочность сварных швов при наличии изгибающих нагрузок; φ_w – понижающий коэффициент на прочность сварных швов при расчете на избыточное давление; P – внутреннее избыточное давление, МПа; D_{int} – внутренний диаметр трубы, мм; δ_{st} – номинальная толщина стенки трубы, мм.

Удельная сила трения теплопровода о грунт определяется по формуле

$$q_{tr} = \mu[(1 - 0,5\sin\varphi_{gr})\gamma_{gr}Z\pi D_0 + g],$$

где μ – коэффициент трения трубной оболочки о грунт; φ_{gr} – угол внутреннего трения грунта, град.; γ_{gr} – объемный вес грунта, Н/м³; Z – глубина заложения теплопровода, м; D_0 – наружный диаметр кожуха изоляции, мм; g – вес теплопровода с изоляцией и теплоносителем, приходящийся на единицу его длины, Н/м.

Таким образом, исходя из выбранных значений минимальной и максимальной температур эксплуатации, требуется вычислить оптимальное значение температуры предварительного нагрева. Напряжения растяжения и сжатия должны быть наиболее рационально распределены по длине теплопровода и не должны превышать по модулю допускаемых напряжений. Диапазон допускаемых напряжений определяется следующим образом

$$\Delta\sigma_{dop} = 2\sigma_{dop},$$

где $\Delta\sigma_{dop}$ – величина диапазона допускаемых напряжений, МПа; σ_{dop} – допускаемое осевое напряжение, МПа.

При изменении температуры от минимальной эксплуатационной до максимальной напряжение будет определяться следующим образом

$$\Delta\sigma_t = \alpha\Delta TE,$$

где α – коэффициент линейного расширения стального теплопровода, мм/м³С; ΔT – разность между максимальной и минимальной эксплуатационными температурами, $^\circ\text{C}$; E – модуль упругости материала трубы, МПа.

Напряжение $\Delta\sigma_t$ составляет часть диапазона допускаемых напряжений $\Delta\sigma_{dop}$. Еще часть этого диапазона будет задействована напряжением от сил трения теплопровода о грунт, которое возникнет в процессе термического напряжения и перестроится со временем в напряжение от сил трения покоя. В предельном случае, когда использован весь диапазон допускаемых осевых напряжений, с учетом напряжений от сил трения о грунт, можно построить следующую зависимость

$$\Delta\sigma_{dop} = 2\sigma_{dop} = \Delta\sigma_t + \sigma_{tr,max},$$

где $\Delta\sigma_{tr,max}$ – максимальное напряжение от сил трения теплопровода о грунт, МПа.

Выражение для определения максимального допустимого расстояния от компенсирующего устройства до реальной неподвижной опоры или естественной зоны заземления можно сформулировать следующим образом

$$l_{max} = \frac{F_{st}\sigma_{tr,max}}{q_{tr}},$$

где F_{st} – площадь поперечного сечения стенки трубы, м²; q_{tr} – удельная сила трения теплопровода о грунт, Н/м.

Так как стартовый компенсатор примыкает к двум участкам l_{max} , расстояние между стартовыми компенсаторами L_{sk} будет определяться по формуле

$$L_{sk} = 2l_{max},$$

где l_{max} – максимальное допустимое расстояние от компенсирующего устройства до неподвижной опоры или естественной зоны заземления, м.

Максимальные напряжения от сил трения теплопровода о грунт вызывают отрицательные напряжения сжатия. Когда процесс предварительного напряжения закончен и достигнута температура предварительного нагрева, дальнейший нагрев до максимальной температуры эксплуатации вызывает напряжения сжатия в уже заземленном теплопроводе. Эти напряжения складываются с напряжениями от сил трения и ограничены в сумме допускаемыми напряжениями на сжатие. Таким образом, можно сформулировать следующую зависимость

$$\sigma_{dop} \geq \sigma_{tr,max} + \sigma_{\Delta tn},$$

где $\sigma_{\Delta tn}$ – отрицательные термические напряжения сжатия, МПа.

Для предельного случая имеем следующее выражение

$$\sigma_{dop} = \sigma_{tr,max} + \sigma_{\Delta tn}.$$

Для отрицательных термических напряжений сжатия можно построить следующую зависимость

$$\sigma_{\Delta tn} = \alpha(t_{max,e} - t_{pn})E,$$

где $t_{max,e}$ – максимальная температура эксплуатации, °С; t_{pn} – температура предварительного нагрева, °С.

Исходя из этой зависимости, температура предварительного нагрева определяется следующим образом

$$t_{pn} = t_{max,e} - \frac{\sigma_{\Delta tn}}{\alpha E}.$$

На рис. 4 представлена схема предварительно термически напряженного участка теплопровода с двумя стартовыми компенсаторами и эпюры напряжений. Ниже оси абсцисс, под знаком минус, представлена эпюра напряжений от сил трения и нагрева до максимальной эксплуатационной температуры. Над осью абсцисс, под знаком плюс, отображена эпюра напряжений при охлаждении теплопровода до минимальной температуры эксплуатации. Участок на представленной схеме ограничен двумя неподвижными опорами, обозначенными на рисунке как $N1$ и $N2$. Сильфонные стартовые компенсаторы обозначены как $SK1$ и $SK2$. Естественная фиксированная точка, точка естественного заземления, обозначена как $N0$. Остальные обозначения расшифрованы в представленных выше формулах.

Расчетная величина срабатывания стартового компенсатора определяется из следующего выражения

$$\Delta l_{sk} = 2\Delta l_{max} = 2 \left[\alpha(t_{pn} - t_m)l_{max} - \frac{q_{tr}l_{max}^2}{2EF_{st}} \right],$$

где Δl_{max} – удлинение участка l_{max} , м; t_m – температура монтажа, °С.

Нужно помнить, что сжатие стартового компенсатора не должно превышать максимальной величины его осевого хода. Снижать нагрузки на неподвижные опоры при помощи стартовых компенсаторов необходимо с учетом того, что для любого участка трубопровода существует осевая нагрузка

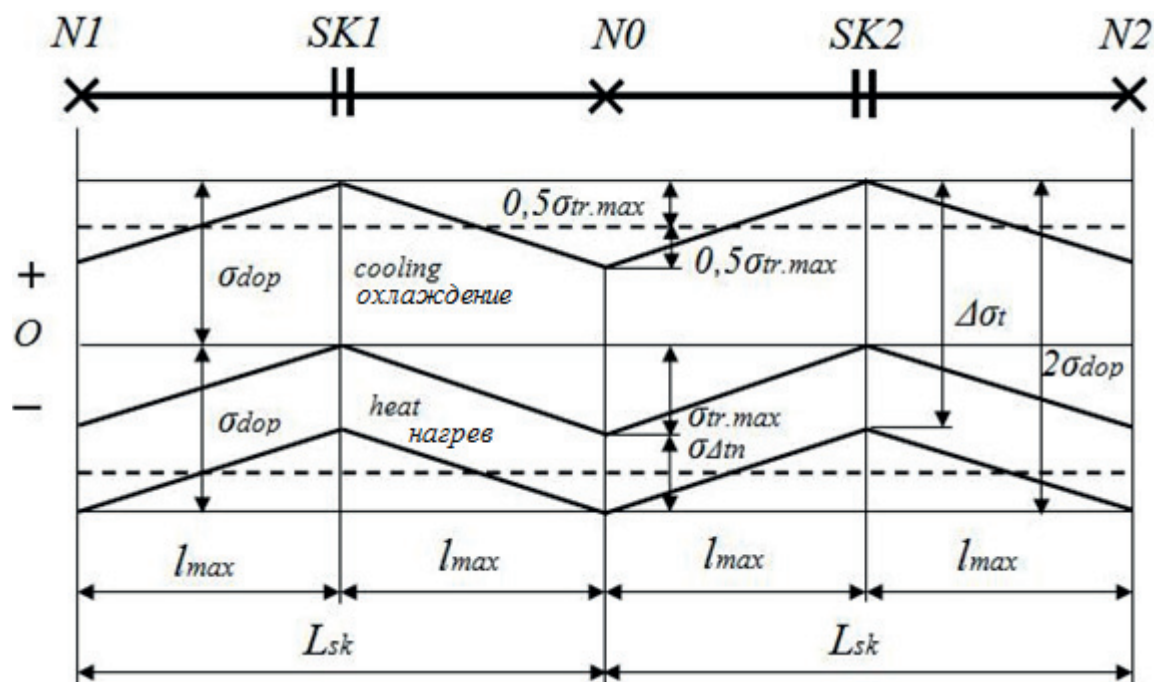


Рис. 4. Схема предварительно термически напряженного участка теплопровода и эпюры напряжений

Fig. 4. Scheme of thermally pre-stressed heat pipe section and stress diagrams

на неподвижную опору, меньше которой получить невозможно. Эта нагрузка не зависит ни от способа прокладки трубопровода, ни от его длины, а определяется только исходя из температурного перепада и площади поперечного сечения стенки трубы. Рассчитывается эта нагрузка по следующей формуле

$$P = \alpha \Delta T E F_{st},$$

где P – осевая нагрузка, Н; α – коэффициент линейного расширения, мм/м°С; ΔT – температурный перепад, °С; E – модуль упругости, Па; F_{st} – площадь поперечного сечения стенки трубы, м².

Протяженные участки теплопроводов должны проверяться на предмет потери устойчивости. Иначе теплопровод может потерять первоначальную форму равновесия. Следует отметить, что устойчивость бесканальных теплопроводов существенно выше, чем надземных или канальных теплопроводов, за счет сил противодействия грунта. Критическую длину можно определить, воспользовавшись уточненной формулой Эйлера для стержня, шарнирно-опертого по концам, в частном случае, когда потеря устойчивости происходит вследствие увеличения его длины

$$P_{kr} = 4\pi^2 \frac{EJ}{l^2} = \alpha \Delta T E F_{st},$$

где P_{kr} – критическое усилие, Н; J – момент инерции поперечного сечения стенки трубы, м⁴; l – критическая длина, м.

Вопросы по расчету устойчивости трубопроводов с осевыми сильфонными компенсаторами рассмотрены в работе [10]. Если расчет показывает, что трубопровод не устойчив, можно стабилизировать теплопровод расстановкой направляющих опор. В работе [11] рассмотрены вопросы применения направляющих опор на трубопроводах с осевыми сильфонными компенсаторами.

Заменим в рассматриваемой задаче конечные неподвижные опоры углами поворота. Построим характерные для данной задачи эпюры напряжений.

При данных условиях задачи следует произвести корректировку расчета максимальной длины рабочей зоны стартовых компенсаторов, примыкающих к углам поворота. На рис. 5 изображена схема участка теплопровода с углами поворота $P1$ и $P2$. Сильфонные стартовые компенсаторы обозначены на схеме как $SK1$ и $SK2$. Если рассматривается участок с промежуточными стартовыми компенсаторами, то их расчет не подлежит корректировке. Эпюра $\sigma_{\Delta tn}$ выходит из точек A , B . При этом данные точки имеют одинаковые ординаты, равные допускаемым напряжениям на сжатие. К этим точкам примыкают такие же эпюры, как на схеме рис. 4. Линии, выходящие из точек A и B , имеют те же углы, что и у примыкающих эпюр и пересекают начало координат. Точкой O обозначено начало участка, а точка K является его конечной точкой. Отрезком L_{max} обозначено расстояние

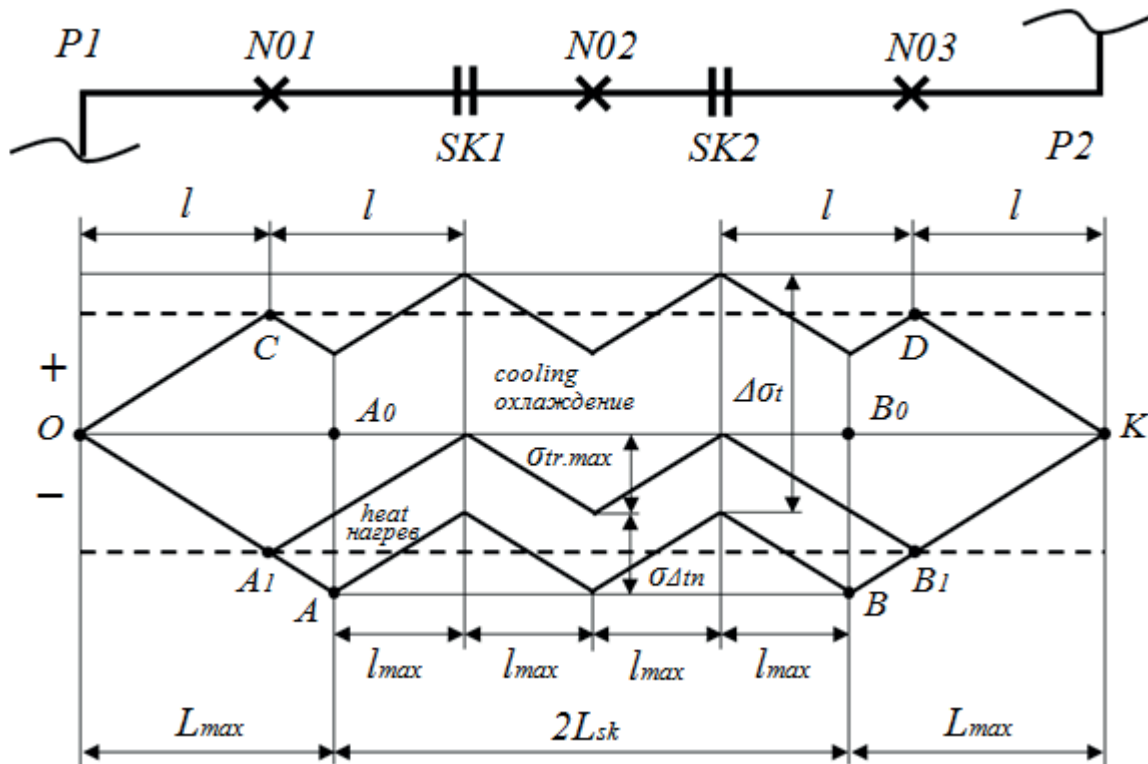


Рис. 5. Характерные эпюры напряжений для участка теплопровода с двумя стартовыми компенсаторами, ограниченного углами поворота

Fig. 5. Characteristic stress diagrams for a heat supply pipe section with two expansion joints, limited by rotation angles

от нулевой точки O до точки AO . Это расстояние представляет собой длины участков скольжения при нагревании теплопровода, примыкающих к $P1$ и $P2$. Формула для нахождения $L_{\max}$ имеет следующий вид

$$L_{\max} = \frac{F_{st} \sigma_{dop}}{q_{tr}}.$$

Замена на рассматриваемом участке концевых неподвижных опор углами поворота требует прибавления к исходной длине двух длин $L_{\max}$. Исходя из этого, новая длина участка определяется следующим образом

$$L = 2L_{sk} + 2L_{\max}.$$

Стартовый компенсатор воспринимает температурные расширения с различных примыкающих участков. Со стороны $N02$ (естественная фиксированная точка) воспринимаемая длина равна $l_{\max}$. Со стороны $N01$ и $N03$ воспринимаемая длина одинакова и определяется следующим образом

$$l = \frac{L_{\max} + l_{\max}}{2}.$$

Естественные фиксированные точки могут рассматриваться при построении эпюр до завершения срабатывания стартовых компенсаторов и теряют смысл при последующей эксплуатации предварительно напряженного теплопровода.

Новая длина участка с одним стартовым компенсатором определяется следующим образом

$$L_{sk}^n = l + l_{\max}.$$

Компенсирующая способность проверяется по следующим формулам

$$\Delta l_{sk1} = \Delta l_{sk2} = \Delta l_{\max} + \Delta l;$$

$$\Delta l_{\max} = \alpha(t_{pn} - t_m)l_{\max} - \frac{q_{tr}l_{\max}^2}{2EF_{st}};$$

$$\Delta l = \alpha(t_{pn} - t_m)l - \frac{q_{tr}l^2}{(2EF_{st})}.$$

Расчет участка теплопровода со стартовыми компенсаторами и построение эпюр напряжений

Рассмотрим бесканальный участок теплопровода, ограниченный неподвижными опорами. Участок предварительно термически напряжен при помощи двух стартовых компенсаторов. Определим максимальную длину участка, предельное допустимое расстояние между стартовыми компенсаторами, температуру предварительного нагрева и значение хода срабатывания компенсаторов. Построим эпюры напряжений участка.

В качестве примера будем использовать следующие исходные данные: наружный диаметр трубы участка 159 мм; толщина стенки 4,5 мм; теплопровод из стали 17ГС; номинальное допустимое напряжение при максимальной температуре эксплуатации 170 МПа; диаметр изоляционной

оболочки 220 мм; рабочее давление теплоносителя 1,6 МПа; температура подающего трубопровода 130 °С; температура обратного трубопровода 70 °С; минимальная температура эксплуатации 0 °С; летний вариант температуры монтажа 20 °С; зимний вариант температуры монтажа –20 °С; расстояние от верха засыпки до осевой линии трубы 1 м; окружающий грунт – песок; удельная насыпная масса окружающего грунта 1800 кг/м³; погонный вес трубопровода с теплоносителем 1000 Н/м; коэффициент трения трубной оболочки о грунт 0,4; паспортная компенсационная способность стартового компенсатора на сжатие 120 мм. На рис. 6 приведены эпюры напряжений для рассматриваемого примера участка теплопровода.

Числа, представленные на рис. 6, обозначают следующие величины: 210 – допускаемое осевое напряжение; –115 – отрицательные термические напряжения сжатия в полностью заземленном трубопроводе; 95 – диапазон на обеспечение напряжений от сил трения-скольжения трубопровода о грунт. Размах температурных напряжений составляет 325 МПа. Диапазон допускаемых напряжений равен 420 МПа.

Исходя из рис. 6, можно сделать вывод о гармоничном распределении напряжений в заданном диапазоне, не допустив нигде перехода за его границы. Данное распределение было реализовано при температуре предварительного нагрева 84 °С, которая существенно удалена от средней эксплуатационной температуры 65 °С. Таким образом, для достижения оптимального распределения напряжений может быть использовано только одно конкретное значение температуры предварительного нагрева, исключая какой-либо диапазон.

Рассматриваемый участок необходимо проверить на соответствие монтажным температурам. Величина монтажной температуры не оказывает влияния на силовую картину процесса предварительного напряжения и последующую эксплуатацию участка теплопровода. Эта температура определяет величину срабатывания стартовых компенсаторов. Исходя из рассматриваемого примера, величина срабатывания стартовых компенсаторов составляет 58 мм для летнего варианта монтажной температуры и 109 мм для зимнего варианта. В первом случае стартовые компенсаторы загружены на 48 %, во втором случае – на 91 %. Это говорит о том, что удалось произвести предварительное напряжение при помощи двух стартовых компенсаторов с осевым ходом каждого 120 мм.

Для обратного трубопровода были получены следующие результаты: диапазон напряжений при изменении температуры от минимальной до максимальной и обратно 175 МПа; диапазон напряжений от сил трения теплопровода о грунт 245 МПа; максимальное допустимое расстояние от компенсирующего устройства до неподвижной опоры 132 м. Эпюры напряжений для обратного трубопровода строятся аналогичным образом. Температурные деформации обратного трубопровода суще-

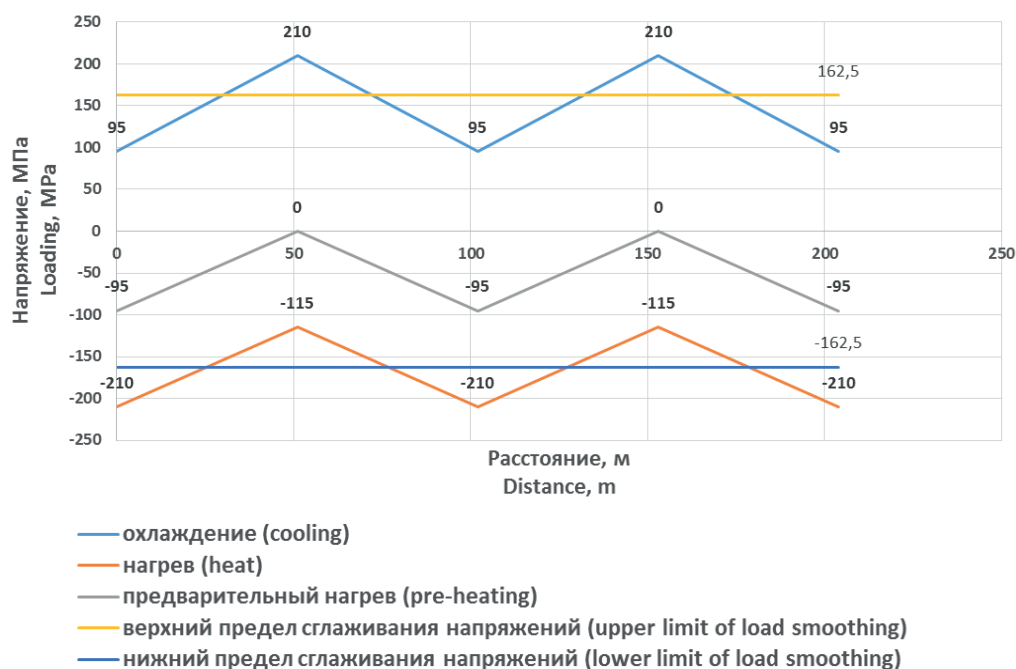


Рис. 6. Эпюры напряжений для рассматриваемого примера участка теплопровода

Fig. 6. Stress diagrams for the given case of a heat supply pipe section

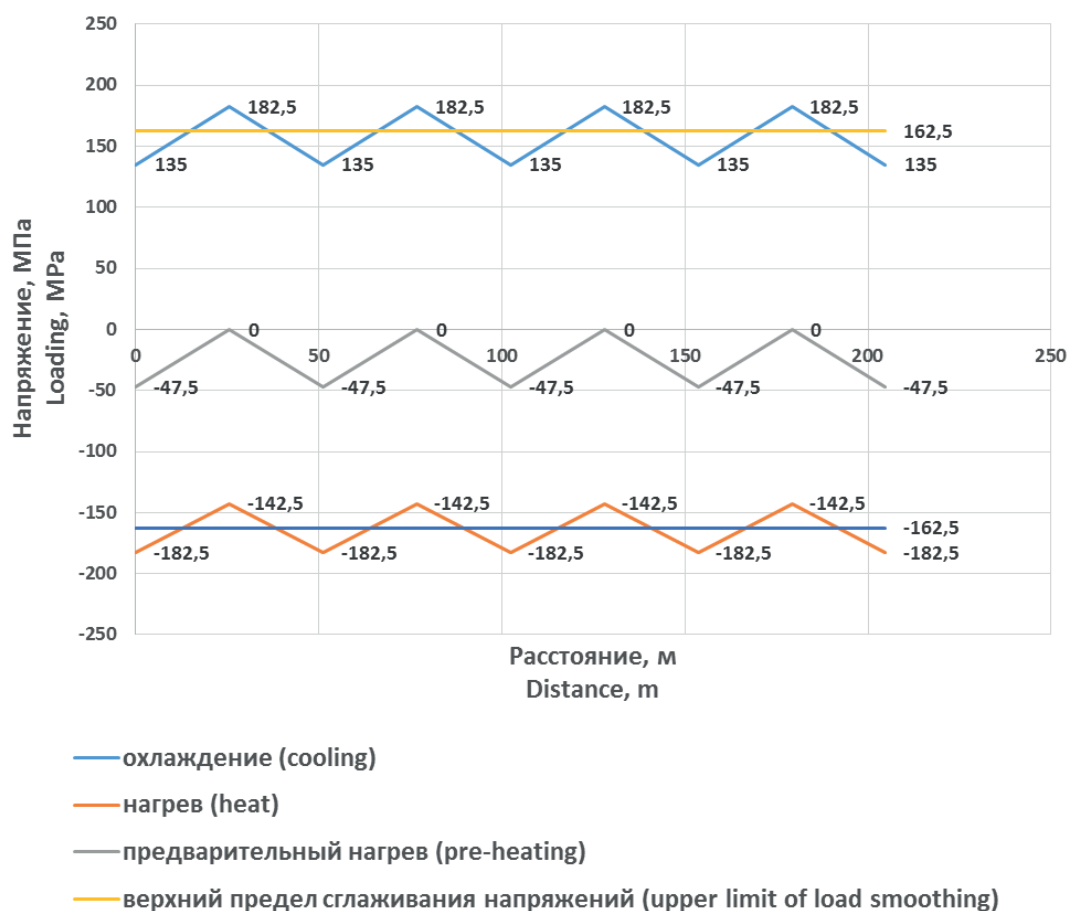


Рис. 7. Эпюры напряжений для рассматриваемого примера участка теплопровода с увеличением числа стартовых компенсаторов до четырех

Fig. 7. Stress diagrams for the given heat supply pipe section with the number of expansion joints increased to four

ственно меньше и не требуют использования компенсаторов с большим осевым ходом.

Заменим для рассматриваемого примера участка теплопровода стартовые компенсаторы с осевым ходом 120 мм на компенсаторы с ходом 60 мм. Тогда для летнего варианта монтажной температуры стартовые компенсаторы будут загружены на 97 %, а для зимнего варианта – на 182 %, что говорит о невозможности предварительного напряжения данного участка в зимнее время из-за недостаточного ресурса компенсирующей способности стартовых компенсаторов. В этом случае необходимо увеличивать число стартовых компенсаторов на участке или подбирать компенсаторы с другим осевым ходом. Таким образом, при отсутствии надежных сведений о календарном времени строительства трубопровода и проведении его предварительного термического напряжения необходимо предусматривать в проекте зимнюю температуру монтажа и проверять по этой температуре компенсирующую способность стартовых компенсаторов.

Увеличим число стартовых компенсаторов с осевым ходом 60 мм в рассматриваемом примере до четырех. Построим эпюры напряжений.

Из рис. 7 видно, что размах температурных напряжений не изменился и составил 325 МПа. Возросли по модулю напряжения, возникающие при нагреве от температуры предварительного нагрева до максимальной эксплуатационной температуры, и составили 135 МПа, вместо прежних 115 МПа. Данное увеличение было необходимо для сохранения равновесия крайних эпюр осевых напряжений для максимальной и минимальной эксплуатационных температур относительно оси абсцисс в условиях вдвое уменьшившихся напряжений от сил трения. Температура предварительного нагрева снизилась с 84 до 76 °С. Было получено равенство по модулю максимальных напряжений растяжения-сжатия, составивших 182,5 МПа. Данный пример показывает оптимизацию напряжений при расчете предварительно термически напряженного теплопровода.

В процессе эксплуатации трубопроводов, под воздействием различных факторов, происходит уменьшение сил трения покоя. В результате этого происходит спад напряжений в стальных трубах. На графиках рис. 6, 7 обозначены линии верхнего и нижнего пределов сглаживания напряжений. Эти линии показывают, как со временем трансформируются эпюры напряжений. Данный процесс увеличивает запас прочности трубопровода и позволяет увеличить допустимый размах напряжений следующим образом

$$\Delta\sigma_{dop} = 2\sigma_{dop} + \sigma_{tr,max}.$$

В процессе сглаживания напряжений второе слагаемое представленного выше уравнения должно исчезнуть. Важнейшим условием использования данного приема являются очень качественно сделанные сварные стыковые трубные швы.

Согласно исходным данным в рассматриваемом примере, длины участков, примыкающих к $P1$ и $P2$ (рис. 5), равны 113 м. Новая длина всего участка от $P1$ до $P2$ составит 431 м. Воспринимаемые компенсатором длины со стороны $N01$ или $N03$ составят 82 м. Новая длина участка, обслуживаемая одним стартовым компенсатором, будет равна 133 м. При монтажной температуре +20 °С величина срабатывания компенсаторов составит 63 мм, а при варианте монтажной температуры –20 °С будет равна 130 мм. Таким образом, участок теплопровода с углами поворота позволяет отказаться от крайних неподвижных опор и существенно увеличить длину компенсируемого прямого участка. Вместо углов поворота могут быть использованы радиальные компенсаторы из труб. Но здесь необходимо понимать, что расчет компенсации температурных расширений радиальных компенсаторов представляет собой отдельную задачу, требующую внимательного подхода к решению. Для радиальных компенсаторов самими ответственными элементами являются отводы, в которых происходит овализация поперечного сечения стенки трубы, в результате которой отвод становится более гибким, чем прямая труба, но и более уязвимым к повреждениям из-за концентраторов напряжений, обусловленных резким изменением геометрии отвода. В настоящее время вопросам расчета отводов трубопроводов посвящено немало работ. Например, в работах [12, 13] рассматриваются аналитические решения для кривых труб. В работах [14, 15] рассматриваются решения для кривых труб с применением метода конечных элементов. Вопросы расчета радиальных компенсаторов на температурные воздействия рассмотрены в работах [16, 17].

Со временем на участке теплопровода с углами поворотов будут происходить релаксации напряжений и эпюры, представленные на схеме рис. 5, сгладятся и в пределе будут представлять собой линии $OA0BOK$ и $OCDK$. Эпюры после процесса релаксации идентичны тем, которые получились бы сразу для предварительно напряженного участка теплопровода, находящегося в канале и не испытывающего сил трения грунта. Температура для предварительного нагрева для канального участка составит среднюю температуру между максимальной и минимальной эксплуатационной. Таким образом, для бесканального участка теплопровода приходится преодолевать существенный барьер, обусловленный силами трения грунта, который со временем исчезнет.

Построим для рассматриваемого примера участка теплопровода зависимость максимальной длины от глубины засыпки. Под максимальной длиной понимается расстояние от компенсирующего устройства до неподвижной опоры или точки естественного заземления. В представленной выше математической модели это расстояние было обозначено как l_{max} . Из представленного графика на рис. 8 видно, как с увеличением глубины за-

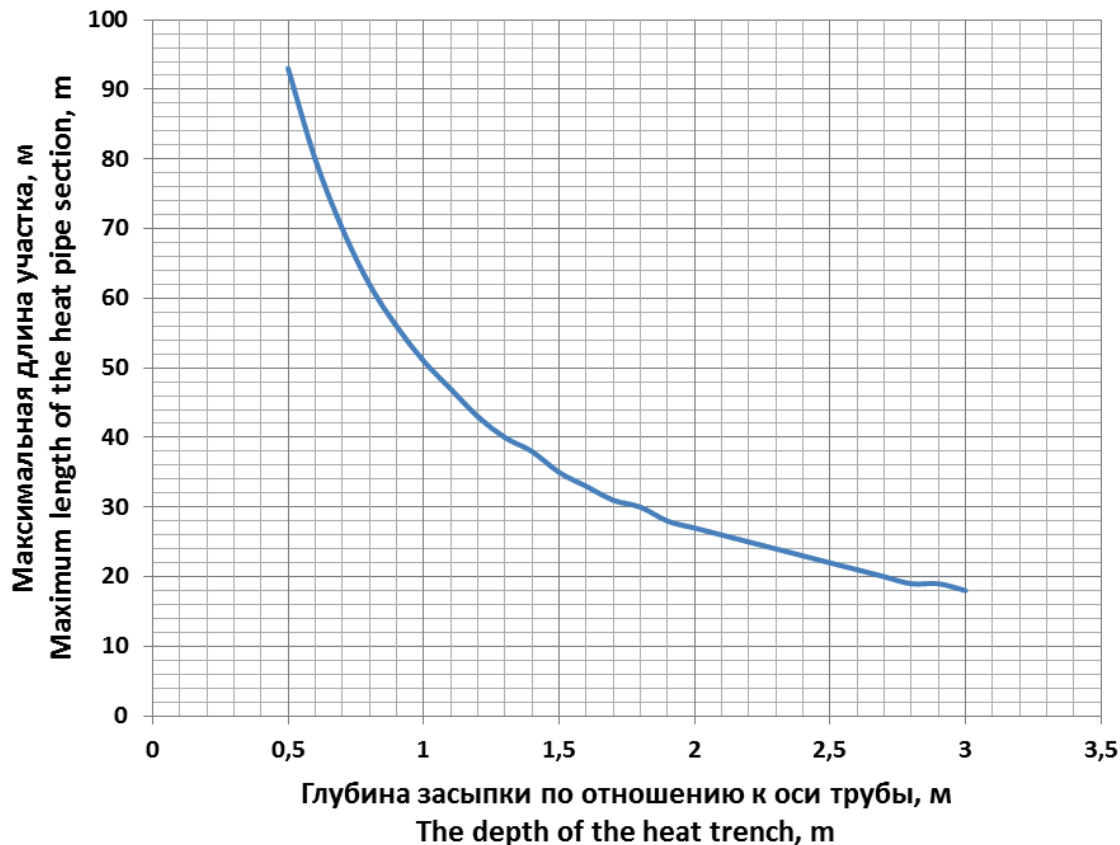


Рис. 8. Зависимость максимальной длины участка теплопровода от глубины засыпки

Fig. 8. Dependence of maximum length of the heat supply pipe section on filling depth

сыпки стремительно снижается максимальная длина. Здесь следует руководствоваться не только экономической выгодой, но и технической целесообразностью. Например, в работе [18] обоснована необходимость выглубления каналов тепловых сетей. В работе [19] выявлена связь между заглублением трубопроводов и интенсивностью их коррозии. В работе [20], при помощи математического моделирования, представлены методы расчета тепловых полей в грунтах.

Заключение

Предложенная методика расчета подземных бесканальных, предварительно термически напряженных стальных трубопроводов тепловых сетей позволяет проектировать протяженные прямолинейные участки с использованием стартовых компенсаторов, что дает возможность экономить значительные капиталовложения при строительстве

тепловых сетей. Методика позволяет корректно использовать для этой цели запасы прочности теплопровода. Построенные расчетные схемы и эпюры напряжений дают наглядное представление о процессе предварительного термического напряжения и последующей эксплуатации участка теплопровода со стартовыми компенсаторами.

По изложенным выше материалам можно сделать следующие выводы: 1) применение стартовых компенсаторов позволяет проектировать длинные прямолинейные бесканальные неразрезные участки теплопроводов; 2) сжатие стартового компенсатора не должно превышать максимальной длины его осевого хода; 3) протяженные прямые участки бесканального теплопровода необходимо проверять на предмет потери устойчивости; 4) использование углов поворота и естественных неподвижных точек при бесканальной прокладке позволяет отказываться от применения неподвижных опор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белиловец В.И., Липовка А.Ю., Липовка Ю.Л. Оценка надежности городских тепловых сетей с точки зрения прочностных расчетов // Современные проблемы архитектуры, градостроительства, дизайна: Материалы II Международной научно-практической конференции. – Красноярск: СФУ, 2015. – С. 376–378.
2. Липовка Ю.Л., Белиловец В.И. Некоторые теоретические стороны расчета температурных деформаций подземных бесканальных теплопроводов // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2016. – Т. 9. – № 4. – С. 546–562.
3. Алешин В.В., Селезнев В.Е. Численный анализ прочности подземных трубопроводов. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 320 с.
4. Магалиф В.Я. Проектирование трубопроводов тепловых сетей бесканальной прокладки с применением сильфонных компенсаторов // Новости теплоснабжения. – 2009. – № 4. – С. 44–26.
5. Логунов В.В., Поляков В.Л., Слепченко В.С. Опыт применения осевых сильфонных компенсаторов в тепловых сетях // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 7. – С. 47–52.
6. Кузин Е.В., Логунов В.В., Поляков В.Л. О назначенной нагрузке сильфонных компенсаторов // Новости теплоснабжения. – 2011. – № 3. – С. 48–50.
7. Максимов Ю.И. Некоторые аспекты проектирования и строительства бесканальных термически напряженных предизолированных трубопроводов с применением стартовых компенсаторов // Новости теплоснабжения. – 2008. – № 1. – С. 24–34.
8. Three Dimensional Numerical Model of Heat Losses from District Heating Network Pre Insulated Pipes Buried in the Ground / J. Danielewicz, B. Dniechowska, M.A. Sayegh, N. Fidorow, H. Jouhara // Energy. – 2016. – V. 108. – P. 172–184.
9. Половников В.Ю., Глазырин Е.С. Численный анализ влияния инженерных сооружений на тепловые потери бесканальных теплопроводов // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 2 (46). – С. 5–13.
10. Кузин Е.В., Логунов В.В., Поляков В.Л. Устойчивость трубопроводов с осевыми сильфонными компенсаторами // Новости теплоснабжения. – 2011. – № 7. – С. 42–50.
11. Кузин Е.В., Логунов В.В., Поляков В.Л. Применение направляющих опор на трубопроводах с осевыми сильфонными компенсаторами // Новости теплоснабжения. – 2011. – № 12. – С. 34–38.
12. Radchenko S.A. Analytical and numerical solution for a elastic pipe bend at in-plane bending with consideration for the end effect // International Journal of Solids and Structures. – 2007. – № 44. – P. 1488–1510.
13. Kolesnikov A.M. Large bending deformations of pressurized curved tubes // Arch. Mech. – 2011. – № 63. – P. 507–516.
14. Fonseca E.M.M., De Melo F.J.M. Q., Madureira M.L.R. Multi-nodal Ring Finite Element for Analysis of Pipe Deflection // International Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2011. – V. 2. – № 2. – P. 109–114.
15. Giordano A., Guarracino F. Assessment of the Limit Load of Cylindrical Tubes under Bending: Theoretical Background, Experimental Data, and Finite Elements Analyses // ABAQUS Users' Conference. – Napoli, 2002. – P. 143–151.
16. Липовка Ю.Л., Белиловец В.И., Липовка А.Ю. The influence of slenderness ratio and stress concentration in taps on load calculations to thermal expansion in П-shaped compensators of thermal network // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2015. – Т. 8. – № 1. – С. 11–32.
17. Белиловец В.И. The Influence Factors of Flexibility and Stress Concentration in the Taps to the Calculation of Cooling Strain of Radial Compensators in Heat Supply Network // Проспект Свободный-2015: Материалы научной конференции, посвященной 70-летию Великой Победы. – Красноярск: СФУ, 2015. – С. 11–15.
18. Чичерин С.В. Выглубление каналов тепловых сетей – ключ к их эффективной эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 9. – С. 49–56.
19. Duffy P.F. Underground District Heating Mains: Causes of Failure // Building Services Engineering Research and Technology. – 1991. – V. 12. – № 3. – P. 111–113.
20. Ming Zhu, Michalowski R.L. Simulation of Heat Transfer in Freezing Soils Using ABAQUS // ABAQUS Users' Conference. – Michigan, 2005. – P. 1–7.

Поступила 30.01.2018 г.

Информация об авторах

Белиловец В.И., аспирант кафедры инженерных систем зданий и сооружений Сибирского федерального университета.

Липовка Ю.Л., доктор технических наук, профессор кафедры инженерных систем зданий и сооружений Сибирского федерального университета.

UDC 624.042.12

DESIGNING UNDERGROUND TRENCHLESS THERMALLY PRE-STRESSED HEAT SUPPLY PIPELINES WITH EXPANSION JOINTS

Vitaly I. Belilovets¹,
vitaliy.belilovets@mail.ru

Yury L. Lipovka¹,
lipovka.j.l@gmail.com

¹ Siberian Federal University,
79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russia.

Relevance. The important research field in heat supply is design of underground trenchless heat supply networks which can significantly reduce capital expenditures compared to above-ground or fully trenched networks. Using the optimal number of expansion joints allows designing extended rectilinear sections of underground trenchless heat supply pipelines. Currently, design and construction of thermally pre-stressed trenchless pipelines of heating networks raises acute questions in specialists. There is not much up-to-date information in this topic. Trenchless laying requires more strict approach to solutions for compensation of temperature expansions. Thus, the refined methods for analysis of thermal expansion compensation in pipes and utilization of trenchless laying of heating network sections can save dozens of millions of rubles.

The aim of the research is to develop a technique for analyzing compensation of temperature expansions in underground trenchless thermally pre-stressed steel pipelines of water heating networks with expansion joints.

Methods: mathematical modeling of the stress-strain state of a section of a trenchless heat supply pipeline with expansion joints; numerical solution of the test problem for the section of the heat supply pipeline with known parameters using the developed technique.

Results. This paper introduces a technique for analysis of underground trenchless thermally pre-stressed pipelines of heating networks with expansion joints compensating temperature expansions. This technique allows using the optimum number of expansion joints on extended sections of heat supply pipelines due to the maximum use of the strength reserve. The research gave characteristic curves of the stress value depending on length of the section and the number of the expansion joints installed on it. The construction of such curves using the proposed method allows obtaining a complete picture of the stress-strain state for sections of heat supply pipelines with expansion joints.

Key words:

Heat networks, trenchless heat supply pipeline, temperature expansion of pipelines, pre-stressed heat supply pipeline, axial expansion joints.

REFERENCES

1. Belilovets V.I., Lipovka A.Yu., Lipovka Yu.L. Otsenka nadezhnosti gorodskikh teplovykh setey s tochki zreniya prochnosti raschetov [Reliability Analysis of Urban Heating Networks in Terms of Strength Calculations]. *Sovremennye problemy arkhitektury, gradostroitelstva, dizayna. Materialy II mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern Aspects of Architecture, Urban Planning, Design. Proc. of the II International Scientific and Practical Conference]. Krasnoyarsk, SibFU Publ., 2015. pp. 376–378.
2. Lipovka Yu.L., Belilovets V.I. Some Theoretical Aspects of Temperature Deformation Analysis in Underground Trenchless Heat Supply Pipelines. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technology*, 2016, vol. 9, no. 4, pp. 546–562. In Rus.
3. Aleshin V.V., Seleznev V.E. *Chislenny analiz prochnosti podzemnykh truboprovodov* [Numerical Analysis of Strength of Underground Pipelines]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2003. 320 p.
4. Magalif V.Ya. Designing of Pipelines of Trenchlessly Laid Heating Networks Using Bellows-sealed compensators. *Heat Supply News*, 2009, no. 4, pp. 44–26. In Rus.
5. Logunov V.V., Polyakov V.L., Slepchenok V.S. Application of Axial Expansion Bellowses in Heating Networks. *Heat Supply News*, 2007, no. 7, pp. 47–52. In Rus.
6. Kuzin E.V., Logunov V.V., Polyakov V.L. About Preset Operating Time of Bellows-sealed compensators. *Heat Supply News*, 2011, no. 3, pp. 48–50. In Rus.
7. Maksimov Yu.I. Some Aspects of Design and Construction of Trenchless Thermally Stressed Pre-Insulated Pipelines with the use of Expansion Joints. *Heat Supply News*, 2008, no. 1, pp. 24–34. In Rus.
8. Danielewicz J., Dniechowska B., Sayegh M.A., Fidorow N., Jouhara H. Three Dimensional Numerical Model of Heat Losses from District Heating Network Pre Insulated Pipes Buried in the Ground. *Energy*, 2016, vol. 108, pp. 172–184.
9. Polovnikov V.Yu., Glazyrin E.S. Numerical analysis of the impact of engineering constructions on heat loss of channel-free heat pipelines. *Magazine of Civil Engineering*, 2014, no. 2 (46), pp. 5–13. In Rus.
10. Kuzin E.V., Logunov V.V., Polyakov V.L. Stability of Pipelines with Axial Bellows-sealed compensators. *Heat Supply News*, 2011, no. 7, pp. 42–50. In Rus.
11. Kuzin E.V., Logunov V.V., Polyakov V.L. Application of guide supports in pipelines with axial Bellows-sealed compensators. *Heat Supply News*, 2011, no. 12, pp. 34–38. In Rus.
12. Radchenko S.A. Analytical and numerical solution for a elastic pipe bend at in-plane bending with consideration for the end effect. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, no. 44, pp. 1488–1510.
13. Kolesnikov A.M. Large bending deformations of pressurized curved tubes. *Arch. Mech.*, 2011, no. 63, pp. 507–516.
14. Fonseca E.M.M., De Melo F.J.M. Q., Madureira M.L.R. Multi-nodal Ring Finite Element for Analysis of Pipe Deflection. *International Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2011, vol. 2, no. 2, pp. 109–114.
15. Giordano A., Guarracino F. Assessment of the Limit Load of Cylindrical Tubes under Bending: Theoretical Background, Experimental Data, and Finite Elements Analyses. *ABAQUS Users' Conference*. Napoli, 2002. pp. 143–151.
16. Lipovka Yu.L., Belilovets V.I., Lipovka A.Yu. The Influence of Slenderness Ratio and Stress Concentration in Taps on Load Cal-

- culations to Thermal Expansion in Π -shaped Compensators of Thermal Network. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technology*, 2015, vol. 8, no. 1, pp. 11–32.
17. Belilovets V.I. The Influence Factors of Flexibility and Stress Concentration in the Taps to the Calculation of Cooling Strain of Radial Compensators in Heat Supply Network. *Prospekt Svobodny-2015. Materialy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 70-letiyu Velikoy Pobedy* [Prospekt Svobodny-2015: Proceedings of the scientific conference dedicated to the 70th anniversary of the Great Victory]. Krasnoyarsk, SibFU Publ., 2015. pp. 11–15.
18. Chicherin S.V. Deepening of trenches of heating networks – the key to their effective operation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 9, pp. 49–56. In Rus.
19. Duffy P.F. Underground District Heating Mains: Causes of Failure. *Building Services Engineering Research and Technology*, 1991, vol. 12, no. 3, pp. 111–113.
20. Ming Zhu, Michalowski R.L. Simulation of Heat Transfer in Freezing Soils Using ABAQUS. *ABAQUS Users' Conference*. Michigan, 2005. pp. 1–7.

Received: 31 January 2018.

Information about the authors

Vitaly I. Belilovets, postgraduate student, Siberian Federal University.

Yury L. Lipovka, Dr. Sc., professor, Siberian Federal University.

УДК 622.276

ПРОМЫСЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО ЩЕЛЕВОГО ПЕРФОРАТОРА

Токарев Михаил Андреевич¹,
tma40@yandex.ru

Зубаиров Сибгат Гарифович¹,
mkm-ufa@mail.ru

Токарева Надежда Михайловна¹,
tokareva_n_m@mail.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования существующих методов перфорации обсадной колонны. Часто вторичное вскрытие пласта осложняется рядом факторов: тонкая перемычка цементного камня между обводнившимся и приобщаемым интервалом, малая толщина самого приобщаемого пласта и т. д. Для проведения перфорационных работ в таких условиях необходима технология, минимизирующая нагрузки на эксплуатационную колонну и цементный камень.

Цель исследования: определить эффективность комплексной технологии вторичного вскрытия низкопроницаемых пластов гидромеханическим щелевым перфоратором с усовершенствованной фрезой с последующей обработкой вскрытого интервала по запатентованному способу реагентной разглинизации.

Методы: контроль результатов внедрения в промысловую практику усовершенствованной конструкции щелевого перфоратора. Показаны результаты вторичного вскрытия пластов на скважинах НК «Татнефть». Перфорируемые продуктивные горизонты приурочены к различным стратиграфическим горизонтам.

Результаты. Для повышения эффективности гидромеханической щелевой перфорации была разработана принципиально новая конструкция накатных дисков. Конструкция заявленного изобретения позволяет заменить процесс формирования щели за счет деформации обсадных труб вплоть до их разрыва по образующей на процесс резания металла труб. Как следствие, повышается надежность и долговечность перфоратора, обеспечивается возможность применения фрезы большой толщины, а следовательно, и получение перфорационной щели большой ширины. Конструкция установки позволяет проводить обработку призабойной зоны запатентованной авторами композицией непосредственно через компоновку гидромеханического щелевого перфоратора. В среднем после проведения щелевой перфорации дебит скважин по нефти увеличивался в 5–10 раз при соответствующем снижении обводненности продукции.

Ключевые слова:

Гидромеханическая щелевая перфорация, капитальный ремонт скважин, вторичное вскрытие пластов, реагентная разглинизация, обработка призабойной зоны.

Введение

На длительно разрабатываемых нефтяных месторождениях, характеризующихся наличием многопластовых объектов эксплуатации, основным видом капитального ремонта скважин является изоляция обводнившихся пластов и вторичное вскрытие вновь приобщаемых пластов [1, 2]. Как правило, приобщаемые пласты характеризуются низкой проницаемостью, а следовательно, и низкими добычными возможностями. Для получения экономически рентабельных дебитов необходимо эффективное вскрытие пластов с одновременной обработкой призабойной зоны. Процесс вскрытия приобщаемого пласта осложняется возможностью быстрого обводнения из нижележащих изолированных пластов ввиду того, что цементная перемычка между этими пластами может быть значительной протяженности [3].

Кумулятивная перфорация часто разрушает восстановленную после ВЦЭК (вторичного цементирования эксплуатационной колонны) перемычку между обводненными и продуктивными пластами [3]. Ее толщина иногда составляет 1–2 м. Избежать этого осложнения можно, используя вместо

кумулятивной перфорации гидромеханическую щелевую перфорацию (ГМЩП), динамическое воздействие при которой на цементный камень за колонной значительно слабее и не приводит к разрушению цементной перемычки [4–9].

Как правило, при ВЦЭК вышележащие продуктивные пласты также подвергаются воздействию цементных растворов, что приводит к ухудшению их фильтрационно-емкостных свойств и необходимости проведения дополнительных обработок призабойной зоны (ОПЗ). При проведении ОПЗ традиционными сильными реагентами на кислотной основе маломощные цементные перемычки между обводненными и нефтяными пластами также могут разрушаться. Более щадящим методом является способ реагентной разглинизации призабойной зоны пласта [10–12].

Вовлечение в разработку пластов эффективной нефтенасыщенной толщины 1,0–1,5 м является ювелирной работой и требует специальной технологии привязки. В настоящее время существует возможность подключения продуктивных пластов толщиной до 0,5 м с получением из них рентабельных дебитов нефти. Однако вскрытие таких тон-

ких объектов традиционными способами перфорации приводит к нарушению заколонной цементной перемычки между продуктивными пластами и сведению на нет эффекта от изоляции нижерасположенных обводнившихся пластов. Применение технологии гидромеханической щелевой перфорации позволяет избежать такого рода осложнений благодаря отсутствию ударного воздействия на эксплуатационную колонну и пласт [13–15].

Среди технологических преимуществ ГМЩП следует также отметить возможность селективного вскрытия продуктивных пластов с пропуском обводнившихся интервалов, а также перфорацию продуктивных пластов с применением нефти или любой другой жидкости, проведение работ в любое время суток [16, 17].

Особенности модернизированного перфоратора

Гидромеханический щелевой перфоратор спускается в скважину на насосно-компрессорной трубе (НКТ) диаметром 73 мм. НКТ при этом является каналом гидромеханической связи перфоратора с наземным оборудованием. Спуск ГМЩП производится до подошвы перфорируемого пласта. Для точной привязки ГМЩП относительно перфорируемого пласта используется следующая технология: на насосно-компрессорную трубу на 15–20 м выше ГМЩП устанавливается реперный патрубок длиной 1,5–2,0 м. Малогабаритным прибором гамма-каротажа, совмещенным с прибором СГДТ (скважинный гамма-дефектометр толщиномер) или локатором муфт, производится запись кривой гамма-каротажа и отбивка муфт НКТ и реперной трубы. С помощью гамма-каротажа отбивается положение ближайшего к продуктивному реперного пласта.

Практически все элементы технологической цепочки – реперная муфта, реперный пласт, продуктивный пласт, прибор ГМЩП – привязаны по глубинам с точностью до 0,1 м, что приемлемо при перфорации самых тонких пластов [13, 14]. Следует отметить, что привязка по глубинам при кумулятивной перфорации производится в два этапа: при спуске приборов гамма-каротажа и кумулятивного перфоратора на кабеле. При этом точность всегда несколько меньше.

Прорезание щели производится накатным диском с созданием ступенчатого повышения давления на устье скважины с 1 до 6–7 МПа с шагом 1 МПа. На каждой ступени давления производится 2–3 цикла спускоподъемных операций в пределах меток. При гидромониторном размыве пласта после перфорации давление повышается до 18–20 МПа. Разрыв в одной точке осуществляется в течение 6–10 минут.

Для эффективного вскрытия пласта и дальнейшей успешной обработки призабойной зоны необходимо наличие достаточно широкой щели в обсадной колонне и вскрытие накатным диском непосредственно породы продуктивного пласта. Накатный диск представляет собой шарнирную

дисковую фрезу. Традиционная конструкция накатных дисков часто только частично прорезала цементный камень, а контакт с породой достигался с помощью гидромониторного размыва цементного кольца. После перфорации прорезанная щель могла смыкаться. Для повышения эффективности гидромеханической щелевой перфорации нами была разработана принципиально новая конструкция накатных дисков [18].

Перфоратор щелевой для обсаженных скважин состоит из корпуса – 3, 10, подпружиненного полым штоком – 1 с поршнем – 2 и пружинами – 4, гидромониторной насадки – 5, клина – 6 в виде вилкообразного ползуна, опорных и боковых пластин – 11, рычага – 9, шарнирно установленного в корпусе и взаимодействующего посредством оси на свободном его конце с клином – 6.

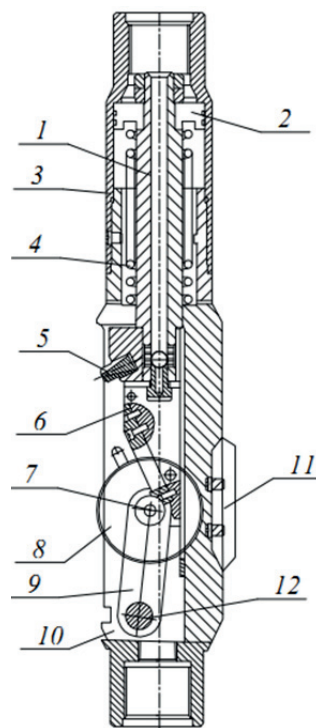


Рис. 1. Конструкция перфоратора

Fig. 1. Perforator design

На оси – 12 рычага, взаимодействующей с клином, установлена шарнирно – 7 дисковая фреза – 8 с режущими двусторонними кромками на обеих сторонах, выполненными по многоярусной схеме с расчетной глубиной резания каждого яруса, а периферийная поверхность выполнена многопрофильной с углами профилей большими углов трения. Таким образом обеспечивается повышение эффективности, надежности и долговечности перфоратора.

Благодаря тому, что конструкция заявленного изобретения позволяет заменить процесс формирования щели за счет деформации обсадных труб вплоть до их разрыва по образующей на процесс резания металла труб, на что требуется существен-

но меньшие усилия со стороны перфоратора, повышается надежность и долговечность перфоратора, обеспечивается возможность применения фрезы большой толщины, а следовательно, и получение перфорационной щели большой ширины. Существенным положительным следствием является и исключение заклинивания фрезы за счет уменьшения величины и последующего полного удаления деформированного в цементный камень металла труб, в результате чего формируется геометрически идеальная щель. Форма предложенного накатного диска представлена на рис. 2. Дисковая фреза – 1 снабжена режущими двусторонними кромками – 2 на обеих сторонах, выполненными по многоярусной схеме, а периферийная поверхность – 3 выполнена многопрофильной. Причем углы ее профилей больше, чем углы трения.

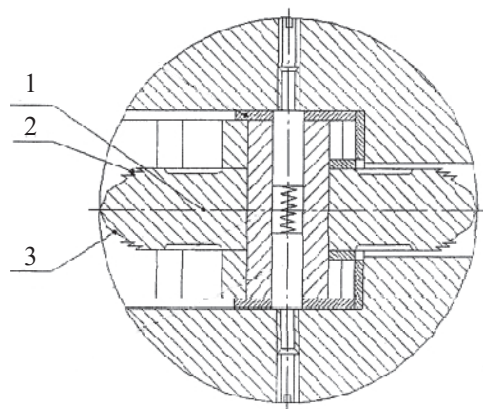


Рис. 2. Конструкция модернизированной дисковой фрезы

Fig. 2. Design of the modernized rolling disk mill

Перфоратор, закрепленный на нижнем конце колонны насосно-компрессорных труб, устанавливают против требуемого интервала перфорации, и создают в НКТ расчетное давление, под действием которого поршень с полым штоком и клином перемещаются на расчетное расстояние вниз, сжимая возвратную пружину. Клин своей клиновидной поверхностью воздействует на ось, отодвигая ее с дисковой фрезой в радиальном направлении, в результате чего дисковая фреза своей многопрофильной периферийной поверхностью вдавливаются в перфорируемую обсадную трубу на соответствующую глубину. После этого перфоратору и НКТ сообщается возвратно-поступательное движение на технологически необходимую величину хода. При этом дисковая фреза перекачивается по обсадной трубе, вращаясь вокруг оси. После нескольких дискретных повышений давления в НКТ с возвратно-поступательными движениями перфоратора и образования в обсадной трубе желоба расчетной глубины в процесс формирования перфорационной щели вступают и режущие кромки перфоратора, последовательно расширяющие щель за счет срезания металла трубы. По завершении перфорации трубы и размыва цементного камня и горной породы струей из гидромагнитной насадки выключают насос, в результате давление в НКТ и цилиндре падает. Поршень с полым штоком и клином за счет возвратной пружины возвращаются в исходное верхнее положение, причем за счет перемещения пальцев рычага по пазам боковых пластин клина дисковая фреза задвигается внутрь корпуса. В результате перфоратор приводится в транспортное положение и может быть перемещен в новый интервал перфорации или извлечен из скважины.

Непосредственно после проведения ГМЦП без подъема оборудования возможна обработка призабойной зоны композициями химреагентов, в том числе и на кислотной основе [4–6].

Площадь вскрытия продуктивного пласта с помощью ГМЦП в 10–15 раз выше, чем при применении кумулятивной перфорации. За счет большей площади контакта в системе скважина–пласт достигается высокое гидродинамическое совершенство по характеру вскрытия.

Результаты применения комплексной технологии

Рассматриваемые скважины находятся на территории Татарстана и эксплуатируются НК «Татнефть». Территориально скважины находятся на территории восьми НГДУ: Альметьевскнефть, Лениногорскнефть, Азнакаевскнефть, Елховнефть, Нурлатнефть, Джалильнефть, Прикамнефть, Бавлынефть. На ноябрь 2013 г. проведено 219 обработок. Наибольшее количество обработок проведено по пашийскому и кыновскому горизонтам, по кизеловскому горизонту турнейского яруса, по тульскому и бобриковскому горизонтам визейского яруса.

Незначительное количество обработок проведено по ярусу, каширскому и верейскому горизонту.

Таким образом, в стратиграфической приуроченности скважин с применением ГМЦП имеется довольно широкий диапазон.

На рис. 3 приведены графики дебита нефти и обводненности продукции по скважине № 10105 Тауташского месторождения. Скважина № 10105 эксплуатировала бобриковско-радаевские отложения в интервале 1386,6–1391,0 м. При обводнении на 98,5 % скважина шесть месяцев работала с дебитом нефти 0,7 т/сут. После изоляции данного горизонта и перехода на верхний горизонт в интервале 1381,3–1383,3 м скважина стала работать с дебитом 14,2 т/сут при обводненности продукции 40,7 %. Вторичное вскрытие пласта проводилось с помощью ГМЦП. Интервал цементного кольца в перемычке между обводненным и новым пластом составил всего пять метров.

На рис. 4 приведена динамика добычи нефти и обводненность продукции скважины № 4113 Бурейкинского месторождения, эксплуатировавшей бобриковско-радаевские отложения. После обводнения нижнего интервала до 98,4 % и снижения дебита до 0,4 т/сут была проведена его изоляция и вторичное вскрытие верхнего пласта в интервале 1434,0–1435,0 м с помощью ГМЦП. При наличии цементной перемычки за колонной всего два метра

получен рентабельный дебит нефти в 5,7 т/сут при обводненности 59,5 %.

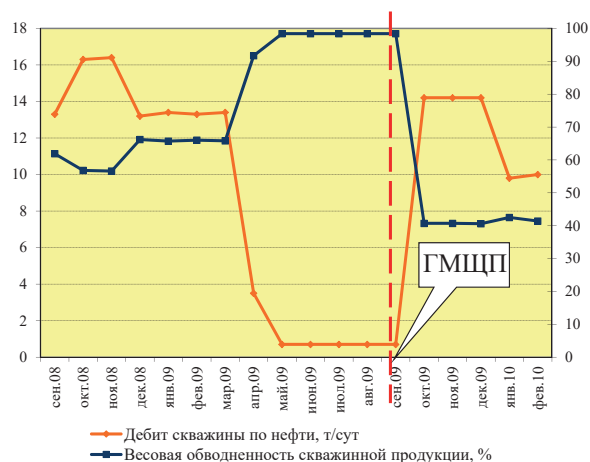


Рис. 3. Динамика дебита нефти и обводненности продукции по скважине № 10105 Тауташского месторождения

Fig. 3. Dynamics of oil production rate and water cut at well no. 10105 of the Tautash deposit

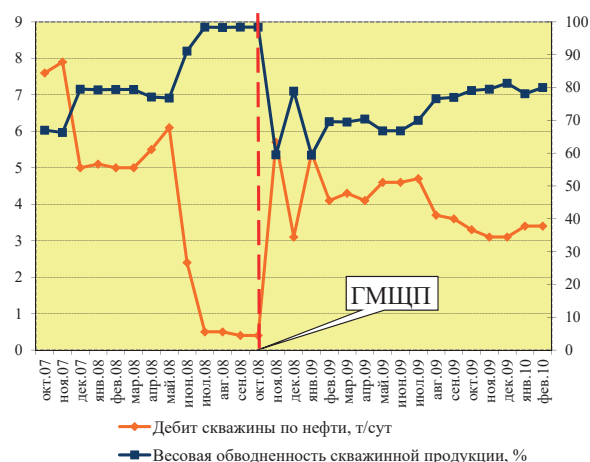


Рис. 4. Динамика дебита нефти и обводненности продукции по скважине № 4113 Бурейкинского месторождения

Fig. 4. Dynamics of oil production rate and water cut in well no. 4111 of Bureikinsky field

При вторичном вскрытии с помощью ГМЩП низкопроницаемых коллекторов без проведения ОПЗ притока может не быть. В этом случае проводят ОПЗ без подъема оборудования для ГМЩП. Перспективным направлением в этом случае является проведение реагентной разглинизации [19].

Проведение реагентной разглинизации в низкопродуктивных терригенных коллекторах позволяет повысить начальную или восстановить ухудшенную при вскрытии и в процессе эксплуатации пластов продуктивность коллектора.

В основу технологии положен качественно новый подход, основанный на обменной реакции между ионным комплексом глин и ионами, входящими в состав реагентных растворов, в результате чего глинистые образования набухают и самопроизвольно диспергируются на тонкодисперсные аг-

регаты. При создании депрессии на пласт глинистые частицы выносятся на поверхность, очищая тем самым поровое пространство [20].

В качестве водной фазы раствора для реагентной разглинизации используется пресная вода, подогретая для лучшего растворения порошка перкарбоната натрия до температуры 30–40 °С. При растворении в воде пероксикарбоната натрия происходит отщепление кристаллизационной перекиси водорода, водный раствор реагента имеет щелочную реакцию.

Объем закачиваемого реагентного раствора планируют для каждой скважины отдельно, в зависимости от геолого-технической характеристики пласта. Удельный объем реагента на метр толщины пласта ($V_{уд.}$, м³/м) обычно принимается 0,25–1,5 м³/м. Потребное количество реагентов будет определяться в зависимости от количества реагентного раствора, необходимого для обработки призабойной зоны пласта скважины.

После окончания реакции между растворами реагентов и глинистыми кольматирующими образованиями интервал перфорации и призабойная зона заполняется на максимально возможной скорости раствором соляной кислоты. При заполнении интервала перфорации кислотным раствором задвижка, разъединяющая межтрубное пространство с коллектором, закрывается и закачка раствора продолжается уже при минимальной скорости. При этом давление нагнетания не должно превышать давления опрессовки скважины.

Раствор соляной кислоты выдерживают в скважине в течение 2–3 ч.

На заключительной стадии операции скважину осваивают методом свабивания (поршневания). Освоение скважины должно быть осуществлено сразу же после окончания промывки скважины, во избежание выпадения в призабойной зоне скважины трудноудаляемых осадков.

После проведения ОПЗ все объекты комплексного воздействия удастся освоить, а скважину ввести в категорию добывающих или нагнетательных.

Заключение

Усложнение структуры извлекаемых запасов на месторождениях Российской Федерации требует совершенствования методов интенсификации и регулирования разработки добычи, одним из видов которых является вторичное вскрытие перфорацией при приобщении новых пластов к объектам разработки, реперфорация обсадных колонн с целью увеличения притока в скважину. Гидромеханическая целевая перфорация в ряде случаев является оптимальным по техническим характеристикам и экономическим соображениям решением. Главным недостатком данного вида вторичного вскрытия являлась низкая эффективность работы накатного диска, задачей которого является резка обсадной колонны для дальнейшего размыва цементного камня и горной породы за стенкой скважины при помощи гидромониторной насадки.

Применение запатентованной усовершенствованной конструкции накатного диска сложного профиля с заостренными зубцами позволило решить данную проблему. Комплексные обработки призабойных зон скважин, включающие саму перфорацию

и закачку в пласт разглинизирующей композиции непосредственно через компоновку перфоратора на насосно-компрессорных трубах позволили значительно повысить производительность добывающих скважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schecher R. Oil well stimulation. – New Jersey: Prent-Hall, 1992. – 602 p.
2. Perrin D. Oil and Gas Field Development Techniques. – Pennsylvania: Editions Technip, 1999. – 352 p.
3. Cook M.A. The Science of High Explosives. – Malabar: Krieger Publishing: American Chemical Soc. Monograph Series, 1958. – 440 p.
4. Шаисламов Ш.Г. Геофизические исследования и работы в скважинах. Вторичное вскрытие пластов и специальные операции. – Уфа: Информреклама, 2016. – 228 с.
5. Ланский Д.И. Преимущества гидромеханической целевой перфорации при вторичном вскрытии пласта // Нефть. Газ. Новации. – 2012. – № 7 (162). – С. 40–43.
6. Применение гидромеханических перфораторов / Р.Г. Габдуллин, Д.В. Страхов, В.Б. Основ, Р.З. Зиятдинов, А.Н. Семенов // Нефтяное хозяйство. – 2003. – № 12. – С. 103–105.
7. Салихов Р.Г., Крапивина Т.Н., Крысин Н.И. Применение целевой гидропескоструйной перфорации при вторичном вскрытии продуктивных пластов. – СПб.: ООО «Недра», 2005. – 180 с.
8. Струговец Е.Т. Глубокая гидравлическая перфорация // Бурение и нефть. – 2004. – № 6. – С. 30–31.
9. Саркисов Н.М., Шишов С.В. Совершенствование технологии целевой перфорации скважин // Нефтяное хозяйство. – 1995. – № 3. – С. 61–63.
10. Иванов С.И. Интенсификация притока нефти и газа к скважинам. – М: Недр-Бизнесцентр, 2015. – 565 с.
11. Жуланов И.Н., Крапивина Т.Н. Современная технология контроля качества целевой гидропескоструйной перфорации // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2005. – № 7. – С. 38–41.
12. Kruger R.F. Joint Bullet and Jet Perforation Tests. – Washington, DC: API Drilling and Production Practices, 1956. – 354 p.
13. Pittman F.C., Harriman D.W., John J.C.S. Investigation of Abrasive-Laden-Fluid Method for Perforation and Fracture Initiation // J Pet Technol. – 1961. – № 13 (5). – P. 189–195.
14. McCauley T.V. Backsurging and Abrasive Perforating to Improve Perforation Performance // Journal Petroleum Technology. – 1972. – № 24 (10). – P. 1207–1212.
15. Cobbett J.S. Sand Jet Perforating. – Texas: SPE Drilling & Completion, 1999. – 200 p.
16. Bell W.T., Sukup R.A., Taruq S.M. Perforating. – Denver: SPE Monograph Series, 1995. – 112 p.
17. Токарев М.А., Зубаиров С.Г., Токарева Н.М. Комплексное воздействие на продуктивный пласт при вторичном вскрытии с помощью гидромеханической целевой перфорации // Нефтегазовое дело. – 2016. – Т. 15. – № 2. – С. 72–79.
18. Перфоратор целевой для обсаженных скважин: пат. 2597392 Рос. Федерация № 2015118263/03; заявл. 15.05.2015; опубл. 19.08.2016, Бюл. № 25. – 3 с.
19. Токарева Н.М., Григорьев Е.С. Воздействие разглинизирующими композициями на призабойную зону пласта // Фундаментальные и прикладные исследования в технических науках в условиях перехода предприятий на импортозамещение: проблемы и пути решения: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. В 2 т. – Т. 2. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. – 427 с.
20. Способ обработки заглинизированных пластов: пат. 2162146 Рос. Федерация № 9911865/03; заявл. 01.06.1999; опубл. 20.01.2001, Бюл. № 2. – 3 с.

Поступила 17.01.2018 г.

Информация об авторах

Токарев М.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газонефтяных месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Зубаиров С.Г., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики и конструирования машин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Токарева Н.М., кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газонефтяных месторождений Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 622.276

EFFICIENCY OF HYDRO-SLOTTING PERFORATOR ADVANCED DESIGN

Mikhail A. Tokarev¹,
tma40@yandex.ru

Sibagat G. Zubairov¹,
mkm-ufa@mail.ru

Nadezhda M. Tokareva¹,
tokareva_n_m@mail.ru

¹ Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to improve the existing methods of casing perforation. A casing perforation is often complicated by a number of factors: a thin cement sheath between the watered and commingled intervals, a shallow thickness of the layer itself, etc. To perform perforation in such conditions, it is necessary to apply the technology that minimizes the stresses on production string and cement sheath.

The main aim of the research is to determine the effectiveness of the integrated technology of low-permeability layer casing perforation by hydromechanical slot perforator with an improved milling cutter and followed by treatment of the opened-up zone by the reagent clay reduction patented method.

Methods: monitoring the implementation of the improved design of a hydromechanical slot perforator to the field experience. The article shows the results of casing perforation at the wells of petrochemical complex «Tatneft».

Results. To improve the efficiency of hydro-slotting perforations, a fundamentally new design of rolling discs was developed. The structure of the invention enables to replace slot formation by deformation of the casing pipes until their blowout along the generatrix by pipe cutting. As a result, its reliability and durability increase. This enables the use of a large-sized milling cutter, and, consequently, this allows obtaining a large perforation slot. The design of the perforator makes it possible to process the near well bore area with the composition patented by the authors directly through the layout of the hydro-slotting perforation. On average, after slotted perforation a well oil production rate increased by 5–10 times with a corresponding decrease in water cut.

Key words:

Hydro-slotting perforation, well workover, casing perforation, reagent clay reduction, bottomhole area treatment.

REFERENCES

1. Schecher R. *Oil well stimulation*. New Jersey, Prent-Hall, 1974. 602 p.
2. Perrin D. *Oil and Gas Field Development Techniques*. Pennsylvania, Editions Technip, 1999. 352 p.
3. Cook M.A. *The Science of High Explosives*. Malabar, Krieger Publishing. American Chemical Soc. Monograph Series, 1958. 440 p.
4. Shaislamov Sh.G. *Geofizicheskie issledovaniya i raboty v skvazhinah. Vtorichnoe vskrytie plastov i spetsialnye operatsii* [Geophysical research and work in wells. Secondary fracturing and special operations]. Ufa, Informreklama Publ., 2016. 228 p.
5. Lansky D.I. Advantages in Applying Hydro Mechanical jet Perforation at Casing Perforation. *Neft'. Gaz. Novacii*, 2012, no. 7, pp. 40–43. In Rus.
6. Gabdullin R.G., Strakhov D.V., Osnos V.B., Ziyatdinov R.Z., Semenov A.N. Use of hydromechanical perforators. *Oil industry*, 2003, no. 12, pp. 103–105. In Rus.
7. Salihov R.G., Krapivina T.N., Krysin N.I. *Primenenie shchelevoy gidropeskostruynoy perforatsii pri vtorichnom vskrytii produktivnykh plastov* [Use of slotted perforation in secondary opening of reservoirs]. St-Petersburg, Nedra Publ., 2005. 180 p.
8. Strugovec E.T. Deep hydraulic perforation. *Drilling and oil*, 2004, no. 6, pp. 30–31.
9. Sarkisov N.M., Shishov S.V. Improvement of the technology of slotted hole perforation. *Oil industry*, 1995, no. 3. pp. 61–63. In Rus.
10. Ivanov S.I. *Intensifikatsiya pritoka nefti i gaza k skvazhinam* [Intensification of oil and gas inflow into wells]. Moscow, Nedra-Biznestsentr Publ., 2015. 565 p.
11. Zhulanov I.N., Krapivina T.N. Modern technology of quality control of slotted hydro-sandblast perforation. *Construction of oil and gas wells on land and at sea*, 2005, no. 7, pp. 38–41. In Rus.
12. Kruger R.F. *Joint Bullet and Jet Perforation Tests*. Washington, DC, API Drilling and Production Practices, 1956. 354 p.
13. Pittman F.C., Harriman D.W., John J.C.S. Investigation of Abrasive-Laden-Fluid Method for Perforation and Fracture Initiation. *J Pet Technol*, 1961, no. 13. pp. 189–195.
14. McCauley T.V. Backsurging and Abrasive Perforating To Improve Perforation Performance, *Journal Petroleum Technology*, 1972, no. 10. pp. 1207–1212.
15. Cobbett J.S. *Sand Jet Perforating*. Texas, SPE Drilling&Completion, 1999. 200 p.
16. Bell W.T., Sukup R.A., Taruq S.M. *Perforating*. Denver, SPE Monograph Series, 1995. 112 p.
17. Tokarev M.A., Zubairov S.G., Tokareva N.M. Complex influence on the oil formation during secondary opening with hydromechanical slotted perforation. *Oil and gas business*, 2016, no. 2, pp. 72–79. In Rus.
18. Zubairov S.G., Tokarev G.M., Tokarev M.A., Tokareva N.M. *Perforator shchelevoy dlya obsazhennykh skvazhin* [Slotted perforator for cased wells]. Patent RF, no. 2597392, 2016.
19. Tokareva N.M., Grigorev E.S. Vozdeystvie razgliniziruyushchimi kompozitsiyami na prizaboynuyu zonu plasta [Impact of the decomposing compositions on the bottomhole formation zone]. *Fundamentalnye i prikladnye issledovaniya v tekhnicheskikh naukakh v usloviyakh perekhoda predpriyatij na importozameshchenie: problemy i puti resheniya: sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Fundamental and applied research in the technical sci-

ences in the context of transition of enterprises to import substitution: problems and solutions. Proc. of scientific conference with international participation.]. Ufa, UGNTU Publ., 2015. Vol. II, pp. 115–116.

20. Tokarev M.A., Islamov R.G., Smirnov V.B., Tokarev G.M. *Sposob obrabotki zaglinizirovannykh plastov* [The way of treating oil beds with clay cement]. Patent RF, no. 216146, 2001.

Received: 17 January 2018.

Information about the authors

Mikhail A. Tokarev, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Sibagat G. Zubairov, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Nadezhda M. Tokareva, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 622.276.21

ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ ОБЪЕКТОВ РАЗРАБОТКИ НА ВЕЛИЧИНУ КОЭФФИЦИЕНТА ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГО-ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Гладких Евгений Александрович¹,
gladkih.ea@mail.ru

Хижняк Григорий Петрович¹,
xgp@mail.ru

Галкин Владислав Игнатьевич¹,
vgalkin@pstu.ru

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

Актуальность исследования обусловлена недостаточной изученностью мелких и мельчайших месторождений нефти, что создает определенные сложности при подсчете запасов, составлении документов на разработку и оценке ее рентабельности. Такие месторождения располагаются часто вблизи крупных разрабатываемых объектов, поэтому произвести некоторые расчеты, например, оценить коэффициент вытеснения нефти в условиях отсутствия керн, можно по аналогии с соседними месторождениями, используя аналитические зависимости, получение которых является актуальной задачей.

Цель исследования: изучить влияние фильтрационно-емкостных свойств на величину коэффициента вытеснения нефти в различных геолого-физических условиях.

Объекты: башкирские карбонатные и визейские терригенные продуктивные отложения месторождений Башкирского свода и Соликамской депрессии Пермского края.

Методы: метод пошагового регрессионного анализа данных лабораторных определений коэффициента вытеснения.

Результаты. Показан способ аналитической обработки статистических данных лабораторных определений коэффициента вытеснения нефти методом пошагового регрессионного анализа. Установлено, что на коэффициент вытеснения в пределах структурного элемента влияют различные параметры пласта и свойства флюидов. На примере башкирских карбонатных и визейских терригенных отложений показано наличие значимых корреляционных связей коэффициента вытеснения с фильтрационно-емкостными свойствами коллекторов и вязкостью нефти. Установлены диапазоны влияния этих параметров на коэффициент вытеснения. Полученные для изучаемых пластов регрессионные уравнения свидетельствуют о том, что процессы вытеснения в разновозрастных отложениях Башкирского свода отличаются от таковых в Соликамской депрессии. Параметры, включенные в регрессионные уравнения, показывают, что на начальном этапе значения коэффициента вытеснения обеспечиваются начальной нефтенасыщенностью и пористостью коллектора. Дальнейший рост коэффициента, связанный, вероятно, с доотмывом подвижной нефти после прорыва фронта вытеснения, определяется фильтрационными характеристиками пласта и вязкостью нефти.

Ключевые слова:

Коэффициент вытеснения, керн, регрессионное уравнение, нефтенасыщенность, пористость, проницаемость, вязкость нефти, фильтрационно-емкостные свойства.

Введение

Эпоха открытий месторождений «гигантов» уже позади. Большая часть таких месторождений, в разное время обеспечивавших основную долю годовой добычи нефти в стране, сегодня находится на 3-й, 4-й стадиях разработки с падающей добычей. Удержание или даже увеличение уровня добычи нефти может быть связано с запуском в разработку значительного числа вновь открываемых мелких месторождений. Однако зачастую это сопряжено с рядом трудностей, среди которых недостаточная изученность залежей. Как правило, такие объекты расположены неподалеку от более крупных разрабатываемых и достаточно изученных месторождений. В этой ситуации геолого-физическая информация по ним проецируется на разновозрастные отложения более мелких «соседей», что позволяет в значительной мере сократить время составления проектной документации и введения залежей в разработку.

Важным этапом на стадии проектирования разработки месторождений является обоснование

проектного значения коэффициента извлечения нефти (КИН). Для его расчета академиком А.П. Крыловым предложена формула [1]

$$\text{КИН} = K_{\text{вт}} \cdot K_{\text{охв}},$$

где $K_{\text{вт}}$ – коэффициент вытеснения нефти; $K_{\text{охв}}$ – коэффициент охвата пласта вытеснением. Эта формула позже была дополнена рядом коэффициентов [2], характеризующих технологии разработки залежи, но коэффициент вытеснения остался в неизменном виде, что характеризует степень значимости данного параметра.

По причине непостоянства коэффициента вытеснения нефти по площади залежи в неоднородных пластах [3] лабораторное определение $K_{\text{вт}}$ с использованием керна материала и флюидов изучаемого объекта [4] желательно проводить для различных геолого-физических условий [5]. Тем не менее при освоении мелких и мельчайших месторождений оно обычно слабо освещено кернавым материалом, либо он полностью отсутствует. Тогда коэффициент вытеснения может быть оценен по

аналогии с соседними разрабатываемыми месторождениями с использованием аналитических зависимостей, получение которых является актуальной задачей.

Пермский край является относительно старым районом нефтедобычи. По состоянию на 01.01.2017 на территории края открыто 225 нефтяных месторождений, 176 из которых разрабатываются. В лабораториях крупнейшего в регионе научно-исследовательского и проектного института ПермНИПИнефть с 1970 г. выполнено более 1500 лабораторных определений $K_{вт}$. Накоплен значительный объем статистических данных по разрабатываемым месторождениям нефти в крае. Авторами выполнены систематизация и анализ этих данных. Некоторые результаты этой работы изложены в данной статье.

Сведения об объектах исследования

В тектоническом отношении территория края довольно разнообразна и объединяет 19 крупных тектонических структур, которые подразделяются на структуры платформенного типа и приуроченные к зоне прогибов.

Наиболее ярким представителем платформенного типа является Башкирский свод (БС), расположенный на юге края. В его границах расположено 68 месторождений, что составляет 29 % месторождений нефти и газа Пермского края. На территории Соликамской депрессии (СД) – представителя второй группы структур, открыто 38 месторождений углеводородов (УВ) или 16 % разведанных месторождений рассматриваемой территории. Ввиду интенсивной разработки месторождений на выделенных структурных элементах – 54 (79 %) на БС и 28 (74 %) на СД, а также их перспективности к открытию более мелких месторождений УВ, данные структуры были выбраны для анализа.

Более половины разведанных запасов нефти края содержится в визейских песчаниках тульского и бобриковского горизонтов. Залежи визейской нефти открыты в 134 месторождениях, в том числе 46 месторождений на территории БС, 20 на СД.

Второе место по запасам принадлежит башкирским карбонатам, залежи нефти в которых присутствуют в 77 месторождениях – 22 на БС, 16 на СД.

Из-за особенностей геологического развития и осадконакопления одновозрастные отложения в зоне прогибов залегают на значительно больших глубинах, по сравнению со структурами платформенного типа. Так, абсолютные отметки кровли башкирского яруса на Соликамской депрессии изменяются от –1400 до –1800 м против –800...–1000 м на Башкирском своде [6]. Этим определяется большая упакованность пород на Соликамской депрессии, ее большая плотность и меньшие фильтрационно-емкостные свойства по сравнению с Башкирским сводом. В то же время нефти месторождений Соликамской депрессии легкие и маловязкие в отличие от БС. В работе исследовалось влияние фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) на фор-

мирование величины $K_{вт}$ в карбонатных и терригенных породах рассмотренных тектонических структур.

Исходные данные для анализа

В работе [5] показано наличие тесных корреляционных связей $K_{вт}$ с пористостью и проницаемостью коллекторов, которые также связаны друг с другом [7, 8]. В данном исследовании количество изучаемых параметров было увеличено. В работе использованы результаты лабораторных определений коэффициента вытеснения нефти и соответствующие ФЕС моделей пласта. В рассматриваемых отложениях (табл. 1) выполнено 156 определений $K_{вт}$. В исходные выборки были включены основные параметры, характеризующие ФЕС моделей, – пористость (K_p), газопроницаемость ($K_{прг}$), остаточная водонасыщенность ($K_{ов}$), объемная плотность горной породы (ρ), свойства флюида – вязкость нефти (μ_n), комплексный параметр (K_p/ρ) и коэффициент подвижности ($K_{прг}/\mu_n$), а также соответствующие им экспериментально определенные значения $K_{вт}$ (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики исходных выборок

Table 1. Characteristics of initial samples

Структурный элемент Structural element	Продуктивные отложения Productive deposits	Параметры выборки Sample parameters	Объем выборки (N) Sample size (N)
Башкирский свод Bashkir arch	башкирские карбонатные (Бш) Bashkirian carbonate deposits	$K_p, K_{прг}, K_{ов}, \rho, \mu_n, K_p/\rho, K_{прг}/\mu_n, K_{вт}$	19 определений 19 cases
	визейские терригенные (С _{IV}) Visean terrigenous deposits		71 определение 71 cases
Соликамская депрессия Solikamsk depression	башкирские карбонатные (Бш) Bashkirian carbonate deposits	$\phi, k_{air}, S_{rw}, \rho, \mu_o, \phi/\rho, k_{air}/\mu_o, E_D$	20 определений 20 cases
	визейские терригенные (С _{IV}) Visean terrigenous deposits		46 определений 46 cases

Примечание: $K_{вт}$ – коэффициент вытеснения нефти; K_p – пористость; $K_{прг}$ – проницаемость; $K_{ов}$ – остаточная водонасыщенность; ρ – объемная плотность породы; μ_n – вязкость нефти.

Note: E_D – displacement efficiency; ϕ – porosity; k_{air} – air permeability; S_{rw} – residual oil saturation; ρ – bulk density of rock; μ_o – oil viscosity.

Обработка и анализ данных

Обработка данных выполнена, руководствуясь [9–15], с применением метода пошагового регрессионного анализа и изложена в [16–18]. Суть его заключалась в том, что исходная выборка ранжировалась по возрастанию значений $K_{вт}$. Затем по значениям выборки строились регрессионные уравнения сначала по первым трем определениям, где зависимой переменной выступал $K_{вт}$, а независи-

мыми – остальные параметры выборки. Далее добавлялось еще одно определение $K_{вт}$, и уравнение регрессии перестраивалось уже по четырем определениям, и так далее. При получении уравнения на первом шаге в него включается параметр, оказывающий наибольшее влияние на зависимую переменную. На следующем шаге добавляется параметр с меньшей степенью влияния и т. д. Каждое уравнение строилось исходя из условий его наибольшей статистической значимости. Такой подход при обработке данных позволил в динамике проследить влияние параметров пласта и флюида на формирование коэффициента вытеснения нефти для пласта в целом.

Результаты и обсуждение

В процессе реализации пошагового регрессионного анализа для каждой из исходных выборок было получено $N-2$ линейных регрессионных уравнений, где N – объем выборки данных. Общий вид уравнений был следующим:

$$K_{вт}^M = A_0 + A_1 \cdot K_{п} + A_2 \cdot K_{прг} + A_3 \cdot K_{ов} + A_4 \cdot \rho + A_5 \cdot \mu_{н} + A_6 \cdot \frac{K_{п}}{\rho} + A_7 \cdot \frac{K_{прг}}{\mu_{н}},$$

где $K_{вт}^M$ – модельное значение коэффициента вытеснения; A_{0-7} – регрессионные коэффициенты, подбираемые по методу наименьших квадратов.

Порядок включения параметров в уравнение (слева направо) определяется степенью их участия в формировании значений $K_{вт}$, т. е. первым (после свободного члена A_0) указывается наиболее значимый параметр, затем второй по значимости и т. д.

Каждое уравнение характеризуется коэффициентом детерминации R^2 .

Башкирский свод

Рассмотрим зависимость коэффициента детерминации R^2 от $K_{вт}$ для башкирских карбонатных и визейских терригенных отложений месторождений Башкирского свода (рис. 1).

В корреляционном поле можно выделить следующие диапазоны:

- при $K_{вт} < 0,56$ точность аппроксимации уменьшается для обоих типов пород;
- при $0,56 < K_{вт} < 0,6$ значения R^2 возрастают;
- при $0,6 < K_{вт} < 0,64$ ($0,62$ для Бш) коэффициент детерминации уменьшается;
- при $K_{вт} > 0,64$ (только для C_{1v}) коэффициент детерминации возрастает.

Средние значения параметров выборок Башкирского свода в выделенных диапазонах $K_{вт}$ представлены табл. 2.

Для выделенных диапазонов $K_{вт}$ были получены регрессионные уравнения:

- при $K_{вт} < 0,56$:

$$\text{Бш} : K_{вт}^M = 0,6218 - 0,4282 K_{ов}; \quad (1)$$

$$C_{1v} : K_{вт}^M = 0,5587 - 0,1267 K_{ов}. \quad (2)$$

- при $0,56 < K_{вт} < 0,6$:

$$\text{Бш} : K_{вт}^M = 0,6359 - 0,3597 K_{п}; \quad (3)$$

$$C_{1v} : K_{вт}^M = 0,5390 - 0,4746 \frac{K_{п}}{\rho}; \quad (4)$$

- при $0,6 < K_{вт} < 0,64$ ($0,62$ для Бш):

$$\text{Бш} : K_{вт}^M = 0,6103 + 0,0011 \mu_{н} - 0,0521 \cdot K_{ов}; \quad (5)$$

$$C_{1v} : K_{вт}^M = 0,7411 - 0,4706 K_{ов} - 0,3720 K_{п}; \quad (6)$$

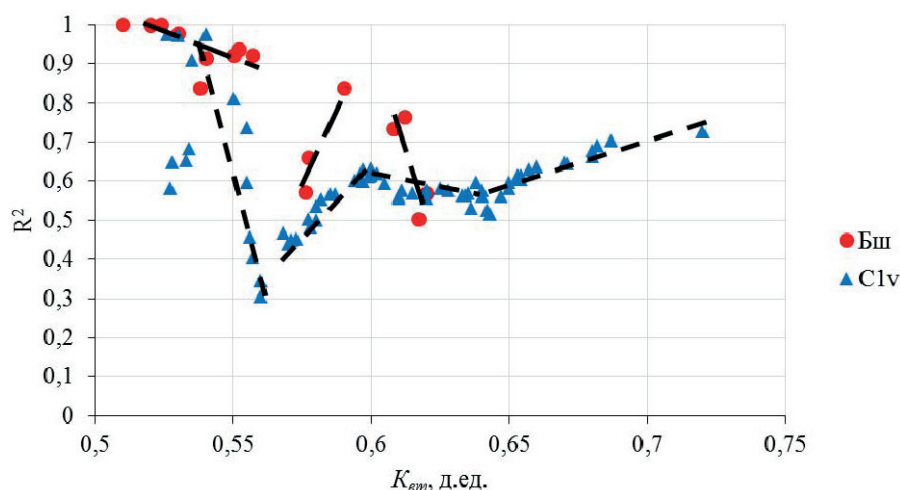


Рис. 1. Корреляционное поле значений R^2 и $K_{вт}$ для башкирских карбонатных и визейских терригенных отложений месторождений Башкирского свода Пермского края

Fig. 1. Correlation field of the values of R^2 and E_D in the Bashkirian carbonate and Visean terrigenous deposits of the Bashkir arch of the Perm region

Таблица 2. Средние значения параметров выборки

Table 2. Average values of sample parameters

Значения $K_{вт}$ Values E_D	Пласт Layer	$K_{пг}$, д.ед. ϕ , u.f.	$K_{пгг}$, мкм ² $K_{пгг}$, μm^2	$K_{овг}$, д.ед. $S_{пгг}$, u.f.	ρ , г/см ³ (g/cm ³)	$\mu_{нп}$, мПа·с $\mu_{ог}$, mPa·s	$K_{пг}/\rho$, см ³ /г ϕ/ρ , cm ³ /g	$K_{пгг}/\mu_{нп}$, мкм ² /мПа·с $K_{пгг}/\mu_{ог}$, μm^2 /mPa·s	$K_{втг}$, д.ед. E_D , u.f.
<0,56	Бш	0,154	0,1120	0,226	2,29	12,75	0,0676	0,01041	0,525
	C _{lv}	0,185	0,1404	0,164	2,15	11,95	0,0865	0,01302	0,538
0,56–0,60	Бш	0,153	0,1410	0,170	2,28	12,70	0,0672	0,01199	0,581
	C _{lv}	0,205	0,5245	0,099	2,10	13,64	0,0979	0,05498	0,585
0,60–0,64	Бш	0,184	0,2297	0,166	2,20	11,01	0,0840	0,02088	0,614
	C _{lv}	0,211	0,5702	0,084	2,09	11,95	0,1009	0,07245	0,623
0,64–0,72	C _{lv}	0,219	1,0761	0,064	2,06	9,68	0,1068	0,17718	0,664

• при $K_{вт} > 0,64$:

$$C_{lv} \cdot K_{вт}^M = 0,6437 + 0,0283K_{пгг} - 0,0010 \cdot \mu_{нп} \quad (7)$$

Анализ уравнений (1)–(7) показывает, что на коэффициент вытеснения нефти в выделенных диапазонах влияют различные параметры. В диапазоне средних значений $K_{вт}$ (уравнения (1) и (2)) в карбонатных и терригенных породах с относительно низкими ФЕС (табл. 2) его значение формируется под влиянием остаточной водонасыщенности $K_{ов}$, т. е. начальной нефтенасыщенности ($K_{пн}$), где $K_{пн} = 1 - K_{ов}$. Чуть большие значения $K_{вт}$ (уравнения (3) и (4)) формируются уже при участии пористости коллектора, а в терригенных породах еще и плотности. При дальнейшем увеличении $K_{вт}$ (уравнения (5) и (6)) его величина в башкирских карбонатных отложениях определяется главным образом вязкостью нефти и в меньшей степени остаточной водонасыщенностью, в то время как в терригенных отложениях визейского комплекса на $K_{вт}$ влияют остаточная водонасыщенность и пористость. Наибольшие значения $K_{вт}$ визейских отложений формируются под влиянием фильтрационных характеристик коллектора и вязкости нефти (7).

Из вышесказанного можно сделать вывод, что $K_{вт}$ башкирских карбонатных и визейских терригенных отложений Башкирского свода до значения 0,64 обеспечивается, в первую очередь, емкостными свойствами, а для коллекторов с высокими фильтрационно-емкостными свойствами значения $K_{вт} > 0,64$ формируются под влиянием, преимущественно, фильтрационной составляющей – проницаемости.

Соликамская депрессия

Выборки данных по Соликамской депрессии были проанализированы аналогично Башкирскому своду. На рис. 2 приведены зависимости R^2 от $K_{вт}$ для башкирских карбонатных и визейских терригенных продуктивных отложений месторождений Соликамской депрессии.

Корреляционное поле для башкирских карбонатных отложений визуальнее более однородно и описывается одним уравнением (8) с высоким коэффициентом детерминации $R^2 = 0,84$:

$$K_{вт}^M = -0,1782 + 32,2373K_{пг} - 0,6420K_{ов} - 60,2686 \frac{K_{пн}}{\rho} \quad (8)$$

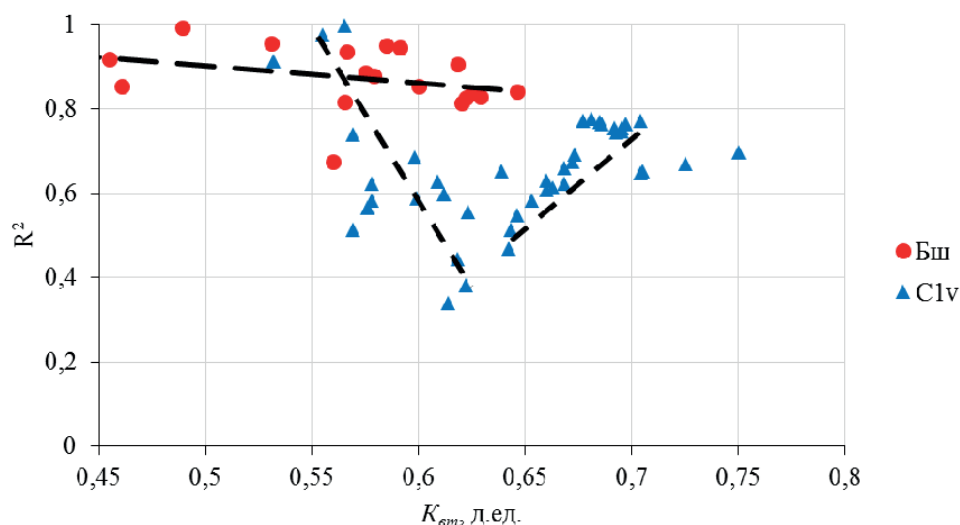


Рис. 2. Корреляционное поле значений R^2 и $K_{вт}$ для башкирских карбонатных и визейских терригенных отложений месторождений Соликамской депрессии Пермского края

Fig. 2. Correlation field of the values of R^2 and E_D in the Bashkirian carbonate and Visayan terrigenous deposits of the Solikamsk depression of the Perm region

Поле значений визейских терригенных отложений состоит из двух областей, в которых $K_{вт}$ аппроксимируется уравнениями (9) и (10):

- при $K_{вт} < 0,62$

$$K_{вт}^M = -2,6703 - 0,3045K_{ов} + 1,3917\rho + 51,2591\frac{K_{п}}{\rho} - 21,4910K_{п}. \quad (9)$$

- при $K_{вт} > 0,62$

$$K_{вт}^M = 0,9294 - 0,5229K_{ов} - 0,0138\mu_{н} - 0,0745\rho. \quad (10)$$

Выполненный анализ показал для отложений Соликамской депрессии, как и для Башкирского свода, наличие групп значений, в которых влияющие на $K_{вт}$ параметры различны. Однако полученные уравнения не могут быть использованы для оценки $K_{вт}$ новых мелких объектов разработки, поскольку значение $K_{вт}$ по ним неизвестно и выбрать то или иное уравнение не представляется возможным.

Решение этой проблемы описано в работе [16], где при помощи дискриминантного анализа [19, 20] тех же самых выборок башкирских карбонатных и визейских терригенных отложений Башкирского свода и Соликамской депрессии выделены классы, для которых получены следующие многомерные регрессионные уравнения (11)–(20) оценки $K_{вт}$:

- *Башкирский свод*

Бш:

$$K_{вт}^{M1} = 6,2282 - 0,5105K_{ов} + 0,0122\mu_{н} - 2,2167\rho - 4,3314K_{п}, \quad R^2 = 0,98; \quad (11)$$

$$K_{вт}^{M2} = 2,2325 - 0,0079\mu_{н} + 0,2005K_{прг} - 3,4625\frac{K_{п}}{\rho} - 0,5951\rho, \quad R^2 = 0,94. \quad (12)$$

C_{lv} :

$$K_{вт}^{M1} = 0,5883 - 0,3541K_{ов} + 0,0291K_{прг} + 0,2358\frac{K_{прг}}{\mu_{н}}, \quad R^2 = 0,82; \quad (13)$$

$$K_{вт}^{M2} = -0,5486 - 0,7384K_{ов} + 1,9497K_{п} + 0,3784\rho, \quad R^2 = 0,85; \quad (14)$$

$$K_{вт}^{M3-1} = 0,5501 - 0,1500K_{ов} + 1,7990\frac{K_{прг}}{\mu_{н}}, \quad R^2 = 0,62; \quad (15)$$

$$K_{вт}^{M3-2} = 0,5214 + 2,0426\frac{K_{прг}}{\mu_{н}} - 0,6285K_{ов}, \quad R^2 = 0,77. \quad (16)$$

- *Соликамская депрессия*
Бш:

$$K_{вт}^{M1} = 1,1483 - 5,6251K_{прг} + 0,1718\mu_{н} + 16,1795\frac{K_{прг}}{\mu_{н}} - 0,4404\rho - 0,1534K_{ов}, \quad R^2 = 0,99; \quad (17)$$

$$K_{вт}^{M2} = 0,5712 + 0,1914K_{прг} + 0,2823\frac{K_{прг}}{\mu_{н}}, \quad R^2 = 0,40. \quad (18)$$

C_{lv} :

$$K_{вт}^{M1} = -0,5483 - 0,2514K_{ов} + 0,4811\rho + 2,6959\frac{K_{прг}}{\mu_{н}} - 1,1552K_{прг} + 0,0159\mu_{н}, \quad R^2 = 0,79; \quad (19)$$

$$K_{вт}^{M2} = 0,7885 - 0,0759\frac{K_{прг}}{\mu_{н}} - 0,7088K_{ов} - 0,0203\mu_{н} + 0,0671K_{прг}, \quad R^2 = 0,81. \quad (20)$$

В приведенных уравнениях $K_{вт}^{M1}$, $K_{вт}^{M2}$, $K_{вт}^{M3}$ – модельные значения коэффициента вытеснения соответственно для 1, 2 и 3 классов; $K_{вт}^{M3-1}$, $K_{вт}^{M3-2}$ – модельные значения коэффициента вытеснения соответственно для 1 и 2 подклассов 3 класса.

Стоит отметить, что уравнение (18), полученное для башкирских отложений Соликамской депрессии, имеет низкий коэффициент детерминации. Используемые в данной работе параметры не позволили получить более тесную корреляционную связь, поэтому для $K_{вт}$ в этих отложениях может быть рекомендована формула (8).

По уравнениям рассчитаны модельные значения коэффициента вытеснения, и их значения сопоставлены с экспериментальными (рис. 3).

Выполненное сопоставление показало высокую сходимость модельных и экспериментальных значений $K_{вт}$, средние абсолютные ($\Delta_{абс}^p$) и относительные ($\Delta_{отн}^p$) погрешности не превысили 0,017 д.ед. и 2,77 % соответственно. Полученные уравнения могут применяться для оценки $K_{вт}$ мелких месторождений, открываемых в пределах рассматриваемых территорий, а также при контроле потоковых исследований.

Выводы

В рассмотренных продуктивных отложениях влияние фильтрационно-емкостных свойств на коэффициент вытеснения нефти не одинаково. При этом различие имеет место не только для разных

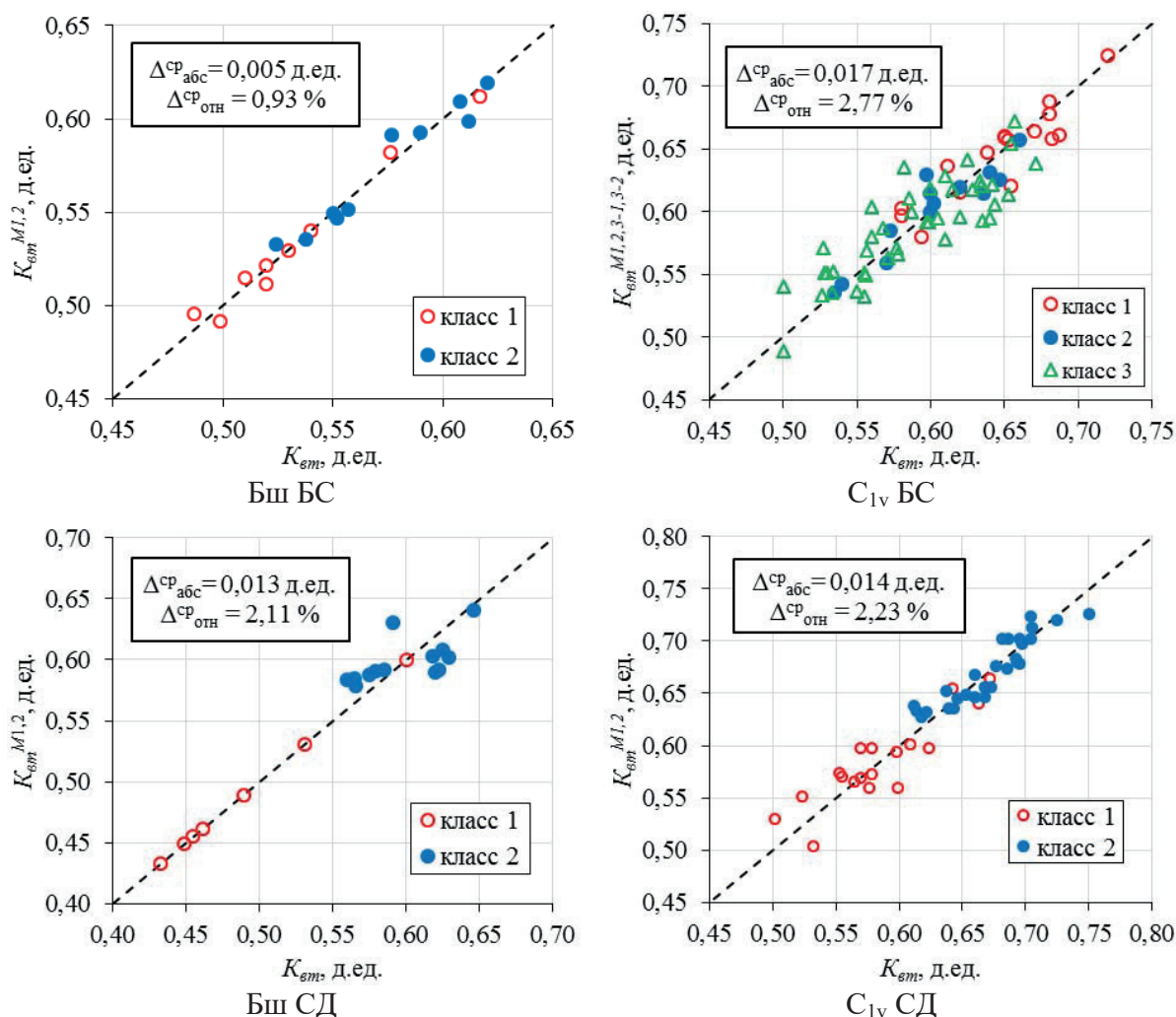


Рис. 3. Сопоставление модельных и экспериментальных значений коэффициента вытеснения

Fig. 3. Comparison of the model and experimental values of the displacement efficiency

структур, но и для отложений одного возраста в пределах одной структуры.

Получены многомерные модели оценки коэффициента вытеснения нефти в карбонатных башкирских и визейских терригенных отложениях месторождений Башкирского свода и Соликамской депрессии Пермского края.

Установлено, что для продуктивных отложений Башкирского свода, относящегося к структу-

рам платформенного типа, величина коэффициента вытеснения определяется преимущественно емкостным параметром – начальной нефтенасыщенностью, а также вязкостью нефти.

В продуктивных отложениях Соликамской депрессии Предуралья краевой прогиба величина нефтьвытеснения зависит в большей степени от фильтрационных параметров – проницаемости и подвижности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крылов А.П. Состояние теоретических работ по проектированию разработки нефтяных месторождений и задачи по улучшению этих работ // Опыт разработки нефтяных месторождений и задачи по улучшению этих работ. – М.: Госоптехиздат, 1957. – С. 116–139.
2. Закиров И.С., Корпусов В.И. Коррекция структуры формулы для расчета коэффициента извлечения нефти // Нефтяное хозяйство. – 2006. – № 1. – С. 66–68.
3. Оценка распространения коэффициента вытеснения нефти по площади в неоднородных пластах / Р.Г. Сарваретдинов, А.А. Махмутов, Р.З. Нургалиев, В.А. Ленский, М.А. Токарев // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 12. – С. 59–61.
4. ОСТ 39–195–86. Нефть. Метод определения коэффициента вытеснения нефти водой в лабораторных условиях. – М.: Миннефтепром, 1986. – 19 с.
5. Закиров С.Н., Муртазалиев А.Ш. К определению коэффициентов вытеснения для терригенных и карбонатных коллекторов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2009. – № 9. – С. 45–47.
6. Лядова Н.А., Яковлев Ю.А., Располов А.В. Геология и разработка нефтяных месторождений Пермского края. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2010. – 335 с.

7. Permeability dependency on stiff and compliant porosities: a model and some experimental examples / S.A. Shapiro, G.P. Khizhniak, V.V. Plotnikov, R. Niemann, P.Yu. Ilyushin, S.V. Galkin // *Journal of Geophysics and Engineering*. – 2015. – V. 12. – P. 376–385. DOI: 10.1088/1742-2132/12/3/376.
8. Jing-qiang L., Chao-mo Z., Zhansong Z. Combine the capillary pressure curve data with the porosity to improve the prediction precision of permeability of sandstone reservoir // *Journal of Petroleum and Engineering*. – 2016. – V. 139. – P. 43–48.
9. Davis J.C. *Statistics and data analysis in geology*. 3rd ed. – New York; Chichester; Brisbane; Toronto; Singapore: John Wiley & Sons, 2002. – 656 p.
10. Афифи А.А., Эйзен С.П. *Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ*. – М.: Мир, 1982. – 488 с.
11. Johnson N.L., Leone F.C. *Statistics and experimental design*. – New York; London; Sydney; Toronto: John Wiley & Sons, 1977. – 606 p.
12. Montgomery D.C., Peck E.A. *Introduction to linear regression analysis*. – New York: John Wiley & Sons, 1982. – 504 p.
13. Montgomery D.C., Peck E.A. *Introduction to Linear Regression Analysis*. – New York: John Wiley & Sons, 1982. – 504 p.
14. *Statistics for Petroleum Engineers and Geoscientists* / J.L. Jensen, L.W. Lake, P.W.M. Corbett, D.J. Goggin / Ed. by L.W. Lake. – New Jersey, USA: Prentice Hall PTR, 1997. – 390 p.
15. Afifi A., May S., Clark V.A. *Practical multivariate analysis*. 5th ed. – Hoboken: Chapman and Hall/CRC, 2011. – 537 p.
16. Способ оценки коэффициента вытеснения нефти на основе стандартных исследований керна / Е.А. Гладких, Г.П. Хижняк, В.И. Галкин, Н.А. Попов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. – 2017. – Т. 16. – № 3. – С. 225–237. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.3.3.
17. Гладких Е.А., Хижняк Г.П., Галкин В.И. Оценка коэффициента вытеснения нефти на основе стандартных исследований керна месторождений Пермского края // *Нефтяное хозяйство*. – 2017. – № 8. – С. 90–93. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-8-90-93.
18. Гладких Е.А., Хижняк Г.П. Разработка модели для оценки коэффициента вытеснения нефти (на примере башкирских карбонатных отложений) // *Нефтепромысловое дело*. – 2017. – № 5. – С. 9–14.
19. Девис Дж.С. *Статистический анализ данных в геологии*: в 2 кн. – М.: Недра, 1990. – Кн. 1. – 319 с.
20. Девис Дж.С. *Статистический анализ данных в геологии*: в 2 кн. – М.: Недра, 1990. – Кн. 2. – 426 с.

Поступила 06.04.2018 г.

Информация об авторах

Гладких Е.А., аспирант кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Хижняк Г.П., доктор технических наук, заведующий кафедрой нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Галкин В.И., доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 622.276.21

INFLUENCE OF FILTRATION-CAPACITIVE PROPERTIES OF DEVELOPMENT OBJECTS ON THE VALUE OF OIL DISPLACEMENT EFFICIENCY IN VARIOUS GEOLOGICAL AND PHYSICAL CONDITIONS

Evgeniy A. Gladkikh¹,
gladkikh.ea@mail.ru

Grigoriy P. Khizhnyak¹,
xgp@mail.ru

Vladislav I. Galkin¹,
vgalkin@pstu.ru

¹ Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolskiy Avenue, Perm, 614990, Russia.

The relevance of the research is caused by the insufficient study of small and tiny oil fields, which creates certain difficulties in calculating reserves, drawing up documents for development and evaluation of its profitability. Such deposits are often located near large developed objects, therefore it is possible to make some calculations, for example, to estimate the oil displacement efficiency in the absence of core, by analogy with neighboring deposits, using analytical dependencies, the receipt of which is an actual task.

The main aim of the research is to study oil displacement and to determine the characteristics of the formation influencing the value of the displacement efficiency.

Objects of the research are Bashkirian carbonate and Visean terrigenous productive deposits of the Bashkir arch and Solikamsk depression of the Perm region.

The authors have applied the method of stepwise regression analysis of laboratory determinations of the displacement efficiency.

Results. The paper shows a method of analytical processing of statistical data of laboratory determinations of the oil displacement efficiency by the method of stepwise regression analysis. It is established that the displacement efficiency for formation within structural element is influenced by various parameters of formation and the properties of the fluids. The presence of statistically significant correlations between the displacement efficiency and the reservoir properties and the viscosity of oil is shown using the example of the Bashkir carbonate and Visean terrigenous deposits. The ranges of influence of these parameters on the displacement efficiency are established. The regression equations obtained for the strata studied by the layer indicate that the processes of displacement in the same-age sediments of the Bashkir arch differ from those in the Solikamsk depression. The parameters included in the regression equations indicate that at the initial stage the average values of the displacement efficiency are ensured by the initial oil saturation and porosity. A further increase in the displacement efficiency, probably associated with pre-washing of the mobile oil after the break-through of the displacement front, is determined by the filtration characteristics of formation and oil viscosity.

Key words:

Displacement efficiency, core, regression equation, initial oil saturation, porosity, permeability, oil viscosity, filtration-capacitive properties of the rock.

REFERENCES

1. Krylov A.P. Sostoyanie teoreticheskikh rabot po proektirovaniyu razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy i zadachi po uluchsheniyu ehtikh rabot [Theoretical works in development of oil fields and tasks in improving these works]. *Opyt razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy i zadachi po uluchsheniyu etikh rabot* [Experience in development of oil fields and tasks to improve these works]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1957. pp. 116–139.
2. Zakirov I.S., Korpusev V.I. Correction of structure of the formula for calculation of oil-recovery ratio. *Oil industry*, 2006, no. 1, pp. 66–68. In Rus.
3. Sarvaretidinov R.G., Makhmutov A.A., Nurgaliev R.Z., Lensky V.A., Tokarev M.A. Evaluation of the spread of oil displacement efficiency by area in heterogeneous beds. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2016, no. 12, pp. 59–61. In Rus.
4. OST 39–195–86. *Neft. Metod opredeleniya koeffitsienta vytesneniya nefi vodoy v laboratornykh usloviyakh* [Oil. Method for determining the coefficient of oil displacement by water in laboratory conditions]. Moscow, Minnefteprom Publ., 1986. 19 p.
5. Zakirov S.N., Murtazaliev A.S. Definition of replacement coefficients for terrigenous and carbonate collectors. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2009, no. 9, pp. 45–47. In Rus.
6. Lyadova N.A., Yakovlev Yu.A., Raspopov A.V. *Geologiya i razrabotka neftyanykh mestorozhdeniy Permskogo kraya* [Geology and development of oil deposits in Perm Krai]. Moscow, OAO VNIIO-ENG Publ., 2010. 335 p.
7. Shapiro S.A., Khizhniak G.P., Plotnikov V.V., Niemann R., Ilyushin P.Yu., Galkin S.V. Permeability dependency on stiff and compliant porosities: a model and some experimental examples. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2015, vol. 12, pp. 376–385. DOI: 10.1088/1742-2132/12/3/376.
8. Jing-qiang L., Chao-mo Z., Zhansong Z. Combine the capillary pressure curve data with the porosity to improve the prediction precision of permeability of sandstone reservoir. *Journal of Petroleum and Engineering*, 2016, vol. 139, pp. 43–48.
9. Davis J.C. *Statistics and data analysis in geology*. 3rd ed. New York; Chichester; Brisbane; Toronto; Singapore, John Wiley & Sons, 2002. 656 p.
10. Afifi A.A., Eyzens S.P. *Statisticheskii analiz. Podkhod s ispolzovaniyem EVM* [Statistical analysis. Approach to computer use]. Moscow, Mir Publ., 1982. 488 p.
11. Johnson N.L., Leone F.C. *Statistics and experimental design*. New York; London; Sydney; Toronto, John Wiley & Sons, 1977. 606 p.
12. Montgomery D.C., Peck E.A. *Introduction to linear regression analysis*. New York, John Wiley & Sons, 1982. 504 p.

13. Montgomery D.C., Peck E.A. *Introduction to Linear Regression Analysis*. New York, John Wiley & Sons, 1982. 504 p.
14. Jensen J.L., Lake L.W., Corbett P.W.M., Goggin D.J. *Statistics for Petroleum Engineers and Geoscientists*. New Jersey, Prentice Hall PTR, 1997. 390 p.
15. Afifi A., May S., Clark V.A. *Practical multivariate analysis*. 5th ed. Hoboken, Chapman and Hall/CRC, 2011. 537 p.
16. Gladkikh E.A., Khizhnyak G.P., Galkin V.I., Popov N.A. Technique for evaluation of oil displacement coefficient based on the conventional core study. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2017, vol. 16, no. 3, pp. 225–237. In Rus. DOI: 10.15593/2224–9923/2017.3.3.
17. Gladkikh E.A., Galkin V.I., Khizhnyak G.P. The method for estimating the oil displacement coefficient based on standard core analysis. *Oil industry*, 2017, no. 5, pp. 90–93. In Rus.
18. Gladkikh E.A., Khizhnyak G.P. Development of a model applied to estimate the oil displacement factor (on the example of Bashkir carbonate deposits). *Oilfield engineering*, 2017, no. 5, pp. 9–14. In Rus.
19. Davis J.C. *Statisticheskii analiz dannykh v geologii* [Statistics and data analysis in geology]. Moscow, Nedra Publ., 1990. B. 1, 319 p.
20. Davis J.C. *Statisticheskii analiz dannykh v geologii* [Statistics and data analysis in geology]. Moscow, Nedra Publ., 1990. B. 2, 426 p.

Received: 6 April 2018.

Information about the authors

Evgeniy A. Gladkikh, postgraduate student, head of the Laboratory, Perm National Research Polytechnic University.

Grigoriy P. Khizhnyak, Dr. Sc., head of the Department, Perm National Research Polytechnic University.

Vladislav I. Galkin, Dr. Sc., head of the Department, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 627.372

СИСТЕМА СТАЦИОНАРНЫХ ВСЕСЕЗОННЫХ БОНОВЫХ ЗАГРАЖДЕНИЙ С ПЕРЕМЕННОЙ ПЛАВУЧЕСТЬЮ – «СТАБОНЗА» И «СТАБОНЗА-ШЕЛЬФ»

Султанмагомедов Султанмагомед Магомедтагирович¹,
ftt2010@mail.ru

Кунафин Роберт Наильевич²,
kunafin@outlook.com

Султанмагомедов Тимур Султанмагомедович¹,
ftt65@mail.ru

Хасанов Рустям Рафикович¹,
hasanov25@mail.ru

Кантемиров Игорь Финсирович¹,
ikant@mail.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

² Уфимский государственный нефтяной технический университет «Центр сервиса трубопроводных систем»,
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Кольцевая, 8/3.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью поддержания и соблюдения высоких экологических норм, природоохранных требований в области магистрального трубопроводного транспорта, в частности на объектах водного хозяйства. Применяемые в настоящее время устройства для локализации и сбора продуктов разлива в акваториях рек при авариях на подводных переходах имеют ряд недостатков: начиная со сбоев в работе боновых заграждений, вызванных во многих ситуациях несовершенством самой конструкции (засасывание, протекание, глиссирование продукта), и заканчивая ограниченностью их применения, связанной с сезонными изменениями (не только состояния поверхности водоемов, но и физических свойств, характеристик нефти и нефтепродуктов). Ввиду этого является крайне важным улучшение используемых устройств и разработка новых систем боновых заграждений. Кроме того, для достижения большего эффекта необходимо непрерывно совершенствовать методики расчета параметров установки и работы подобных устройств на воде.

Цель работы: представить широкой публике новую конструкцию стационарных всесезонных боновых заграждений с переменной плавучестью – «Стабонза» и «Стабонза-Шельф», предназначенных для оперативной ликвидации последствий разлива нефти и нефтепродуктов на подводных переходах, добывающих платформах и отгружающих морских терминалах. Кроме того, проинвестировать корректировку параметров расчета установки системы боновых заграждений в рабочее положение.

Методы. В исследовании применяются методы строительной механики (сопротивления материалов): метод интегрирования дифференциального уравнения изогнутой оси балки для определения прогибов и углов поворота.

Результаты. Описаны конструкции и принцип действия разработанных стационарных всесезонных боновых заграждений с переменной плавучестью – «Стабонза» и «Стабонза-Шельф», принципиально отличающихся от ныне существующих высокой надежностью и долговечностью за счёт цельности основных элементов, невысокой стоимостью комплектующих и материалов и, прежде всего, оперативностью развёртывания и приведения системы в исходное плановое состояние. Уточнены параметры расчета установки боновых заграждений в рабочее положение. В существующих методиках предполагается, что в местах крепления боновых заграждений промежуточными оттяжками (в случаях их необходимости) угол поворота силового элемента конструкции заграждения – жесткого полиэтиленового трубопровода – отличен от нуля, что не соответствует действительности. В результате корректировки схемы и уточнения параметров расчета установлено, что максимальный прогиб полиэтиленового трубопровода приходится не на середину пролета l , а на сечении $x=1,58l$, при этом значение самого прогиба на 17 % меньше ранее полученных другими авторами величин.

Ключевые слова:

Магистральный трубопровод, разгерметизация, боновое заграждение переменной плавучести, прочность, прогиб, оттяжка, шельф.

Введение

Развитие нефтегазового комплекса России является стратегической задачей государственного масштаба. Освоение труднодоступных северных месторождений углеводородного сырья как на суше, так и на шельфе Арктики – гарантия надежного своевременного обеспечения внутренних и внешних потребителей качественным готовым товаром – продуктом подготовки и переработки нефти

и газа, – всё это неотъемлемые составляющие поставленной задачи, во многом достигаемые благодаря стремительному росту значимости трубопроводного транспорта. По этой причине сложно переоценить вклад системы трубопроводного транспорта в развитие отечественной экономики.

К настоящему моменту в России эксплуатируется порядка 275 тыс. км магистральных трубопроводов, среди которых: нефтепроводы – 55 тыс.

км, газопроводы – 188 тыс. км, нефтепродуктопроводы – 23 тыс. км [1].

Преодолевая большие расстояния, трубопроводы пересекают многочисленные реки и озера, болота и топи. В одной лишь компании ПАО «Транснефть» насчитывается около 1500 подводных переходов общей протяженностью более 3000 км [2].

Несмотря на реализуемые многочисленные мероприятия и целенаправленные программы повышения качества и надежности эксплуатации магистральных трубопроводов в рамках отдельных компаний, в том числе иностранных, отказы на подводных трубопроводах, к сожалению, нередки [3, 4]. По результатам обследований, проводимых специализированными компаниями в системе ПАО «Транснефть», предметом особого внимания остаются 657 подводных переходов, из которых более 200 (общей протяженностью свыше 450 км) имеют возраст от 29 до 40 лет [5].

В период активного становления и развития магистрального трубопроводного транспорта углеводородов такие факторы, как интенсивное переформирование русловых участков и старение металла, к сожалению, учитывались не в достаточной мере, что дает о себе знать сегодня в виде разгерметизации трубопровода и выхода продукта перекачки на поверхность – аварии [6–8]. Безусловно, утечка нефти или нефтепродукта представляет огромную экологическую опасность. Она может нанести существенный материальный урон эксплуатирующей организации в виде единовременных затрат на локализацию продуктов разлива, ликвидации последствий аварий, санкций и штрафов со стороны органов экологического надзора, упущенных выгод за время вынужденного простоя трубопровода, а также моральный ущерб в виде удара, нанесенного по репутации надежного поставщика энергоресурсов. Ввиду этого крайне важны проекты по разработке и внедрению в производство превентивных мер [9–11], а также мер, позволяющих быстро и эффективно реагировать на факт подобной утечки [12]. Данная проблема становится особенно актуальной в зимнее время, в период полного сковывания поверхности рек ледяной коркой, когда наличие льда и снега зачастую делает невозможным оперативное визуальное обнаружение утечки и своевременное вмешательство путем использования известных боновых заграждений для локализации разливов [13–16].

Система стационарных всесезонных боновых заграждений с переменной плавучестью

Во многом перечисленные проблемы могут быть решены благодаря системе стационарных всесезонных боновых заграждений с переменной плавучестью – системе «Стабонза» [17]. Регулируемая плавучесть позволяет переводить систему в нерабочее положение (например, на судоходных реках) – когда боны в затопленном состоянии находятся на дне реки, и в рабочее положение – когда боны переводятся на поверхность реки (по фак-

ту возникновения утечки или предварительно (превентивно)).

Предлагаемая система «Стабонза» является более дешевой, простой и надежной реализацией идеи боновых заграждений с переменной плавучестью, чем существующие сегодня.

Все необходимые составные части для создания такой системы доступны и дешевы. Основой конструкции системы «Стабонза» является полиэтиленовый трубопровод, упрочненный и проложенный совместно со стальным канатом с одного берега на противоположный берег реки ниже по течению от подводного перехода.

Один конец полиэтиленового трубопровода открыт, то есть сообщается с водной массой реки, другой конец закрыт и снабжен отводом для присоединения к шлангу воздушно-вакуумного насоса (компрессора).

Во внутренней полости трубопровода находятся несколько шаров или поршень из эластичного материала (полиуретан, резина), плотно прилегающих к внутренней стенке полиэтиленового трубопровода и полностью перекрывающих его поперечное сечение. Для задержания разлившегося на поверхности реки продукта трубопровод по всей длине снабжен тремя рядами линейных гребнеобразных эластичных элементов, устанавливаемых по схеме – два сверху, один снизу (рис. 1).

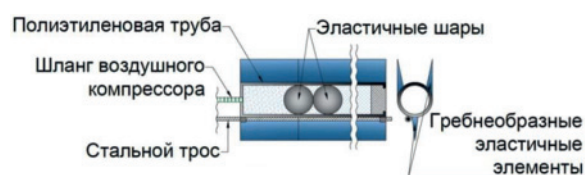


Рис. 1. Конструкция бонового заграждения

Fig. 1. Construction of the boom

Основные характеристики:

- высота надводной части 10...30 см;
- высота подводной части 25...50 см;
- предельное усилие на разрыв 2...15 т.

Большие интервалы значений позволяют эффективно использовать боны в широком диапазоне условий эксплуатации, рассчитывая и закладывая эти параметры в конструкцию заграждения в каждом случае индивидуально.

Заграждение монтируется стационарно и удерживается береговыми якорями. Якоря состоят из коромысел на треугольных опорах (рис. 2), закреплённых на железобетонных основаниях на обоих берегах реки.

Коромысла якорей левого и правого берегов соединены между собой стальным канатом, на котором закрепляется полиэтиленовая труба бона. Конец коромысла, к которому закреплён канат, имеет возможность изменять своё положение по высоте в опоре в широком диапазоне в соответствии с сезонными колебаниями уровня воды в реке.

В случаях перекрытия боновым заграждением протяженных водных препятствий и/или при на-

линии быстрых течений полиэтиленовый трубопровод совместно со стальным канатом может испытывать сильное гидродинамическое воздействие воды и, как следствие, значительно прогибаться в горизонтальной плоскости [18–20]. Если расчеты показывают, что удерживаемый за оба конца участок бонового заграждения не выдерживает условия прочности или жесткости, то дополнительно предусматриваются промежуточные оттяжки (рис. 3).

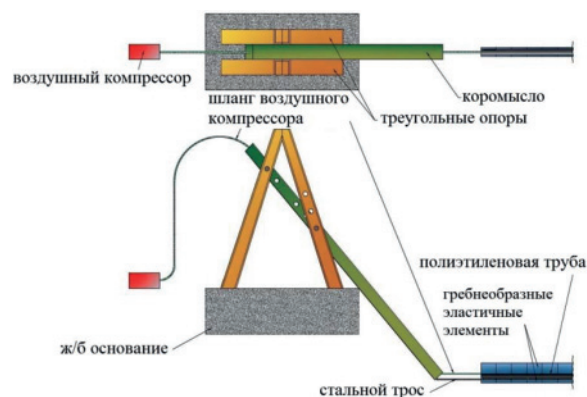


Рис. 2. Береговые якоря системы

Fig. 2. Coastal anchors of the system



Рис. 3. Схема установки бонового заграждения с одной оттяжкой (вариант нагружения бонового заграждения распределенной нагрузкой $q=q_{\max}$ при $\alpha=90^\circ$)

Fig. 3. Scheme of installation of a boom with one brace (option of loading a boom with distributed load $q=q_{\max}$ at $\alpha=90^\circ$)

Уточнение параметров расчета установки бонового заграждения в рабочее положение

Боновые заграждения максимально эффективно задерживают продукты утечки в тех случаях, если они установлены перпендикулярно к направлению руслового потока реки, что подтверждается результатами исследований [21]. При данной схеме монтажа силовой элемент заграждения испытывает на себе максимальное растягивающее усилие, которое убывает по мере уменьшения угла установки бона к направлению течения. Следовательно, вариант установки заградительной конструкции на рис. 3 представляет собой один из наиболее опасных случаев её нагружения. Соответствующая расчетная схема – крепление одной промежуточной оттяжкой – приведена на рис. 4.

На рис. 4: q – гидродинамическое воздействие течения реки; α – угол фиксации боновых заграж-

дений – угол между боновым заграждением и динамической осью потока реки; R_0 – реакция опоры (оттяжки); R_a, R_b – реакции крайней левой и крайней правой опор (береговых якорных систем); l – расстояние между опорами.

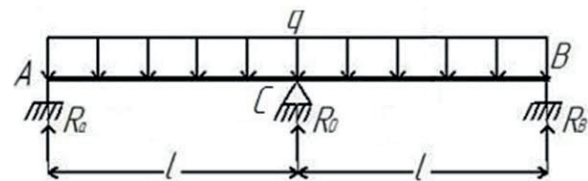


Рис. 4. Расчетная схема

Fig. 4. Calculation scheme

Для оценки допустимого отклонения от створа перехода необходимо знать значение максимального прогиба бонового заграждения в направлении течения реки.

Определим значения реакции опор. Для этого запишем прогиб от распределенной нагрузки q в отсутствии опоры C, далее снимем нагрузку q и запишем прогиб от единичной силы, приложенной в месте, где возникает реакция R_0 в опоре C. Получим:

$$y_q = \frac{5}{384} \cdot \frac{q(2l)^4}{EI};$$

$$y_{R_0} = \frac{R_0 l^3}{6EI}.$$

Ввиду того, что прогиб в месте возникновения реакции R_0 отсутствует, справедливо равенство:

$$\frac{5}{384} \cdot \frac{q(2l)^4}{EI} = \frac{R_0 l^3}{6EI},$$

откуда следует, что $R_0 = 1,25ql$.

Тогда значения реакций в двух крайних опорах:

$$R_a = R_b = \frac{2ql - R_0}{2} = \frac{2ql - 1,25ql}{2} = 0,375ql.$$

Получаем расчетную схему, представленную на рис. 5.

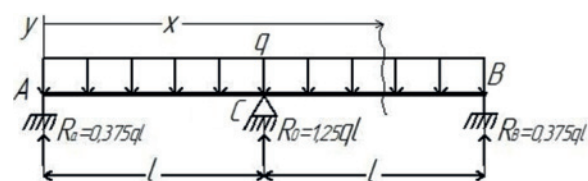


Рис. 5. Схема со значениями реакций опор

Fig. 5. Scheme with the values of the reactions of the supports

В задаче необходимо определить максимальный прогиб полиэтиленового трубопровода. Для этого рассмотрим сечение в правом пролете.

Момент в сечении x равен:

$$M_x = R_a x + R_0 (x - l) - \frac{qx^2}{2}.$$

Приближенное дифференциальное уравнение упругой линии имеет вид:

$$M_x = EI \frac{d^2 y}{dx^2}.$$

Интегрируя обе части этого уравнения получаем:

$$y_x = y_0 + \theta_0 x + \frac{1}{EI} \left(\frac{R_a x^3}{6} + \frac{R_0 (x-l)^3}{6} - \frac{qx^4}{24} \right), \quad (1)$$

где θ_0 – угол поворота крайнего правого сечения.

По краям балки и по середине прогиба равны 0, значит $y_{2l} = 0$ при $x = 2l$.

$$y_{2l} = \theta_0 2l + \frac{1}{EI} \left(\frac{3}{8} ql \frac{(2l)^3}{6} + \frac{5}{4} ql \frac{(2l-l)^3}{6} - \frac{q(2l)^4}{24} \right) = 0.$$

Отсюда, угол поворота крайнего правого и, ввиду симметрии, крайнего левого сечения равен:

$$\theta_0 = -\frac{ql^3}{48EI}. \quad (2)$$

Найдем прогиб в середине левого пролета, при :

$$y_{0,5l} = \theta_0 0,5l + \frac{1}{EI} \left(\frac{3}{8} ql \frac{(0,5l)^3}{6} - \frac{q(0,5l)^4}{24} \right). \quad (3)$$

Подставляя (2) в (3), получаем:

$$y_{0,5l} = -\frac{ql^3}{48EI} 0,5l + \frac{ql^4}{EI} \left(\frac{3}{8} \frac{0,5^3}{6} - \frac{0,5^4}{24} \right);$$

$$y_{0,5l} = -\frac{2ql^4}{384EI}.$$

Поскольку полиэтиленовый трубопровод в месте удержания оттяжкой имеет нулевой угол поворота, то прогиб не будет максимальным в середине пролета, при $x = 0,5l$. Далее найдем максимальный прогиб трубопровода. Для этого необходимо найти производную от y .

На основании выражения (1) находим производную y' :

$$y' = \theta_0 + \frac{1}{EI} \left(\frac{3R_a x^2}{6} + \frac{3R_0 (x-l)^2}{6} - \frac{4qx^3}{24} \right);$$

$$y' = -\frac{ql^3}{48EI} + \frac{1}{EI} \left(\frac{3qlx^2}{16} + \frac{5ql(x-l)^2}{8} - \frac{qx^3}{6} \right). \quad (4)$$

Исходя из условия $y = \max$, если $y' = 0$, выражение (4) примет вид:

$$8x^3 - 39x^2l + 60xl^2 - 29l^3 = 0.$$

Уравнение имеет три решения: $x = l$, $x = 1,578l$, $x = 2,297l$. При $x = l$ и $x = 2,297l$ прогиб минимален, при $x = 1,578l$ прогиб максимален. Для окончательного решения задачи найдем $y_{1,578l}$.

$$y_{1,578l} = \theta_0 1,578l + \frac{1}{EI} \left(\frac{3}{8} ql \frac{(1,578l)^3}{6} + \frac{5}{4} ql \frac{(1,578l-l)^3}{6} - \frac{q(1,578l)^4}{24} \right);$$

$$y_{1,578l} = -\frac{2,08ql^4}{384EI}.$$

Аналогичным образом решаются задачи, если количество промежуточных оттяжек отлично от единицы и/или $\alpha \neq 90^\circ$.

Работа системы «Стабонза»

Работа системы «Стабонза» основана на регулировке плавучести бонового заграждения путем заполнения его внутренней полости воздухом или водой. В нерабочем состоянии конструкция заграждения находится на дне в затопленном состоянии. Для приведения бонового заграждения в рабочее положение, то есть его всплытия, необходимо вывести воду из полости полиэтиленового трубопровода, для чего в него компрессором или из другого источника, например стационарного ресивера, закачивается воздух, который с помощью эластичных плотно сидящих шаров или поршня вытесняет воду в водоем через негерметичный торец противоположного конца трубопровода. Система поднимается на поверхность и локализует продукт разлива по принципу обычных боновых заграждений (рис. 6).

Наиболее ответственные участки можно оснастить системой автоматизации, позволяющей по сигналу с диспетчерской приводить систему в рабочее положение, таким образом, сократив время реагирования на факт обнаружения утечки.

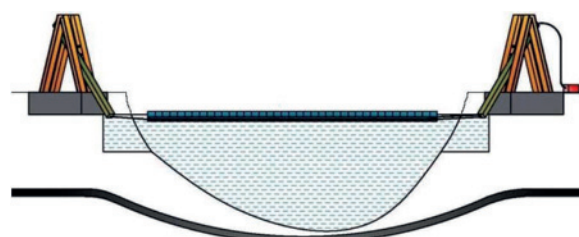


Рис. 6. Система «Стабонза» в рабочем положении

Fig. 6. System «Stabonza» in working position

Перевод системы «Стабонза» в нерабочее положение осуществляется благодаря откачке воздуха из внутренней полости полиэтиленового трубопровода вакуумным насосом. В результате этого вода через фильтрующий элемент в негерметичном противоположном конце трубы начинает заполнять трубопровод, и система постепенно опускается на дно реки. При этом герметизирующие эластичные шары внутри трубопровода перемещаются в сторону насоса.

При необходимости заграждение снабжается пригрузами (балластными элементами).

Осенью, до покрытия поверхности водоема плотным льдом, боновое заграждение предварительно опускается на дно реки. С наступлением устойчивых заморозков и при окончательном ледоставе заграждение вновь поднимается на поверхность и плотно прижимается ко льду или продолжает находиться, как и прежде, на дне водоема

в нерабочем положении. Возможные перепады по толщине льда компенсируются способностью полиэтиленового трубопровода подвергаться значительным изгибам, а отрицательный эффект, создаваемый мелкой бугристой ледяной поверхностью, учитывается работой эластичных элементов верхних гребней заградительной линии. Таким образом, разработанная система практически сводит к нулю возможность растекания нефти подо льдом (рис. 7).

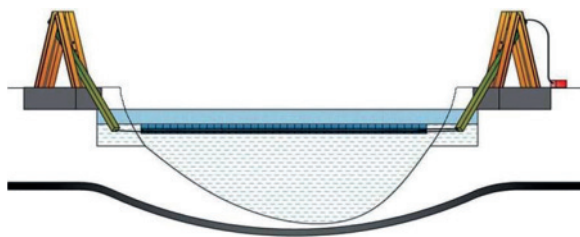


Рис. 7. Система «Стабонза» в рабочем положении в период ледостава

Fig. 7. System «Stabonza» in working position during the freeze-up period

Весной для предотвращения разрушения во время ледохода заграждение необходимо затопить. На случай примерзания гребней ко льду предусмотрен их обогрев с помощью пара или горячей воды, пропускаемых по специальному шлангу, проложенному между верхними гребнями.

Приведение системы в рабочее положение возможно оператором с берега, диспетчером дистанционно или автоматически по сигналу об утечке.

Для локализации и сбора вытекающей нефти на берегу рядом с одним из якорей (расположенного ниже по течению) сооружается залив, размеры которого определяются расчётным путём, в зависимости от параметров трубопровода.

Продукт утечки скапливается в заливе, откуда его откачивают при помощи передвижных насосных агрегатов в автоцистерны (рис. 8).

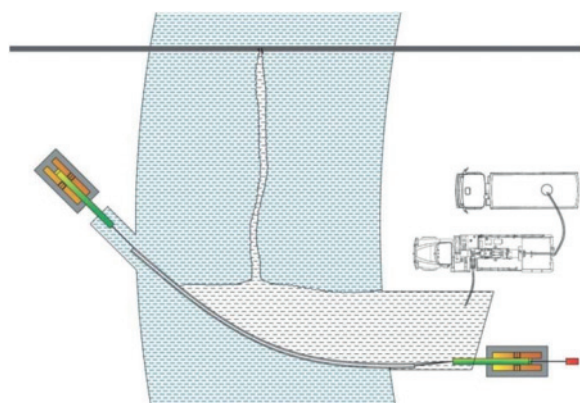


Рис. 8. Сбор продукта и откачка в автоцистерны

Fig. 8. Collecting the product and pumping into tankers

При необходимости, в отсутствии судоходства или в период ледостава, система может находиться в рабочем состоянии постоянно.

Конкретное место установки системы «Стабонза» определяется индивидуально, в зависимости от ширины и глубины реки, рельефа береговой линии.

Не менее важными факторами, определяющими и ограничивающими условия эксплуатации бонового заграждения, также являются [21]:

- скорость течения, при которой конструкция системы сохраняет устойчивость, до 0,6 м/с;
- скорость ветра, до 10 м/с;
- высота волн, до 1,25 м.

Существенное влияние на эффективность работы боновых заграждений оказывает время реагирования. От того, насколько оперативно будут осуществлены все действия, зависят масштабы и последствия аварии при разливе продукта транспортировки.

Время реагирования складывается из:

- времени на обработку информации о выходе продукта на поверхность;
- времени на подготовку аварийной бригады и погрузку оборудования;
- времени следования к месту назначения;
- разворачивания и установки оборудования [21].

К настоящему моменту на балансе ПАО «Транснефть» в основном числятся переносные боновые заграждения, разворачиваемые и устанавливаемые на акватории рек при разливе нефти непосредственно на месте. Время приведения в рабочее положение подобных бонов, при самых скромных подсчетах, составляет порядка полутора часов (85–90 мин) [22]. Тогда как время реагирования системы «Стабонза», если заграждение находится на дне реки в нерабочем положении, складывается из времени на обработку диспетчером информации о разливе продукта перекачки и времени подъема бона на поверхность водоема, которое определяется только производительностью компрессора. Указанные действия могут быть выполнены в течение 10–20 мин.

Система «Стабонза-Шельф»

На таком же принципе устроена конструкция системы «Стабонза-Шельф», адаптированная для применения на морских нефтяных платформах [23]. Основой конструкции системы «Стабонза-Шельф» также является полиэтиленовый трубопровод, проложенный вдоль стального каната замкнутым (а при необходимости, в определённых случаях – разомкнутым) кольцом вокруг морской платформы (рис. 9).

Кольцо из полиэтиленового трубопровода разбито перегородками на несколько секторов. Это необходимо для равномерности и увеличения скорости подъёма/опускания системы. Каждый сектор трубопровода в одном из своих концов негерметичен, то есть сообщается с водной массой моря, другой конец герметичен и снабжён отводом для присоединения к шлангу воздушно-вакуумного насоса (компрессора).

Заграждение монтируется стационарно и удерживается системой тросов и жесткого металличе-

ского каркаса, смонтированного концентрично на опорах платформы. Каркас изготовлен из уголков или труб и служит для общей центрации заграждения вокруг платформы. Тросы обеспечивают гибкую связь боновых заграждений с каркасом, необходимую для возможности повторения заграждениями контура крупных волн. Более мелкие волнения компенсируются гребнеобразными элементами заграждений.

Основные характеристики заградительной линии:

- высота надводной части, 50...80 см;
- высота подводной части, 100 и более см;
- предельное усилие на разрыв, 15...30 т.

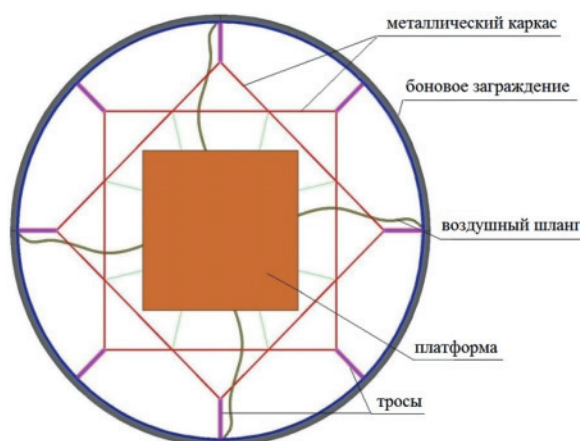


Рис. 9. Система стационарного всесезонного бонового заграждения с переменной плавучестью «Стабонза-Шельф» (в плане)

Fig. 9. System of the all-season stationary boom of variable buoyancy «Stabonza-Shelf» (top view)

В нерабочем положении боновое заграждение находится на определенной глубине в затопленном состоянии, необходимой для свободного прохода к морской платформе танкеров и судов обслуживания. При заполнении полиэтиленового трубопровода воздухом система поднимается на поверхность моря и локализует разливающийся продукт

по принципу обычных боновых заграждений (рис. 10).

Система не теряет работоспособности и при наступлении ледостава. При всплытии боновое заграждение плотно прилегает к поверхности льда. Возможные изменения по толщине льда компенсируются гибкостью и податливостью полиэтиленовой трубы, а мелкие неровности нижней поверхности льда перекрываются эластичными элементами верхних гребней заградительной линии. Таким образом, система снижает вероятность распространения нефти подо льдом практически до нуля.

Приведение системы в рабочее положение возможно оператором с платформы, диспетчером дистанционно или автоматически по сигналу об утечке.

Продукт утечки скапливается внутри замкнутого кольца бонового заграждения, откуда его откачивают при помощи насосных агрегатов в ёмкости на платформе или в танкера.

Диаметр кольца бонового заграждения определяется индивидуально, в зависимости от размеров самой платформы, от скорости морских течений, направления и скорости преобладающих ветров, глубины моря и прочих факторов.

Заключение

Сравнение системы боновых заграждений «Стабонза» и «Стабонза-Шельф» с существующими на рынке аналогами позволяет сделать вывод о том, что представленные авторами устройства выгодно отличаются от последних ввиду ряда характерных для них преимуществ [24, 25]:

- оперативность развёртывания или приведения в рабочее положение системы, которая определяется только производительностью компрессора, а при затоплении не требуются плавсредства для стравливания воздуха из каждой отдельной секции через клапана;
- прочность, обеспечиваемая толщиной стенок трубопровода;
- долговечность и надёжность за счёт цельности поплавкового элемента – полиэтиленовой тру-

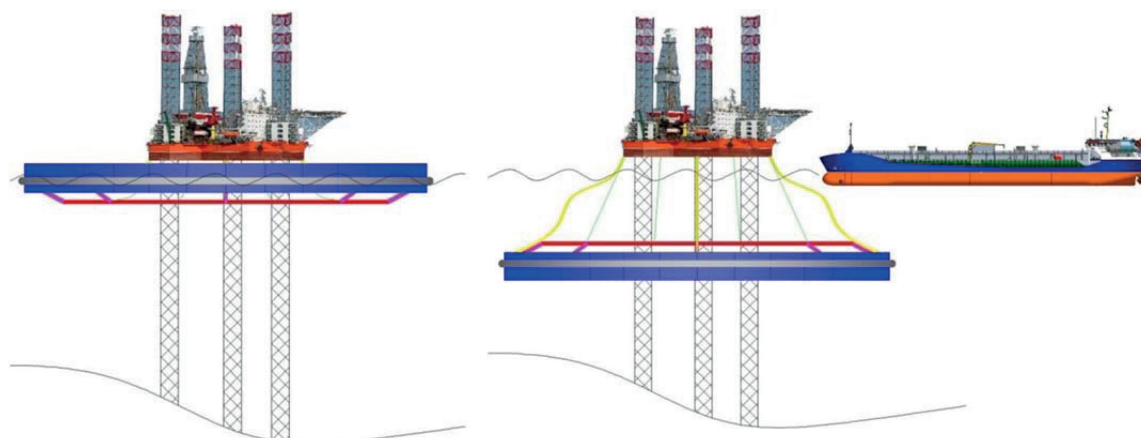


Рис. 10. Система «Стабонза-Шельф» в рабочем положении и в положении ожидания

Fig. 10. «Stabonza-Shelf» system in working position and in waiting position

бы по всей длине бонового заграждения, отсюда отсутствие соединительных элементов, снижающих эффективность заграждения и удорожающих его стоимость;

- возможность всесезонного использования системы, даже при наличии ледяного покрова;
- устойчивость заграждения к динамическим нагрузкам от ветра и течения реки благодаря высокой жёсткости несущей конструкции каркаса (полиэтиленового трубопровода) по сравнению с мягкими надувными бонами-занавесами, склонными к постоянному перекручиванию или складыванию. Кроме того, для формирования защитной заградительной

линии принятое конструктивное решение позволяет системе во многих ситуациях обходиться без использования дополнительных промежуточных цепных оттяжек и донных якорей.

Простота систем «Стабонза» и «Стабонза-Шельф» обеспечивает их высокую надёжность в любое время года и при любых погодных условиях, быстрота приведения их в рабочее положение – снижение эколого-экономического ущерба от разливов нефти и нефтепродуктов, а сравнительно недорогая стоимость материалов и комплектующих данных систем делает возможным их широкое внедрение на производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проект отчета о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2016 году. URL: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения 28.12.2017).
2. Калмацкий М. Водолаз форсирует Таз // Издание «Российская Газета». – 2015. – спецвыпуск № 6855(284). – С. 9–12.
3. National Research Council. Spills of Nonfloating Oils, Risk and Response. – Washington, D.C.: National Academy Press, 1999. – 88 p.
4. Michael B., William T. Availability and Capabilities of «Ohmsett»: the National Oil Spill Response Test Facility // Oil Spill Response, Research, Regulations, and Drills: Proc. Eighteenth Annual Gulf of Mexico Information Transfer Meeting. – New Orleans, Louisiana: University of New Orleans, 2000. – P. 19–26.
5. Игнатьев В.Б. Государственное и муниципальное управление и регулирование в транспортной системе. – Иркутск: БГУЭП, 2003. – 418 с.
6. Рекомендации по оценке работоспособности подводных переходов газопроводов при наличии размывов дна / В.В. Харионовский, В.П. Радин, С.С. Фесенко, И.А. Саликов, А.Н. Шилин. – М.: ВНИИСТ, 1995. – 39 с.
7. Султанмагомедов С.М., Хасанов Р.Р. Напряженно-деформированное состояние и обеспечение надежности тройников подземных трубопроводов. – Уфа: УГНТУ, 2013. – 100 с.
8. Безопасность пересечений трубопроводами водных преград / К.А. Забела, В.А. Красков, В.М. Москвич, А.Е. Соценко. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2001. – 195 с.
9. Комплексное компенсирующее устройство трубопровода: пат. РФ № 111240; заявл. 04.04.2011; опубл. 10.12.2011, Бюл. № 34. – 9 с.
10. Стабилизатор механических напряжений: пат. РФ № 96212; заявл. 04.03.2010; опубл. 20.07.2010, Бюл. № 20. – 8 с.
11. Robinson S.M., Barbaros C., Steen R. Development of a Rapid Current Containment Boom: Phase III, Year 2. – Durham: Jere Chase Ocean Engineering Center University of New Hampshire, 1999. – 82 p.
12. API. 2013. Remote Sensing in Support of Oil Spill Response. API Technical Report 1144. – NW, Washington: API Publishing Services, 2013. – 80 p.
13. Method and a system for removal of oil under ice: patent US № 20160186399 A1; declared 05.08.2014; publ. 30.06.2016. PCT no.: PCT/FI2014/050607. – 5 p.
14. Устройство для локализации и сбора нефти и нефтепродуктов с поверхности воды: пат. РФ № 2617292; заявл. 26.04.2016; опубл. 24.04.2017, Бюл. № 12. – 15 с.
15. Circumpolar Oil Spill Response Viability Analysis: Technical Report. URL: <https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/2017-circumpolar-oil-spill-response-viability-analysis.pdf> (дата обращения 28.12.2017).
16. Мальцева Т.А., Попова О.В. Боновые заграждения как эффективное средство ликвидации нефтяных разливов // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». – 2016. – № 4. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3805> (дата обращения 28.12.2017).
17. Боновое заграждение переменной плавучести: пат. РФ № 2599560; заявл. 20.07.2015; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 28. – 9 с.
18. Hansen K., Coe T.J. Oil Spill Response in Fast Currents – a Field Guide. – Groton, CT: USCG Research & Development Center, 2001. – 121 p.
19. Coe T., Gurr B. Control of Oil Spills in Fast Water Currents, a Technology Assessment (CG-D-18-99). – Groton, CT: USCG Research & Development Center, 1999. – 134 p.
20. David D., Kathleen N., Hansen K. Evaluation of Four Oil Spill Recovery Systems in Fast Water Conditions at Ohmsett (CG-D-18-99). – Groton, CT: USCG Research & Development Center, 2000 – 113 p.
21. Оценка эффективности средств для ликвидации аварийных разливов нефти при пересечении магистральными трубопроводами водных преград / Р.Х. Идрисов, К.Р. Идрисова, Р.С. Резбаева, М.Г. Беспалов // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. – 2014. – № 2. URL: http://ogbus.ru/authors/IdrisovRH/IdrisovRH_1.pdf (дата обращения 28.12.2017).
22. Рамазанов Д.С. Оценка эффективности боновых заграждений для ликвидации аварийных разливов нефти при пересечении магистральным трубопроводом водных преград // Проблемы геологии и освоения недр: труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – Т.2. – С. 1072–1074.
23. 2016 Update of Occurrence Rates for Offshore Oil Spills. URL: <https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/osrr-oil-spill-response-research/1086aa.pdf> (дата обращения 28.12.2017).
24. Боновое заграждение переменной плавучести: пат. РФ № 2221109; заявл. 06.05.2002; опубл. 10.01.2004, Бюл. № 1. – 12 с.
25. Стационарное боновое заграждение переменной плавучести: пат. РФ № 2232226; заявл. 30.01.2003; опубл. 10.07.2004, Бюл. № 19. – 8 с.

Поступила 09.01.2018 г.

Информация об авторах

Султанмагомедов С.М., доктор технических наук, профессор кафедры сооружения и ремонта газонефтепроводов и газонефтехранилищ, декан факультета трубопроводного транспорта Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Кунафин Р.Н., директор самостоятельного структурного подразделения Уфимского государственного нефтяного технического университета «Центр сервиса трубопроводных систем».

Султанмагомедов Т.С., магистрант кафедры транспорта и хранения нефти и газа Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Хасанов Р.Р., кандидат технических наук, доцент кафедры сооружения и ремонта газонефтепроводов и газонефтехранилищ Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Кантемиров И.Ф., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сооружения и ремонта газонефтепроводов и газонефтехранилищ Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 627.372

THE STATIONARY ALL-WEATHER BOOMS SYSTEM WITH VARIABLE FLOATABILITY – «STABONZA» AND «STABONZA-SHELF»

Sultanmagomed M. Sultanmagomedov¹,
ftt2010@mail.ru

Robert N. Kunafin²,
kunafin@outlook.com

Timur S. Sultanmagomedov¹,
ftt65@mail.ru

Rustyam R. Khasanov¹,
hasanov25@mail.ru

Igor F. Kantemirov¹,
ikant@mail.ru

¹ Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

² Ufa State Petroleum Technological University,
8/3, Koltsevaya street, Ufa, 450062, Russia.

The relevance of the study is conditioned by the need of maintaining and upholding environmental standards and requirements in the field of trunk line transport, particularly at water services facilities. Currently used devices for containment and collection of spill products in water surfaces of rivers in case of accidents on underwater lines have a number of drawbacks: beginning with failures in the operation of booms, often caused by imperfections in the design (leakage, gliding of the product), and ending with the application limit due to seasonal changes (not only the state of surface water bodies, but also physical properties, characteristics of oil and petroleum products). In light of this, it is extremely important to improve the devices used and develop new boom systems. Furthermore, to achieve a greater effect, it is necessary to constantly improve the methods of calculating the parameters of the installation and the operation of such devices in the waters.

The aim of research is: to present to broad public a new design of stationary all-weather booms with variable floatability – «Stabonza» and «Stabonza-Shelf», intended for prompt liquidation of the consequences of oil and petroleum products spills in underwater lines, production platforms and offload sea terminals. Additionally, to adjust the calculation parameters for setting the boom system to the set position.

Methods. Methods of building mechanics (material resistance): integration technique of the differential equation of the curved beam axis in order to determine deflections and angles of rotation is used in the research.

Results. The design and operation principle of the developed stationary all-weather booms with variable floatability – «Stabonza» and «Stabonza-Shelf», which are fundamentally different from those that exist today with high reliability and durability due to the integrity of the main elements, low cost of components and materials, and, first of all, deploying and bringing the system to its original planned state. The parameters of calculating the installation of boom barriers in the set position are modified. In existing techniques, it is assumed that in the places where the booms are fastened with intermediate drafts (in cases of necessity), the rotation angle of the force element of the barrier construction – a rigid polyethylene pipeline – is different from zero, which is not true to the fact. As a result of adjusting the circuit and refining the calculation parameters, it was found that the maximum deflection of the polyethylene pipeline falls not at the middle of the span l , but at the cross section $x = 1,58l$, while the deflection value is 17 % smaller than previously obtained by other authors.

Key words:

Trunk line, depressurization, boom of variable floatability, full strength, deflection, guy line, shelf.

REFERENCES

1. *Proekt otcheta o deyatelnosti Federalnoy sluzhbi po ekologicheskoy, tekhnologicheskoy i atomnomu nadzoru v 2016 godu* [Draft report on the activities of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision in 2016]. Available at: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (accessed 28 December 2017).
2. Kalmatskiy M. Vodolaz forsiruets Taz [Diver forcing Taz]. *Rossiyskaya Gazeta*, 2015, no. 6855(284), pp. 9–12.
3. *National Research Council. Spills of Nonfloating Oils, Risk and Response*. Washington, D.C., National Academy Press Publ., 1999. 88 p.
4. Michael B., William T. Availability and Capabilities of «Ohmsett»: the National Oil Spill Response Test Facility. *Oil Spill Response, Research, Regulations, and Drills. Proceedings: Eighteenth Annual Gulf of Mexico Information Transfer Meeting*, 2000, pp. 19–26.
5. Ignatev V.B. *Gosudarstvennoe i munitsipalnoe upravlenie i regulirovanie v transportnoy sisteme* [State and municipal management and regulation in the transport system]. Irkutsk, BSUEL Publ., 2003. 418 p.
6. Kharionovskii V.V., Radin V.P., Fesenko S.S., Salikov I.A., Shilin A.N. *Rekomendatsii po otsenke rabotosposobnosti podvodnykh perehodov gazoprovodov pri nalichii razmyivov dna* [Recommendations for assessing the operability of underwater crossings of gas pipelines in the presence of seabed erosion].

- dations for assessing the performance of underwater crossings of gas pipelines in the presence of erosion of the bottom]. Moscow, VNIIST Publ., 1995. 39 p.
7. Sultanmagomedov S.M., Khasanov R.R. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie i obespechenie nadezhnosti troynikov podzemnykh truboprovodov* [Stress-strain state and reliability of tees of underground pipelines]. Ufa, USPTU Publ., 2013. 100 p.
 8. Zabela K.A., Kraskov V.A., Moskvich V.M., Soschenko A.E. *Bezopasnost peresecheniy truboprovodami vodnykh pregrad* [Safety of pipeline crossings of water barriers]. Moscow, Nedra-Biznestsentr Publ., 2001. 195 p.
 9. Sultanmagomedov S.M., Khasanov R.R., Shammazov A.M., Mustafa F.M., Yanyishev R.S. *Kompleksnoe kompensiruyushchee ustroystvo truboprovoda* [Comprehensive piping compensating device]. Patent RF, no. 111240, 2011.
 10. Sultanmagomedov S.M., Khasanov R.R., Shammazov A.M., Mustafa F.M. *Stabilizator mekhanicheskikh napryazheniy* [Stabilizer of mechanical stresses]. Patent RF, no. 96212, 2010.
 11. Robinson S.M., Barbaros C., Steen R. *Development of a Rapid Current Containment Boom: Phase III, Year 2*. Durham, Jere Chase Ocean Engineering Center University of New Hampshire, 1999. 82 p.
 12. API. 2013. *Remote Sensing in Support of Oil Spill Response. API Technical Report 1144*. NW, Washington, API Publishing Services Publ., 2013. 80 p.
 13. Muhonen J. *Method and a system for removal of oil under ice*. Patent US, no. 20160186399 A1, 2016.
 14. Mazhayskiy Yu.A., Prokofev M.I., Golubenko M.I. *Ustroystvo dlya lokalizatsii i sbora nefti i nefteproduktov s poverkhnosti vody* [Device for localization and collection of oil and oil products from watersurface]. Patent RF, no. 2617292, 2017.
 15. *Circumpolar Oil Spill Response Viability Analysis: Technical Report*. Available at: <https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/2017-circumpolar-oil-spill-response-viability-analysis.pdf> (accessed 28 December 2017).
 16. Maltseva T.A., Popova O.V. Boom barriers as an effective means for liquidating oil spills. *Electronic scientific journal «Inzhenernyy vestnik Dona»*, 2016, no. 4. In Rus. Available at: <http://iv-don.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3805> (accessed 28 December 2017).
 17. Kunafin R.N., Kunafin T.R. *Bonovoe zagrajdenie peremennoy plavuchesti* [Boom barrier of variable buoyancy]. Patent RF, no. 2599560, 2016.
 18. Hansen K., Coe T.J. *Oil Spill Response in Fast Currents – a Field Guide*. Groton, CT, USCG Research & Development Center Publ., 2001. 121 p.
 19. Coe T., Gurr B. *Control of Oil Spills in Fast Water Currents, A Technology Assessment (CG-D-18-99)*. Groton, CT, USCG Research & Development Center Publ., 1999. 134 p.
 20. David D., Kathleen N., Hansen K. *Evaluation of Four Oil Spill Recovery Systems in Fast Water Conditions at Ohmsett (CG-D-18-99)*. Groton, CT, USCG Research & Development Center Publ., 2000. 113 p.
 21. Idrisov R.H., Idrisova K.R., Rezbaeva R.S., Bespalov M.G. Assessment of the effectiveness of oil spill response equipment when crossing main water pipelines with water barriers. *Neftegazovoe delo: elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, no. 2. In Rus. Available at: http://ogbus.ru/authors/IdrisovRH/IdrisovRH_1.pdf (accessed 28 December 2017).
 22. Ramazanov D.S. Otsenka effektivnosti bonovykh zagrazhdeniy dlya likvidatsii avariynykh razlivov nefti pri peresechenii magistralnykh truboprovodov vodnykh pregrad [Assessment of the efficiency of booms for liquidation of oil spills when the main pipeline crosses water barriers]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr: trudy XX Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyaschennogo 120-letiyu so dnya osnovaniya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Problems of geology and subsurface exploration: the works of the XX International Symposium named after Academician M.A. Usov of students and young scientists dedicated to the 120th anniversary of the foundation of Tomsk Polytechnic University]. Tomsk, TPU Publ., 2016. Vol. II, pp. 1072–1074.
 23. *2016 Update of Occurrence Rates for Offshore Oil Spills*. Available at: <https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/osrr-oil-spill-response-research/1086aa.pdf> (accessed 28 December 2017).
 24. Levagin V.M. *Bonovoe zagrazhdenie peremennoy plavuchesti* [Boom barrier of variable buoyancy]. Patent RF, no. 2221109, 2004.
 25. Levagin V.M., Levagin D.V. *Statsionarnoe bonovoe zagrazhdenie peremennoy plavuchesti* [A stationary boom of variable buoyancy]. Patent RF, no. 2232226, 2004.

Received: 9 January 2018.

Information about the authors

Sultanmagomed M. Sultanmagomedov, Dr. Sc., professor, Dean of the Faculty, Ufa State Petroleum Technological University.

Robert N. Kunafin, chief of the stand-alone business unit «Service Center for Pipeline Systems», Ufa State Petroleum Technological University.

Timur S. Sultanmagomedov, master's degree student, Ufa State Petroleum Technological University.

Rustyam R. Khasanov, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Igor F. Kantemirov, Dr. Sc., professor, head of the Department, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 62–83:621.313

О ПРОБЛЕМЕ ПЕРЕГРЕВА ОБМОТКИ РОТОРА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ПУСКОВЫХ РЕЖИМАХ ВЫСОКОИНЕРЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ И ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Зюзов Анатолий Михайлович¹,
a.m.zyuzev@urfu.ru

Метельков Владимир Павлович²,
v.p.metelkov@urfu.ru

¹ Уральский федеральный университет,
Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности и снижения аварийности асинхронных электроприводов высокоинерционных механизмов нефтегазовой отрасли и горной промышленности, таких как насосы магистральных нефтепроводов, вентиляторные установки горнорудных предприятий и другие. При прямом пуске таких электроприводов, а также при пуске с использованием тиристорных преобразователей напряжения происходит значительный нагрев роторной обмотки, что приводит к негативным последствиям воздействия термомеханических эффектов с выходом электродвигателя из строя.

Цель исследования: выявить закономерности, связывающие параметры асинхронных двигателей с уровнем нагрева обмотки ротора и режимами запуска, а также выявить возможности влияния на нагрев ротора времени запуска, определяемого уставкой ограничения тока статора при пуске с использованием тиристорного преобразователя напряжения.

Объекты: электроприводы высокоинерционных механизмов нефтегазовой отрасли и горной промышленности с асинхронным двигателем, запускаемые при постоянной скорости вращения магнитного поля статора.

Методы: аналитические методы, а также моделирование с использованием термодинамических моделей асинхронного двигателя на основе тепловых схем с сосредоточенными параметрами.

Результаты. Аналитическим путем, а также с помощью компьютерного моделирования показано, что при увеличении габаритов электродвигателя (при прочих равных условиях) проблема перегрева роторной обмотки приобретает все большую актуальность. При увеличении числа полюсов двигателя (при одинаковой номинальной мощности, в случае, когда имеется возможность использовать передаточное число редуктора, соответствующее номинальной скорости двигателя и требуемой скорости механизма) нагрев роторной обмотки уменьшается. Также показано, что увеличением продолжительности пуска асинхронного двигателя за счет использования тиристорных преобразователей напряжения решить проблему перегрева обмотки ротора можно только при запуске на холостом ходу. В иных случаях увеличение продолжительности пуска либо не позволяет существенно снизить нагрев, либо ведет к увеличению нагрева. В этой ситуации использование тиристорных преобразователей напряжения имеет смысл только, если это предопределяется ограничениями, связанными с просадкой напряжения сети при пуске, а радикальным решением проблемы перегрева является использование преобразователя частоты.

Ключевые слова:

Насосные агрегаты магистральных нефтепроводов, шахтные вентиляторы, асинхронный двигатель, обмотка ротора, термодинамическая модель, тепловая схема с сосредоточенными параметрами, тиристорный преобразователь напряжения.

Введение

Электроприводы с двигателями переменного тока, имеющие очень большой момент инерции, широко распространены в нефтегазовой отрасли и различных областях горной промышленности. К ним относятся насосы магистральных нефтепроводов, вентиляторные установки горнорудных предприятий и другие. В частности, у приводов шахтных вентиляционных установок соотношение момента инерции вентилятора и электродвигателя составляет десятки раз, и как следствие, продолжительность пуска вентилятора с большим диаметром рабочего колеса может достигать несколько минут [1].

При прямом пуске асинхронного двигателя (АД) высокоинерционных электроприводов происходит сильный нагрев обмотки ротора, что объясняется длительным процессом разгона при больших токах в сочетании с влиянием вытеснения тока. Отметим, что аналогичный эффект может про-

являться и при запуске электроприводов с относительно небольшим моментом инерции, где требуется получить плавный разгон под нагрузкой, для чего используют устройства плавного пуска на основе тиристорных преобразователей напряжения (ТПН), которые обеспечивают управление процессом запуска при постоянной (номинальной) частоте. Примером могут служить асинхронные электроприводы длинных конвейеров [2, 3]. Такой же способ запуска используется и в приводах шахтных вентиляционных установок с осевыми вентиляторами [1]. В мощных высокоинерционных электроприводах с АД ТПН используются также и для ограничения просадки напряжения сети при пуске [4–7]. Такие устройства плавного пуска значительно дешевле, чем преобразователи частоты, однако их использование приводит к некоторым проблемам, в том числе связанным с обмоткой ротора АД.

При оценке теплового состояния АД часто концентрируют внимание на нагреве обмотки статора,

поскольку эта обмотка имеет изоляцию, а негативное влияние высоких температур на долговечность электрической изоляции хорошо известно [8, 9]. Поэтому предлагается большое количество устройств тепловой защиты для обмотки статора [10–15]. Тем не менее чрезмерное повышение температуры короткозамкнутой обмотки ротора также может приводить к её повреждению [16, 17]. Имеются данные, что температура обмотки ротора при пуске крупных АД может достигать 600 °C [18, 19]. Путем моделирования методом конечных элементов в сочетании с экспериментальными исследованиями показано, что термический фактор является одним из важнейших компонентов в механизме повреждения короткозамкнутой обмотки ротора АД [20]. Из-за влияния высокой температуры в АД со сварной обмоткой ротора возможно изгибание стержней обмотки с выходом их из пазов, что может приводить к повреждению лобовых частей обмотки статора и появлению трещин на короткозамыкающих кольцах [21]. В АД с литыми обмотками ротора появляются повреждения стержней роторной обмотки в пазах.

Приведенные выше факты говорят об актуальности исследования теплового состояния короткозамкнутых обмоток ротора АД в пусковых режимах для выяснения взаимосвязей нагрева этих обмоток с размерами и скоростью двигателя, а также с особенностями конструкции привода и организации процесса пуска.

Анализ влияния габаритов двигателя и номинальной скорости на температуру обмотки ротора при пуске

Вывод основных соотношений

В литературе отмечается, что повреждения обмотки ротора АД, связанные с перегревом, чаще проявляются у более крупных машин [17, 18]. Рассмотрим подробнее связь габаритов и мощности АД с повышением температуры обмотки ротора при пуске.

Повышение средней температуры элементов ротора $\Delta\theta_r$ в течение времени пуска (t_n) можно определить через разницу между выделившейся энергией ($W_{\Sigma r}$) и отданной в окружающую среду (W_{out}):

$$\Delta\theta_r = \frac{W_{\Sigma r} - W_{out}}{C_r}, \quad (1)$$

$$W_{\Sigma r} = \int_0^{t_n} \Delta P_r dt, \quad (2)$$

$$W_{out} = \int_0^{t_n} \sum_{k=1}^m (\theta_r - \theta_{ok}) \lambda_{r ok} dt. \quad (3)$$

В (2) и (3) обозначено: ΔP_r – мощность потерь в роторе; θ_r – температура ротора; θ_{ok} – температура k -й охлаждающей среды; m – количество охлаждающих сред; $\lambda_{r ok}$ – тепловая проводимость от ротора к k -й охлаждающей среде.

Величина $W_{\Sigma r}$ (помимо прочих составляющих) содержит компоненту, связанную с изменением кинетической энергии системы, а также компоненту, зависящую от преодолеваемого момента сопротивления. Соответственно, джоулевы потери (W_r), выделившиеся в обмотке ротора АД в течение времени разгона при постоянной скорости вращения поля статора (прямой пуск, пуск с использованием ТПН), могут быть представлены суммой двух слагаемых. Одно из них ($W_{rдин}$) определяется динамическим моментом, а второе (W_{rc}) – величиной момента сопротивления. Проанализируем связь между W_r и параметрами механической характеристики электропривода.

Если выразить момент двигателя из уравнения движения привода, можно получить выражение для энергии $W_r = W_{rдин} + W_{rc}$, выделившейся в роторной обмотке за время пуска [22]:

$$W_r = J_{\Sigma} \left(\omega_0 \int_{\omega_{нач}}^{\omega_{кон}} d\omega - \int_{\dot{\omega}_{нач}}^{\dot{\omega}_{кон}} \dot{\omega} d\dot{\omega} \right) + \int_0^{t_n} M_c (\omega_0 - \omega) dt, \quad (4)$$

где M_c – момент сопротивления на валу двигателя; J_{Σ} – приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции привода; ω_0 – скорость вращения поля статора; $\omega_{нач}$ и $\omega_{кон}$ – начальная и конечная скорости.

Из (4) можно получить (для $\omega_{нач}=0$):

$$W_{rдин} = J_{\Sigma} \left(\omega_0 \omega_{кон} - \frac{\omega_{кон}^2}{2} \right), \quad (5)$$

Для мощных АД значение $\omega_{кон}$ весьма близко к ω_0 , поэтому $W_{rдин}$ практически равно кинетической энергии (W_k), которая запасается во вращающихся элементах привода к концу разгона, соответственно, из (5) получим:

$$W_{rдин} \approx W_k = J_{\Sigma} \frac{\omega_{кон}^2}{2}. \quad (6)$$

С целью получения выражения для W_{rc} представим соотношение, связывающее момент сопротивления со скоростью как

$$M_c = M_{c0} + M_{свN} \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^m, \quad (7)$$

где ω_N – номинальная скорость двигателя; M_{c0} – постоянная составляющая момента сопротивления; $M_{свN}$ – переменная составляющая момента сопротивления при номинальной скорости.

Получить зависимости скорости от времени при пуске АД весьма непросто. Это объясняется индивидуальными особенностями механических характеристик различных АД, а также проблемой учета эффекта вытеснения тока. Как показывает моделирование процессов пуска подобных приводов, зависимость скорости от времени может быть приближенно аппроксимирована степенной функцией, поэтому используем далее следующее выражение:

$$\omega = a_{\omega} t^n, \quad (8)$$

где a_ω – постоянный коэффициент, а величина n находится между 1 и 2...3.

Тогда (7) можно представить в виде

$$M_c = M_{c0} + M_{cbN} \left(\frac{a_\omega}{\omega_N} \right)^m t^{nm}. \quad (9)$$

Из (4) с учетом (7)–(9) получим следующее выражение:

$$W_{rc} = \omega_0 M_{c0} t_n + \dot{\omega}_0 M_{cbN} \left(\frac{a_\omega}{\omega_N} \right)^m \frac{t_n^{nm+1}}{nm+1} - \frac{M_{c0} a_\omega t_n^{n+1}}{n+1} - \frac{M_{cbN} a_\omega^{m+1} t_n^{nm+n+1}}{\omega_N^m (nm+n+1)}. \quad (10)$$

Для мощных двигателей, где ω_N близка к ω_0 , можно без большой погрешности записать (10) как

$$W_{rc} = n \left[\frac{M_{c0}}{n+1} + \frac{M_{cbN}}{(nm+n+1)(nm+1)} \right] \omega_N t_n. \quad (11)$$

Как видно из (11), энергия, затрачиваемая на преодоление момента сопротивления, возрастает с увеличением времени пуска и номинальной скорости двигателя. Однако при правильном согласовании мощностей двигателя и рабочего механизма, для двигателя с более высокой номинальной скоростью, приведенные к его валу значения M_{c0} и M_{cbN} будут соответственно меньше. Поэтому для двигателей одинаковой мощности значение W_{rc} зависит только от времени разгона.

Принимая во внимание (6) и (11), обозначим $A_w = W_r / W_{rc}$:

$$A_w = 1 + 2n \left[\frac{a}{n+1} + \frac{1-a}{(nm+n+1)(nm+1)} \right] t_n^*. \quad (12)$$

В выражении (12) обозначено: $t_n^* = t_n / T_j$, где $T_j = J_\Sigma \omega_N / M_N$ – механическая постоянная времени (здесь полагаем, что $M_{c0} + M_{cbN} = M_N$); $a = M_{c0} / (M_{c0} + M_{cbN})$; M_N – номинальный момент двигателя. Если пренебречь отдачей тепла в окружающую среду (адиабатический нагрев), а также всеми потерями, кроме джоулевых потерь в обмотке ротора, можем записать выражение (1) с учетом (6) и (12) как

$$M_N = k_{MV} V_a^\gamma. \quad (13)$$

Используем выражение (13) для анализа подъема температуры элементов ротора в течение пуска для двух возможных вариантов:

- когда размеры двигателей различны, но номинальные скорости одинаковы;
- когда одинаковы мощности двигателей, но отличаются номинальные скорости.

Вариант одинаковой номинальной скорости при разных габаритах двигателей

Номинальный момент двигателя связан с его активным объемом (V_a) степенной зависимостью [23]

$$M_N = k_{MV} V_a^\gamma, \quad (14)$$

где k_{MV} – коэффициент пропорциональности, γ – постоянная.

Из выражения (14) следует, что

$$M_N \sim l^{3\gamma}, \quad (15)$$

где l – характерный линейный размер двигателя, в качестве которого может быть принят кубический корень из активного объема.

Поскольку момент инерции ротора (J_r) пропорционален произведению массы ротора на квадрат его радиуса [24], получим

$$J_r \sim l^5. \quad (16)$$

Из (15) и (16) следует, что

$$J_r \sim M_N^\delta, \quad (17)$$

где $\delta = 5/(3\gamma)$.

Значения δ для двигателей различных серий, полученные путем аппроксимации справочных данных формулой (17), так же как значения γ , представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1. Значения коэффициентов степени для асинхронных двигателей различных серий (низковольтные)

Table 1. Values of the power factor for induction motors of various series (low-voltage)

Motor series		δ	$\gamma_{(a)}$	$\gamma_{(c)}$
4A (Изоляция класса F) (Insulation class F)	2-полюсные/2 poles	1,517	1,132	1,099
	4-полюсные/4 poles	1,445	1,182	1,153
	6-полюсные/5 poles	1,584	1,157	1,052
	8-полюсные/6 poles	1,542	1,112	1,081
5A, 6A	2-полюсные/2 poles	1,480	–	1,126
	4-полюсные/4 poles	1,453	–	1,147
	6-полюсные/6 poles	1,489	–	1,119
	8-полюсные/8 poles	1,362	–	1,224

Таблица 2. Значения коэффициентов степени для асинхронных двигателей различных серий (высоковольтные)

Table 2. Values of the power factor for induction motors of various series (high-voltage)

Motor series	δ	$\gamma_{(a)}$	$\gamma_{(c)}$
ДА304, 6 кВ/kV	1,184	–	1,408
А4, 6 кВ/kV	1,236	–	1,348
АДЧР, 6 кВ/kV, h=400, 450, 560 мм/mm	1,712	–	0,974
АДЧР, 10 кВ/kV, h=500, 560 мм/mm	1,206	–	1,382

В табл. 1, 2 обозначено: $\gamma_{(a)}$ – значение степени γ , полученное аппроксимацией результатов вычисления величины V_a ; $\gamma_{(c)}$ – вычисленное значение γ , полученное по значениям δ с использованием соотношения $\delta = 5/(3\gamma)$.

Если ввести коэффициент $k_{J\Sigma} = J_\Sigma / J_r$, можно записать (13) в следующем виде:

$$\Delta\theta_r' = \frac{A_w k_{J\Sigma} \omega_N^2}{2} \frac{J_r}{C_r}. \quad (18)$$

Принимая во внимание (16), а также тот факт, что теплёмкость ротора пропорциональна его массе, и, соответственно, третьей степени линейных размеров двигателя, из (18) найдем, что величина $\Delta\theta_r'$ пропорциональна квадрату линейных размеров двигателя. Из этого факта, с учетом (15), следует, что

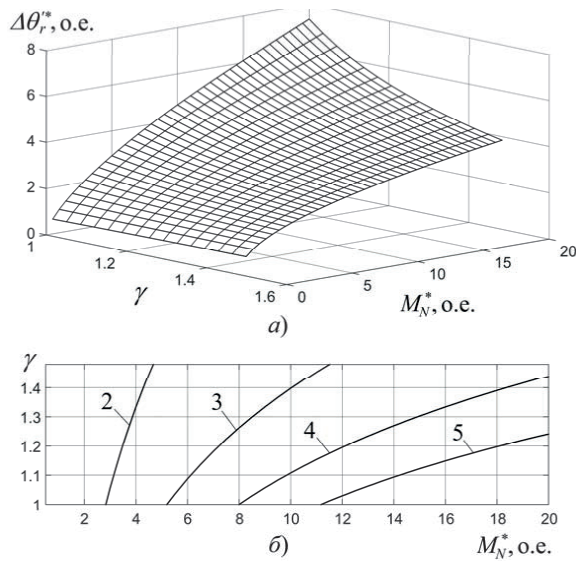


Рис. 1. Зависимости $\Delta\theta_r^*$ от M_N^* и γ

Fig. 1. Dependence of $\Delta\theta_r^*$ on M_N^* and γ

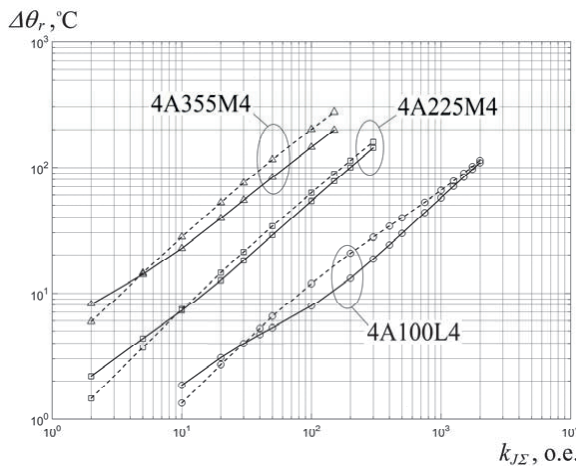


Рис. 2. Зависимости максимального подъема температуры обмотки ротора от k_Σ для двигателей 4A100L4, 4A225M4 и 4A355M4 (пунктир – короткозамыкающие кольца; непрерывные линии – пазовые части)

Fig. 2. Dependences of the maximum rotor winding temperature rise on k_Σ for 4A100L4, 4A225M4 and 4A355M4 (dot lines – end rings; solid lines – slot parts)

$$\Delta\theta_r' \sim M_N^{\frac{2}{3\gamma}}. \quad (19)$$

Из (19) вытекает, что для $k_\Sigma = \text{const}$ подъем температуры элементов ротора тем больше, чем больше размеры двигателя, причем эта зависимость достаточно сильная. На рис. 1, а показана зависимость адиабатического подъема температуры обмотки ротора от номинального момента двигателя и коэффициента γ , соответствующая соотношению (19). Здесь обозначено: $\Delta\theta_r^* = \Delta\theta_r' / \Delta\theta_{r(6)}$ и $M_N^* = M_N / M_{N(6)}$, где $\Delta\theta_{r(6)}$ и $M_{N(6)}$ – адиабатический подъем температуры роторной обмотки и номинальный момент для некоторого варианта, принятого за базисный. На рис. 1, б показаны линии уровня поверхности

$\Delta\theta_r^* (M_N^*, \gamma)$, здесь цифрами обозначены значения $\Delta\theta_r^*$. Из рис. 1 следует, что опасность неприемлемого повышения температуры элементов обмотки ротора в течение пуска существенно увеличивается с увеличением общих размеров двигателя.

На рис. 2 показаны зависимости максимально го подъема температуры при прямом пуске от k_Σ для двигателей 4A100L4 (4 кВт), 4A225M4 (55 кВт) и 4A355M4 (315 кВт) с одинаковым числом полюсов. Эти результаты получены с использованием модели асинхронного электропривода, которая включает термодинамическую модель АД на основе достаточно подробной тепловой схемы, содержащей 8 узлов. Результаты моделирования на качественном уровне хорошо согласуются с аналитически полученной зависимостью (19) и рис. 1.

Вариант одинаковой мощности двигателей при разной номинальной скорости

Этот случай рассматриваем применительно к ситуации, когда в ходе проектирования электропривода возможно использование вариантов с редукторами, имеющими различные передаточные числа, обеспечивая тем самым соответствие требуемой скорости приводимого механизма и номинальной скорости двигателя.

Запишем выражение (13) с использованием (12) в следующем виде:

$$\Delta\theta_r' = \frac{\Omega_{\text{pm}}^2}{2C_r} (J_\Delta i^2 + J_{\text{pm}}) + n \left[\frac{a}{n+1} + \frac{1-a}{(nm+n+1)(nm+1)} \right] \frac{t_i P_N}{C_r}, \quad (20)$$

где Ω_{pm} и J_{pm} – скорость вращения и момент инерции механизма; i – передаточное число редуктора.

Принимая во внимание (17), можно выразить момент инерции двигателя через номинальную мощность (P_N) как

$$J_\Delta = k_{JPN} P_N^{\frac{5}{3\gamma}} \Omega_{\text{pm}}^{-\frac{5}{3\gamma}} i^{\frac{5}{3\gamma}}. \quad (21)$$

Учитывая кубическую зависимость теплоемкости C_r от линейных размеров машины, а также принимая во внимание (15), можем выразить C_r через номинальную мощность следующим образом

$$C_r = k_{CPN} P_N^{\frac{1}{\gamma}} \Omega_{\text{pm}}^{-\frac{1}{\gamma}} i^{-\frac{1}{\gamma}}. \quad (22)$$

В выражениях (21) и (22) обозначено: k_{JPN} и k_{CPN} – некоторые константы. Принимая во внимание (21) и (22), можем записать (20) как

$$\Delta\theta_r' = \frac{\Omega_{\text{pm}}^{\frac{2}{\gamma}} P_N^{\frac{1}{\gamma}}}{2k_{CPN}} \left(k_{JPN} P_N^{\frac{5}{3\gamma}} \Omega_{\text{pm}}^{-\frac{5}{3\gamma}} i^{\frac{5}{3\gamma}} + J_{\text{pm}} i^{\frac{1}{\gamma}} \right) + \left[\frac{an}{n+1} + \frac{(1-a)n}{(nm+n+1)(nm+1)} \right] \frac{t_i P_N^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} i^{\frac{1}{\gamma}} \Omega_{\text{pm}}^{\frac{1}{\gamma}}}{k_{CPN}}. \quad (23)$$

Из (23) видно, что для приводов с одинаковой номинальной мощностью двигателя и одинаковой скоростью механизма оба слагаемых справа от знака равенства монотонно возрастают с увеличением передаточного числа редуктора, поскольку всегда

$$2 \frac{3\gamma - 1}{3\gamma} > 0 \text{ и } 1/\gamma > 0. \text{ Отсюда следует, что термиче-}$$

ские нагрузки на элементы ротора в процессе пуска будут больше в том варианте электропривода, где используется более скоростной двигатель той же мощности. Соответственно, наименее тяжелые термические условия для ротора, вероятнее всего, будут в безредукторном варианте электропривода. Физически это заключение объясняется следующим. Рассмотрим высокоинерционный электропривод, у которого кинетическая энергия, накапливаемая за время пуска, в основном определяется моментом инерции механизма. В этом случае у вариантов электропривода с двигателями, имеющими разную номинальную скорость, кинетическая энергия, запасаемая в движущихся элементах, будет мало отличаться. Аналогично работа по преодолению момента сопротивления, при условии одинакового времени пуска, будет одинаковой для всех этих вариантов. Из этого следует, что полная энергия, выделяющаяся в обмотке ротора за время пуска, почти одинакова для различных вариантов электропривода, отличающихся передаточным числом редуктора. В этом случае для электроприводов с двигателями одинаковой мощности размеры двигателей, а следовательно, и теплоемкости их элементов будут существенно отличаться. Для более скоростных двигателей энергия, почти одинаковая по сравнению с менее скоростными двигателями, будет приходиться на существенно меньшую величину теплоемкости ротора (обмотки ротора), что предопределяет более высокую температуру этих элементов к концу разгона.

На рис. 3 показаны кривые нагрева обмотки ротора для пяти АД серии 4А мощностью 110 кВт с различным числом полюсов ($2p$) при прямом пуске с моментом сопротивления вентиляторного характера. Момент инерции при моделировании выбирался таким образом, чтобы обеспечить одинаковое количество запасаемой энергии к концу пуска. Здесь обозначено: 1) $2p=2$; 2) $2p=4$; 3) $2p=6$; 4) $2p=8$; 5) $2p=10$. На рис. 3 хорошо видно, что при увеличении числа полюсов снижается термическое воздействие на обмотку ротора.

Особенности нагрева ротора АД при использовании ТПН

При пуске высокоинерционного асинхронного привода с использованием ТПН значительная часть энергии, выделяющейся в обмотке ротора, так же, как и при прямом пуске, определяется запасаемой в движущихся массах кинетической энергией. Эта часть не зависит от продолжительности пуска. Другая часть, связанная с преодолеваемым моментом сопротивления, при этом увеличи-

вается. Однако при увеличении продолжительности пуска увеличивается и доля энергии, уходящей в окружающую среду. Поэтому ответ на вопрос – в какую сторону будет изменяться нагрев обмотки ротора при увеличении продолжительности пуска зависит от соотношения величин W_{rc} и W_{out} . На рис. 4 приведены результаты моделирования пуска асинхронного электропривода с двигателем АДЧР-1600 (1600 кВт, 1500 об/мин) при $J_{\Sigma}=20J_d$ и различных моментах сопротивления. Здесь показаны зависимости максимального повышения температуры для наиболее нагретых точек обмотки ротора ($\Delta\theta_{r,max}$) от продолжительности пуска (t_n). На рис. 4 обозначено: $\circ$ – вентиляторный момент сопротивления ($m=2$, $M_{c0}=0$, $M_{cN}=M_N$); $\square$ – постоянный момент сопротивления $M_c=M_N$; $\diamond$ – постоянный момент сопротивления $M_c=0,5M_N$;

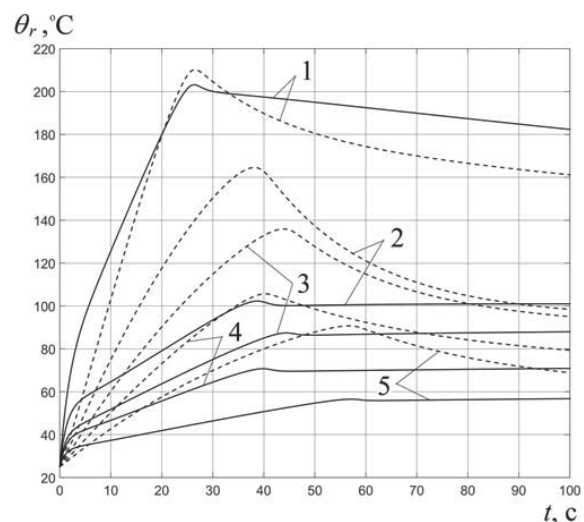


Рис. 3. Графики изменения во времени θ_r для обмотки ротора (пунктир – короткозамыкающие кольца; непрерывные линии – пазовые части)

Fig. 3. Time dependences of θ_r for rotor winding (dot lines – end rings; solid lines – slot parts)

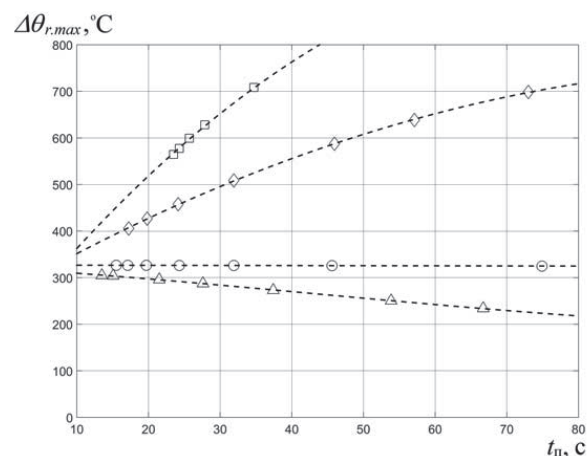


Рис. 4. Результаты моделирования пуска асинхронного электропривода с двигателем АДЧР1600

Fig. 4. Results of modeling the start-up of an asynchronous electric drive with ADCHR-1600 motor

Δ – пуск на холостом ходу. Видно, что существенно выраженное снижение нагрева обмотки ротора достигается только при пуске на холостом ходу.

Заключение

Аналитическим путем, а также с использованием компьютерного моделирования для высокоинерционных асинхронных приводов установлено следующее:

- чем крупнее двигатель (при прочих равных условиях и для схожих по геометрическим соотношениям двигателей), тем сильнее проявляется проблема перегрева обмотки ротора в пусковых режимах;
- чем ниже номинальная скорость АД при той же мощности двигателя и механизма, тем меньше нагрев обмотки ротора в пусковых режимах

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К вопросу выбора типа электропривода для шахтных вентиляторов / Б.И. Абрамов, Л.Х. Дацковский, И.К. Кузьмин, Ю.В. Шевырёв // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 7. – С. 13–21.
2. Зюев А.М., Метельков В.П. Исследование пусковых режимов электроприводов конвейеров // Электротехника. – 2009. – № 9. – С. 41–45.
3. Зюев А.М., Кожушко Г.Г., Метельков В.П. Пусковые режимы электропривода ленточного конвейера с учетом ограничений по нагреву двигателя // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2012. – № 6. – С. 71–75.
4. Устройства плавного пуска в электроприводах горных механизмов / Б.И. Абрамов, Л.Х. Дацковский, И.К. Кузьмин, А.Г. Придатков, П.М. Лиморенко // Электротехника. – 2014. – № 1. – С. 19–27.
5. Bredthauer J., Struck N. Starting of large medium voltage motors: Design, protection, and safety aspects // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1995. – V. 31. – № 5. – P. 1167–1176.
6. Farr L.B., Farr T.A. Considerations in medium voltage reduced voltage motor starting the good, the bad and the ugly // Proc. of IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC '07). – Calgary, Canada, 2007. – P. 1–7.
7. Зюев А.М., Метельков В.П., Степанюк Д.П. Управление пусковыми режимами асинхронного тиристорного электропривода с учетом ограничений по нагреву и влиянию на сеть // Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 40–43.
8. Шабанов В.А., Калимгулов А.Р., Хакимов Э.Ф. Методика многокритериальной оценки эффективности применения ЧРП на объектах магистральных нефтепроводов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2016. – № 2. – С. 11–17.
9. Шабанов В.А., Чернышов Н.А. Алгоритм определения износа изоляции обмотки статора электродвигателей магистральных насосов за время пуска // Новый университет. – 2014. – № 10 (32). – С. 56–60.
10. Юдин М.А. Токовая защита электроустановок. 2-е изд., испр. – СПб.: Изд-во «Лань», 2011. – 288 с.
11. Басс Э.И., Дорогунцев В.Г. Релейная защита электроэнергетических систем / под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 296 с.

Информация об авторах

Зюев А.М., доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета.

Метельков В.П., кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета.

(при передаточном числе редуктора, соответствующей номинальной скорости двигателя и требуемой скорости механизма);

- увеличением продолжительности пуска АД с ТПН решить проблему перегрева обмотки ротора можно только при запуске на холостом ходу. В иных случаях увеличение продолжительности пуска либо не позволяет существенно снизить нагрев, либо ведет к увеличению нагрева, что не дает возможности использовать УПП на основе ТПН для решения этой проблемы. В этой ситуации использование УПП на основе ТПН имеет смысл только, если это предопределяется ограничениями, связанными с просадкой напряжения сети при пуске, а радикальным решением проблемы перегрева является использование преобразователя частоты.

12. Martin W., Eason A., Patel A.G. Low Voltage Motor Protection. – Milwaukee: Rockwell Automation, 2016. – 30 p.
13. Киреева Э.А., Цырук С.А. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. – М.: Академия, 2013. – 288 с.
14. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. – М.: Высшая школа, 2006. – 640 с.
15. Plesca A.T. Thermal Analysis of Overload Protection Relays using Finite Element Method // Indian Journal of Science and Technology. – 2013. – V. 6. – Iss. 8. – P. 5120–5125.
16. Bonnett A.H., Soukup G.C. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1992. – V. 28. – № 4. – P. 921–937.
17. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines / P. Taver, L. Ran, J. Penman, H. Sedding. – London: The Institution of Engineering and Technology, 2008. – 304 p.
18. A Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium-Voltage Induction Motors / P. Zhang, Y. Du, T.G. Habetler, B. Lu // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2011. – V. 47. – № 1. – P. 34–46.
19. Albers T., Bonnett A. H. Motor temperature considerations for pulp and paper mill applications // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2002. – V. 38. – № 6. – P. 1701–1713.
20. Analysis of the fatigue causes on the rotor bars of squirrel cage asynchronous motors: Experimental analysis and modelling of medium voltage motors / M.F. Cabanas, J.L. Ruiz Gonzalez, J.L.B. Sampayo, M.G. Melero, C.H. Rojas, F. Pedrayes, A. Arguelles, J. Vina // Proc. of 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDMPED). – Atlanta, USA, 2003. – P. 247–252.
21. Ziuzev A.M., Metelkov V.P. Research of the start-up modes of multi-stage blower asynchronous drive // Proc. of IEEE IX International Conference on Power Drives Systems (ICPDS). – Perm, 2016. – P. 1–5.
22. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
23. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
24. Гейлер Л.Б. Электропривод в тяжелом машиностроении. – М.: Машиздат, 1958. – 587 с.

Поступила 25.06.2018 г.

UDC 62–83:621.313

PROBLEM OF INDUCTION MOTORS ROTOR WINDING OVERHEATING IN STARTING MODES OF HIGH-INERTIA ELECTRIC DRIVES OF OIL AND MINING INDUSTRY

Anatoliy M. Zyuzev¹,

a.m.zyuzev@urfu.ru

Vladimir P. Metelkov¹,

v.p.metelkov@urfu.ru

¹ Ural Federal University,

19, Mira street, Ekaterinburg, 620002, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to increase the reliability and reduce the fault rate of asynchronous electric drives of high-inertia mechanisms of the oil and gas industry and the mining industry, such as main oil pipeline pumps, ventilator installations of mining enterprises and others. A cross-line starting of such electric drives, as well as when starting with the use of thyristor voltage converters, strong heating of the rotor winding takes place, which leads to negative consequences of thermomechanical effects with the electric motor failure.

The main aim of the research is to reveal the regularities relating the parameters of induction motors and the start-up modes with the level of the rotor winding heating; to determine the possibility of influence of accelerating time defined by the stator current limit set point at start-up with a thyristor voltage converter on the rotor heating.

Object of the research is an electric drive of high inertia mechanisms of the oil and gas industry and the mining industry with an induction motor, starting at a constant rotational speed of the stator magnetic field.

Methods: analytical methods, as well as computer simulation using thermodynamic models of an induction motor based on thermal circuits with lumped parameters.

Results. Analytically, and also with the help of computer simulation it is shown that when the dimensions of the electric motor increase (*ceteris paribus*), the problem of the rotor winding overheating becomes more and more urgent. If the number of motor poles is increased (at the same nominal power, in the case when it is possible to use the gear ratio of the gearbox corresponding to the rated motor speed and the required speed of the mechanism), the heating of the rotor winding decreases. It is also shown that by increasing the duration of starting an induction motor due to the use of a thyristor voltage converter, it is possible to solve the problem of the rotor winding overheating only when starting without load. In other cases, an increase in duration of the start-up either does not allow a significant reduction in heating, or leads to an increase in heating. In this situation, the use of thyristor voltage converters makes sense if it is predetermined only by the limitations associated with the network voltage drop during start-up, and the only solution to the problem of overheating is the use of a frequency converter.

Key words:

Main oil pumping units, mine fans, induction motor, rotor winding, thermodynamic model, thermal lumped parameters circuit, thyristor voltage converter.

REFERENCES

1. Abramov B.I., Datskovsky L.K., Kuzmin I.K., Shevyrev Yu.V. Selecting Type of Electric Drive for Mine Fans. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2017, no. 7, pp. 13–21. In Rus.
2. Zyuzev A.M., Metelkov V.P. Study of Start-Up Modes of Conveyor Drives. *Russian Electrical Engineering*, 2009, vol. 80, no. 9, pp. 498–501. In Rus.
3. Zyuzev A.M., Kozhushko G.G., Metelkov V.P. Starting mode of electric conveyor belt, taking into account constraints on the heating of the engine. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2012, no. 6, pp. 71–75. In Rus.
4. Abramov B.I., Datskovsky L.K., Kuzmin I.K., Pridatkov A.G., Limorenko P.M. Soft starters in electric drives of mining mechanisms. *Russian Electrical Engineering*, 2014, no. 1, pp. 17–27. In Rus.
5. Bredthauer J., Struck N. Starting of large medium voltage motors: Design, protection, and safety aspects. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1995, vol. 31, no. 5, pp. 1167–1176.
6. Farr L.B., Farr T.A. Considerations in medium voltage reduced voltage motor starting the good, the bad and the ugly. *Proceedings of IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC '07)*. Calgary, Canada, 17–19 September 2007. pp. 1–7.
7. Zyuzev A.M., Metelkov V.P., Stepanyuk D.P. Control of Startup of an Asynchronous Thyristor Electric Drive Taking into Account a Limited Heating and Network Influence. *Russian Electrical Engineering*, 2012, vol. 83, no. 9, pp. 504–507. In Rus.
8. Shabanov V.A., Kalimulov A.R., Khakimov E.F. The Technique of Multi-Criteria Evaluation of Efficiency of VFD Application on the Main Pipelines Objects. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodornogo syrya*, 2016, no. 2, pp. 11–17. In Rus.
9. Shabanov V.A., Chernyshov N.A. Algorithm for determining the insulation deterioration of the main pumps motor stator winding during the start-up time. *New University*, 2014, no. 10 (32), pp. 56–60. In Rus.
10. Yundin M.A. *Tokovaya zashchita elektroustanovok* [Current protection of electrical installations]. St. Petersburg, Lan Publ., 2011. 288 p.
11. Bass E.I., Doroguncev V.G. *Releynaya zashchita elektroenergeticheskikh sistem* [Relay protection of electric power systems]. Moscow, MPEI Publ., 2002. 296 p.
12. Martin W., Eason A., Patel A.G. *Low Voltage Motor Protection*. Milwaukee, Rockwell Automation, 2016. 30 p.
13. Kireeva E.A., Cyruk S.A. *Releynaya zashchita i avtomatika elektroenergeticheskikh sistem* [Relay protection and automation of electric power systems]. Moscow, Akademiya Publ., 2013. 288 p.
14. Andreev V.A. *Releynaya zashchita i avtomatika sistem elektro-snabzheniya* [Relay protection and automation of power supply systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2006. 640 p.
15. Plesca A.T. Thermal Analysis of Overload Protection Relays using Finite Element Method. *Indian Journal of Science and Technology*, 2013, vol. 6, Iss. 8, pp. 5120–5125.
16. Bonnett A.H., Soukup G.C. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors. *IEEE*

- Transactions on Industry Applications*, 1992, vol. 28, no. 4, pp. 921–937.
17. Tavner P., Ran L., Penman J., Sedding H. *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines*. London, The Institution of Engineering and Technology, 2008. 304 p.
 18. Zhang P., Du Y., Habetler T.G., Lu B. A Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium-Voltage Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2011, vol. 47, no. 1, pp. 34–46.
 19. Albers T., Bonnett A.H. Motor temperature considerations for pulp and paper mill applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, vol. 38, no. 6, pp. 1701–1713.
 20. Cabanas M.F., Ruiz Gonzalez J.L., Sampayo J.L.B., Melero M.G., Rojas C.H., Pedrayes F., Arguelles A., Vina J. Analysis of the fatigue causes on the rotor bars of squirrel cage asynchronous motors: Experimental analysis and modelling of medium voltage motors. *Proc. of 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*. Atlanta, GA, USA, 24–26 August 2003. pp. 247–252.
 21. Zyuzev A.M., Metelkov V.P. Research of the start-up modes of multi-stage blower asynchronous drive. *Proc. of IEEE IX International Conference on Power Drives Systems (ICPDS)*. Perm, October 3–7, 2016. pp. 1–5.
 22. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda* [Theory of electric drive]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 560 p.
 23. Voldek A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1978. 832 p.
 24. Geyler L.B. *Elektroprivod v tyazhelom mashinostroyenii* [Electric drive in heavy engineering]. Moscow, Mashizdat Publ., 1958. 587 p.

Received: 25 June 2018.

Information about the authors

Anatoliy. M. Zyuzev, Dr. Sc., professor, Ural Federal University.

Vladimir P. Metelkov, Cand. Sc., associate professor, Ural Federal University.

УДК 550.835.232, 550.84.094.2, 550.8.053

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МНОГОМЕРНОЙ СТАТИСТИКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НАЗЕМНОЙ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ ПРИ ПОИСКАХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА

Соболев Игорь Станиславович¹,
geolsob@yandex.ru

Орехов Александр Николаевич¹,
orekhovan@mail.tomsknet.ru

Соболева Надежда Петровна¹,
sobnadi@yandex.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634030, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы определяется необходимостью улучшения информативности гамма-спектрометрических исследований в условиях невысокой контрастности радиогеохимических аномалий. Крупные и средние по запасам гидротермальные месторождения золота в освоенных районах золотодобычи уже обнаружены. Поиск небольших слабо проявленных в геохимических полях золоторудных объектов требует использования дополнительных процедур обработки радиогеохимических данных для выделения «полезного» сигнала от гидротермально измененных пород. Усиление контрастности гамма-спектрометрических эффектов от продуктов деятельности флюидогенных систем возможно за счет анализа параметров локальной вариативности фонового содержания радионуклидов. Сложность решения этой задачи обусловлена одновременным влиянием на особенности фоновой флуктуации радиогеохимического поля группы сильных природных факторов. Основными из этих факторов являются: минеральный состав горных пород и ландшафтно-морфологическое строение территорий. Для определения специализации радиоактивных аномалий кроме информации по содержанию естественных радиоактивных элементов часто привлекают расчетные отношения: K/Th , U/Th и U/K . Появляется необходимость их совместного анализа, который можно упростить с помощью статистических способов выделения наиболее информативных признаков и сокращения их количества.

Цель работы: апробация алгоритма статистической обработки данных крупномасштабных наземных гамма-спектрометрических съемок на трех гидротермальных золоторудных объектах.

Методы исследования: наземные гамма-спектрометрические измерения концентраций ^{40}K , ^{238}U (^{226}Ra), ^{232}Th ; статистическая обработка данных с использованием кластерного и многофакторного дисперсионного анализа методом главных компонент.

Результаты. Проведена оценка и учет особенностей фоновых колебаний содержаний естественных радионуклидов. Путем многопризнакового статистического анализа значений коэффициентов концентраций естественных радиоактивных элементов и их индикаторных отношений определена радиогеохимическая специализация гамма-спектрометрических аномалий. Оценена связь радиоактивных аномалий с гидротермально-метасоматическими окорудными изменениями.

Ключевые слова:

Гамма-спектрометрия, многомерная статистика, окорудные гидротермалиты, радиогеохимическая специализация, гидротермальные месторождения золота.

Введение

Радиогеохимические характеристики продуктов гидротермально-метасоматической деятельности флюидогенных систем позволяют использовать полевые гамма-методы регистрации радиоактивности при поисках рудных месторождений полезных ископаемых и залежей углеводородов. Дифференциация радиоактивных элементов в минеральном веществе земной коры происходит на всех уровнях организации: минералах, горных породах, геологических формациях, структурно-формационных комплексах и отдельных слоях земной коры. При этом, несмотря на существенную разницу в уровнях накопления естественных радионуклидов (^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th), для различных неизмененных геологических образований значения отношений K/Th , U/Th (Th/U), U/K варьируют в сравнительно узких диапазонах [1, 2]. Иное распределение радионуклидов происходит при формировании метасоматической зональности, где

особенности их концентрирования определяются физико-химическими параметрами гидротермальной системы и химическим составом флюидов. Процесс эволюции флюидогенных систем рудных месторождений в радиогеохимическом аспекте выражается в антагонизме поведения естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ), контрастно проявленном в паре калия и тория. Руды халькофильных металлов ассоциируют с продуктами щелочного калиевого метасоматоза. Гидротермальная минерализация ниобия, тантала, редкоземельных и некоторых других литофильных элементов сопровождается образованием минералов-концентратов тория [3].

Для выявления областей развития гидротермально-измененных пород гамма-спектрометрическим методом используют уже упомянутые индикаторные отношения – K/Th , U/Th и U/K [4, 5]. Поиск наложенных изменений также осуществляется по радиогеохимическим показателям, кото-

рые одновременно учитывают особенности концентрирования всех трех радионуклидов. Известны: способ индикации перспективных аномалий относительно трехмерного (торий-уран-калиевого) вектора фонового распределения; показатели аномального отклонения содержаний радиоактивных элементов (F-параметр и DRAD), рассчитываемые относительно содержания тория [6–8]. Данные радиогеохимические индексы удобнее анализировать, чем индивидуальные отношения в парах радионуклидов, но два последних в первую очередь направлены на оценку калий-урановой аномальной составляющей, затеняя информацию об особенностях распределения тория. Визуализацию параметров баланса концентраций ЕРЭ часто представляют в виде карт смеси цветов: красного-зеленого-синего. Значение содержания радионуклида соответствует цифровому коду «интенсивности» одного из трех цветов, а итоговая окраска для каждой точки измерений определяется ее положением в поле треугольной диаграммы аддитивной цветовой палитры RGB [9]. Главным недостатком такого способа представления гамма-спектрометрических данных является сугубо качественный характер получаемой информации. Устойчивым радиогеохимическим признаком гидротермальных и гидротермальных рудных месторождений является нарушение корреляционных связей ЕРЭ [10]. Особенности корреляционного анализа – это слабая зависимость результатов от абсолютных значений исходных данных и низкая чувствительность к погрешностям их увязки. Путем варьирования параметрами статистического окна можно минимизировать влияние ландшафтно-геоморфологических и других природных факторов. Однако по причине отсутствия четких алгоритмов определения оптимального размера статистической палетки ее параметры подбираются путем множественного перебора, а результат сильно зависит от опыта интерпретатора. Из-за особенностей алгоритма обсчета в статистическом окне границы аномальных объектов искажаются, к тому же нередко возникают ложные аномальные краевые эффекты.

Анализ гамма-спектрометрических данных в подавляющем большинстве случаев осуществляется без учета флуктуации фоновой компоненты содержания естественных радионуклидов. Однако значения индикаторных отношений зависят от ряда геологических и ландшафтных факторов, не связанных с гидротермальными изменениями. К ним относятся: тип пород и их возраст; уровень эрозионного среза магматических комплексов; рельеф и сопряженные с ним ландшафты и др. Как следствие, диапазоны изменения значений отношений концентраций радиоактивных элементов в продуктах гидротермальной деятельности и в неизмененных горных породах могут совпадать. В процессе решения поисковых геохимических задач проблему определения фоновых значений концентраций анализируемых компонентов осуществляют с привлечением результатов ландшафтно-

геохимических исследований. Нередко возникают ситуации, когда нет необходимого минимума информации для составления ландшафтно-геохимических карт. Частично эту проблему можно решить, привлекая данные дистанционного зондирования и топографии для создания геоморфологических и эрозионных моделей территории [11]. Однако процедуры, сопутствующие реализации этого подхода, достаточно трудоемки, а также требуют специальных навыков и программного обеспечения для работы с космоснимками.

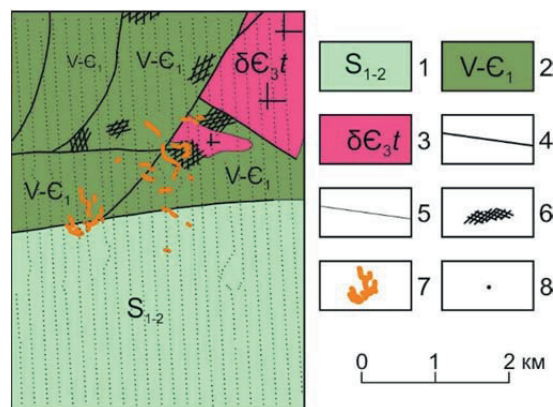


Рис. 1. Схема геологического строения золоторудного месторождения Тардан (по К.К. Кильчичакову, 1977): 1) ранний – поздний силур: песчаники, красноцветные, гравелиты, конгломераты, прослои известняков; 2) венд – ранний кембрий: доломиты, известняки, известковистые конгломераты; 3) гранитоиды Таннуольского комплекса; 4) разломы; 5) геологические границы; 6) скарны; 7) золоторудные тела; 8) точки гамма-спектрометрических измерений

Fig. 1. Schematic geological map of the Tardan gold ore deposit (adapted from K.K. Kilchichakov, 1977): 1) early-late Silurian: redbed sandstones, gravelstones, conglomerates, interbeds of limestone; 2) Vendian – early Cambrian: dolomites, limestones, calcareous conglomerates; 3) granitoids of the Tannu-Ola complex; 4) faults; 5) geological boundary; 6) skarns; 7) gold ore bodies; 8) point of gamma-ray spectrometry measurements

Геологическое строение участков исследований

Месторождение золота Тардан

Скарново-золоторудное месторождение Тардан располагается на юге Сибири в 60 км на ВСВ от г. Кызыла, столицы Республики Тыва. Месторождение принадлежит Байсютскому золотоносному району, границы которого преимущественно совпадают с крупным гранитоидным плутоном таннуольского комплекса. Магматический комплекс прорывает позднерифейско-нижнекембрийские вулканогенно-осадочные и карбонатные толщи. Геологическое строение месторождения представлено терригенными породами, мраморизованными известняками и кислыми вулканитами, слагающими крупную антиклинальную складку (рис. 1). Рудное поле месторождения занимает площадь около 1 км², в пределах которой выявлено и разведано 14 рудных тел. Среди скарнов и ги-

дротермальных пород выделяется два типа метасоматических тел: контактовый и трещинный. Трещинный тип скарновых залежей является наиболее продуктивным. Размещение золото-медно-сульфидной минерализации в скарнах контролируется зонами интенсивной трещиноватости и разрывов северо-восточного простирания. По особенностям минеральных ассоциаций выделяют кальцит-золото-медносульфидный прожилково-вкрапленный и кварцево-золоторудный жильно-прожилковый типы руд. Сульфиды, золото и минералы околорудных метасоматитов (кварц, кальцит, доломит, хлорит, серицит, серпентин, анкерит) формировались сближено во времени на послемагматическом этапе [12].

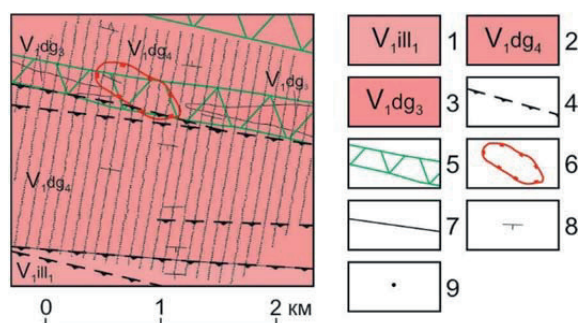


Рис. 2. Схема геологического строения золотого рудопроявления Обручева (по В.М. Аксенову, 1981): 1–3) ранний венд: иллигирская свита (1): флишеидное и тонкое переслаивание метапесчаников и филлитов; догалдынская свита: четвертая подсвита (2): метапесчаники; третья подсвита (3): переслаивание метапесчаников, карбонат-углеродистых метаалевролитов и филлитов; 4) разломы; 5) зоны прожилково-вкрапленной сульфидной и железисто-магнезиально-карбонатной минерализации; 6) кварцево-жильные зоны; 7) геологические границы; 8) элементы залегания; 9) точки гамма-спектрометрических измерений

Fig. 2. Schematic geological map of the Obruchev gold ore manifestation (adapted from V.M. Aksenov, 1981): 1–3) early Vendian: illigirskaya suite (1): flusoid and thin interbedded metasandstones and phyllites; dogaldynskaya suite: fourth member (2): metasandstones; third member (3): interbedded metasandstones, carbonate-carbonaceous metasiltstone and phyllites; 4) faults; 5) zones of streaky-impregnated sulfides and siderite-magnesium carbonate mineralization 6) quartz-vein zone; 7) geological boundary; 8) attitude; 9) point of gamma-ray spectrometry measurements

Рудопроявление золота Обручева

Золоторудное проявление Обручева находится в 38 км на север от г. Бодайбо в Иркутской области и относится к Васильевскому рудному полю Бодайбинского золоторудного района. Золоторудная минерализация представлена кварц-сульфидным прожилково-вкрапленным и кварц-жильным типами в черносланцевой формации. Рудопроявление Обручева связано с кварц-жильной зоной, расположенной в сводовой части антиклинальной складки IV-го порядка (рис. 2). В геологическом разрезе преобладают мелкозернистые метапесчаники.

В нижней части отложений третьей подсвиты догалдынской свиты установлена пачка ритмичного переслаивания метапесчаников, карбонат-углеродистых метаалевролитов и сланцев мощностью до 45 м, в которой сформировалась зона рассланцевания. На севере участок рудопроявления граничит с Успенским взбросом, сопровождающимся зонами смятия и повышенной трещиноватостью пород. С влиянием этого разлома связаны дорудные гидротермальные изменения пород, представленные зонами сульфидной и железисто-магнезиально-карбонатной минерализации в углеродистых толщах. Формирование золоторудной минерализации на месторождениях Бодайбинского золоторудного района осуществлялось на заключительной стадии главного этапа складкообразования. В этот период происходило подновление разрывных структур, возникновение систем трещин. По этим каналам поступали новые порции золотоносного раствора с образованием в наиболее проницаемых частях породного комплекса рудных столбов. Гидротермально-метасоматические изменения рудного этапа наиболее крупного месторождения Бодайбинского золоторудного района – Сухой Лог – относят к березит-пропилитовой формации [13].

Поисковый участок (местонахождение конфиденциально)

Участок территориально принадлежит Чаро-Олекминскому блоку Алдано-Станового щита и тяготеет в структурном отношении к Угуйской грабен-синклинали. В геологическом строении принимает участие толща кристаллических амфиболовых сланцев, которая по разрывному нарушению на востоке граничит с магматическими образованиями трех плутонических комплексов, преимущественно гранитоидного состава (рис. 3). Собственно глубокометаморфизованные сланцы прорваны небольшими интрузивами и дайкообразными телами основного и среднего состава. На мезозойском этапе тектоно-магматической активизации внедрялись субпластовые тела и дайки щелочного и субщелочного состава, а также шло становление гидротермально-метасоматических образований, преимущественно калиевого петрохимического профиля – гумбеитов [14]. В вещественном отношении потенциально золоторудные зоны локализованы в интенсивно гумбеитизированных (адуляризированных) породах, как в пределах плутонических комплексов, так и кристаллических сланцев. Гидротермально-метасоматические образования в зоне гипергенеза сильно изменены, вплоть до полного окисления первичной сульфидной минерализации.

Методика проведения гамма-спектрометрической съемки

Наземная гамма-спектрометрическая съемка проводилась по сети: месторождение Тардан – 200×40 м (рис. 1); рудопроявление Обручева и Поисковый участок – 100×20 м (рис. 2, 3). Определение концентраций радионуклидов (^{40}K , ^{238}U (по

^{226}Ra), ^{232}Th) осуществлялось полевыми гамма-спектрометрами различных марок и модификаций: месторождение Тардан – РКП-305; рудопоявление Обручева – РКП-305М; Поисковый участок – РКП-305М и МКСП-01 «РАДЭК».

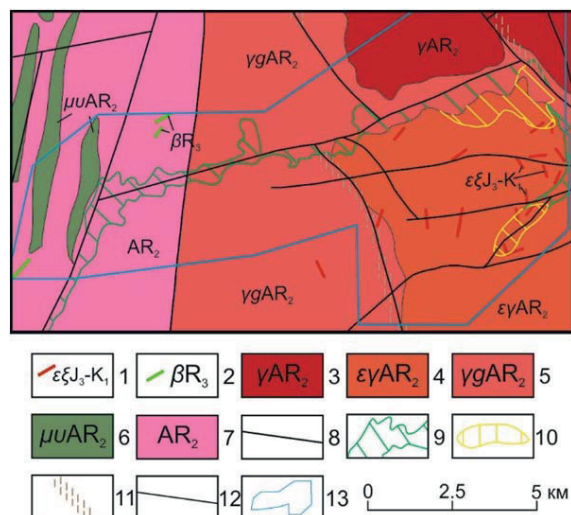


Рис. 3. Схема геологического строения Поискового участка (по И.О. Кремеру, 2017): 1) поздняя юра – ранний мел: дайки и силлы сиенитов, бостонитов; 2) поздний рифей: малые тела и дайки диабазов, долеритов, габбро-долеритов; 3–7) поздний архей: граниты микроклиновые, биотитовые, лейкократовые (3); граниты, гранодиориты, лейкограниты (4); гранитогнейсы, плагиогранитогнейсы, лейкогранитогнейсы, гнейсограниты (5); небольшие массивы, линзовидные и дайкообразные тела метагабброидов и метадiorитов (6); кристаллические сланцы биотит-амфиболовые, амфиболовые, пироксен-амфиболовые (7); 8) разломы; 9–10) метасоматиты: кварц-микроклиновые (9); лимонит-кварц-полевошпатовые (10); 11) динамометаморфиты: бластокатаклазиты и бластомилониты, диафториты эпидот-актинолитовые, сланцы хлоритовые, серицит-хлорит-кварцевые, кварц-альбит-серицитовые; 12) геологические границы; 13) контур участка гамма-спектрометрической съемки

Fig. 3. Schematic geological map of the Poiskovy study area (adapted from I.O. Kremer, 2017): 1) late Jurassic – early Cretaceous: dikes and sills of syenite and bostonite; 2) late Riphean: smaller bodies and dikes of diabase, dolerite and gabbro-dolerite; 3–7) late Archean: microcline, biotite and leucocratic granites (3); granite, granodiorite and leucocratic granite (4); granite gneiss; plagioclase granite gneiss; leucocratic granite gneiss; gneissose granite (5); small massifs, phacoidal bodies, dikes of metagabbroid and metadiorite (6); biotite-amphibole, amphibole and pyroxene-amphibole crystalline schist's (7); 8) faults; 9–10) hydrothermal alterations: quartz-microcline (9), limonite-quartz-feldspathic (10); 11) dynamic metamorphism: blastocataclasite and blastomylonite, epidote-actinolite diaphthorite, chlorite, sericite-chlorite-quartz and quartz-albite-sericite schist's; 12) geological boundary; 13) contour of gamma-ray spectrometric survey

Результаты

Специфика местных природных условий оказала существенное влияние на различия в особенностях концентрирования радиоактивных элементов

между участками съемки. Монотонное, в основном представленное метапесчаниками, литологическое строение рудопоявления Обручева определило наиболее низкие коэффициенты вариации ЕРЭ (табл. 1) и сравнительно однородное строение полей их концентраций (рис. 4, а–в). В пределах месторождения Тардан и Поискового участка встречаются геологические блоки, заметно отличающиеся по радиогеохимическим особенностям слагающих их пород, что выразилось в относительно высокой степени дифференцирования радиоактивного поля (рис. 5, а–в; 6, а–в). Помимо геологического строения приповерхностного горизонта Поискового участка и рудопоявления Обручева, на особенности полученных результатов измерений ощутимое воздействие оказал характер растительности в пределах наиболее гористых частей территорий. Этот фактор выразился в заметном экранировании гамма-излучения горных пород в ареалах развития моховой подстилки на склонах с северной экспозицией.

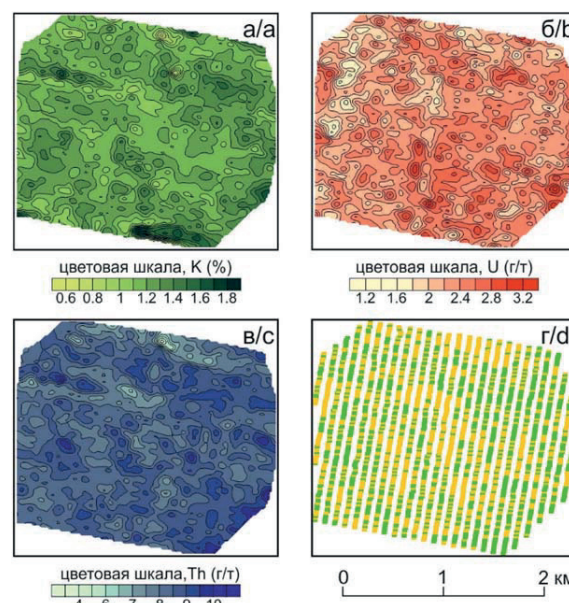


Рис. 4. Распределение калия (а), урана (б), тория (в) и схема радиогеохимических квазиоднородных участков (г) на рудопоявлении Обручева

Fig. 4. Potassium (a), uranium (b), thorium (c) spatial distribution and schematic map of radiometric quasi-homogeneous plots (d) of the Obruchev ore manifestation

Задача определения пространственной изменчивости фоновых концентраций радионуклидов решалась с помощью кластер-анализа. Различные способы кластеризации гамма-спектрометрической информации в основном используют с целью геологического и почвенного картирования [15]. Однако минеральный состав коренного субстрата и сформированных по нему почв является сильной, но не исключительной природной причиной, определяющей фоновые параметры концентрирования химических элементов. На результирующую классификацию оказывают влияние все природные и искусственные факторы, в т. ч. такие существен-

ные, как ландшафтно-морфологические. Таким образом, путем кластеризации геохимических данных удается получить пространственную математическую модель, по смысловой нагрузке близкую к ландшафтно-геохимической карте, и на ее основе учитывать особенности флуктуации местного геохимического фона [16, 17]. Кластер-анализ гамма-спектрометрической информации осуществлялся методом К-среднего по стандартизованным значениям концентраций ЕРЭ. Итоговое количество принимаемых при расчете кластеров определялось путем множественного перебора получаемых результатов. Оптимальным считался тот случай, когда на схеме квазиоднородных участков находили отражение относительно крупные по площади области с ярко выраженными радиогеохимическими характеристиками. Одновременно не происходило появления большого количества локальных неоднородностей, которые могут проявлять зоны околорудных гидротермальных изменений.

Таблица 1. Статистические характеристики распределения ЕРЭ
Table 1. NREs distribution statistics

Площадь исследования Study areas	Среднее Mean	Медиана Median	Мин. - Макс. Min-Max	Коэф. вариации Variation coefficient (%)
Тардан/Tardan (N=1769):				
K, %	0,9	0,9	0,1–2,2	39
U, г/т (ppm)	1	1	1–3	38
Th, г/т (ppm)	5	5	1–11	39
Обручева/Obruchev (N=2662):				
K, %	1,2	1,2	0,4–2,2	14
U, г/т (ppm)	2,3	2,3	0,7–4,0	10
Th, г/т (ppm)	8,4	8,3	3,3–13,0	11
Поисковый/Poiskovy (N=20244):				
K, %	3,4	3,1	0,7–13,4	53
U, г/т (ppm)	2,9	2,6	0,9–15,5	41
Th, г/т (ppm)	14,2	11,0	4,1–70,8	63

Дифференциация радиогеохимического фона месторождения Тардан осуществлялась по пяти кластерам. В результате с некоторыми вариациями, обусловленными степенью обнаженности коренных отложений и местными ландшафтами, обособились существенно карбонатные слабо-радиоактивные отложения венда и нижнего кембрия, более радиоактивные, преимущественно терригенные, силурийские отложения и гранитоиды таннуольского комплекса (рис. 5, г). Для уменьшения влияния ландшафтно-морфологических факторов на слабо изменчивые поля содержаний ЕРЭ рудопроявления Обручева использовалось минимально возможное количество кластеров (рис. 4, г). Поисковый участок тремя группами статистической классификации разделен на восточную часть, сложенную высокорadioактивными гранитами, и западную область развития гранитогнейсов и кристаллических сланцев, для которых ха-

рактерна значительно пониженная гамма-активность (рис. 6, г). Более дробная дифференциация радиогеохимического поля в пространственном распределении точек трех кластеров на востоке территории обусловлена сильно расчлененным рельефом с выраженной ландшафтной зональностью. Крупная неоднородность высокого содержания ЕРЭ в западном секторе не находит отражения на геологической карте и по нашим предположениям связана с наложенными процессами гранитизации в районе узла пересечения двух крупных разломов. Ослабление вклада фоновых колебаний в распределение радиоактивных элементов производилось путем перехода к безразмерным величинам – коэффициентам концентрации (kk). Для этого содержания радионуклидов каждой точки измерений нормировались по медианному значению, рассчитанному для выборок тех кластеров, к которым эти точки были определены.

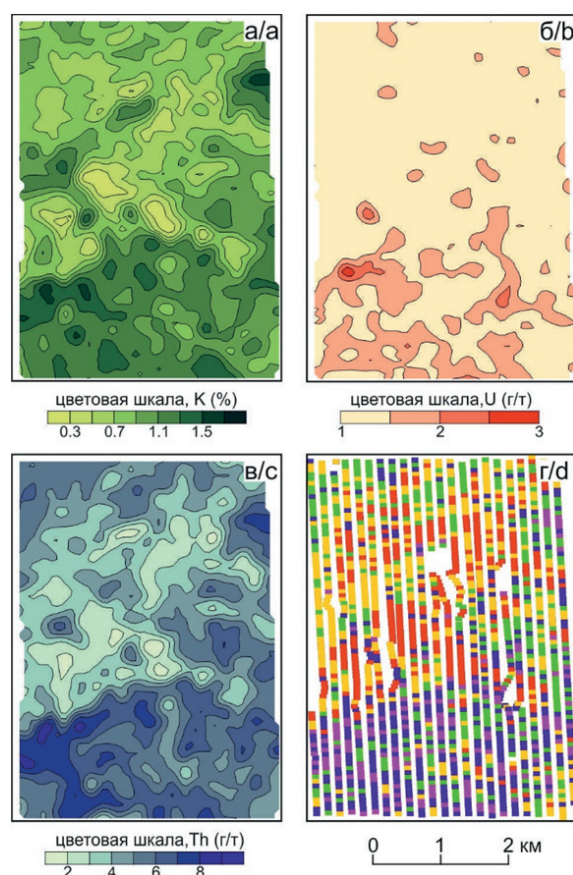


Рис. 5. Распределение калия (а), урана (б), тория (в) и схема радиогеохимических квазиоднородных участков (г) на месторождении Тардан

Fig. 5. Potassium (a), uranium (b), thorium (c) spatial distribution and schematic map of radiometric quasi-homogeneous plots (d) of the Tardan deposit

Дифференциация радиогеохимического фона месторождения Тардан осуществлялась по пяти кластерам. В результате с некоторыми вариациями, обусловленными степенью обнаженности коренных отложений и местными ландшафтами,

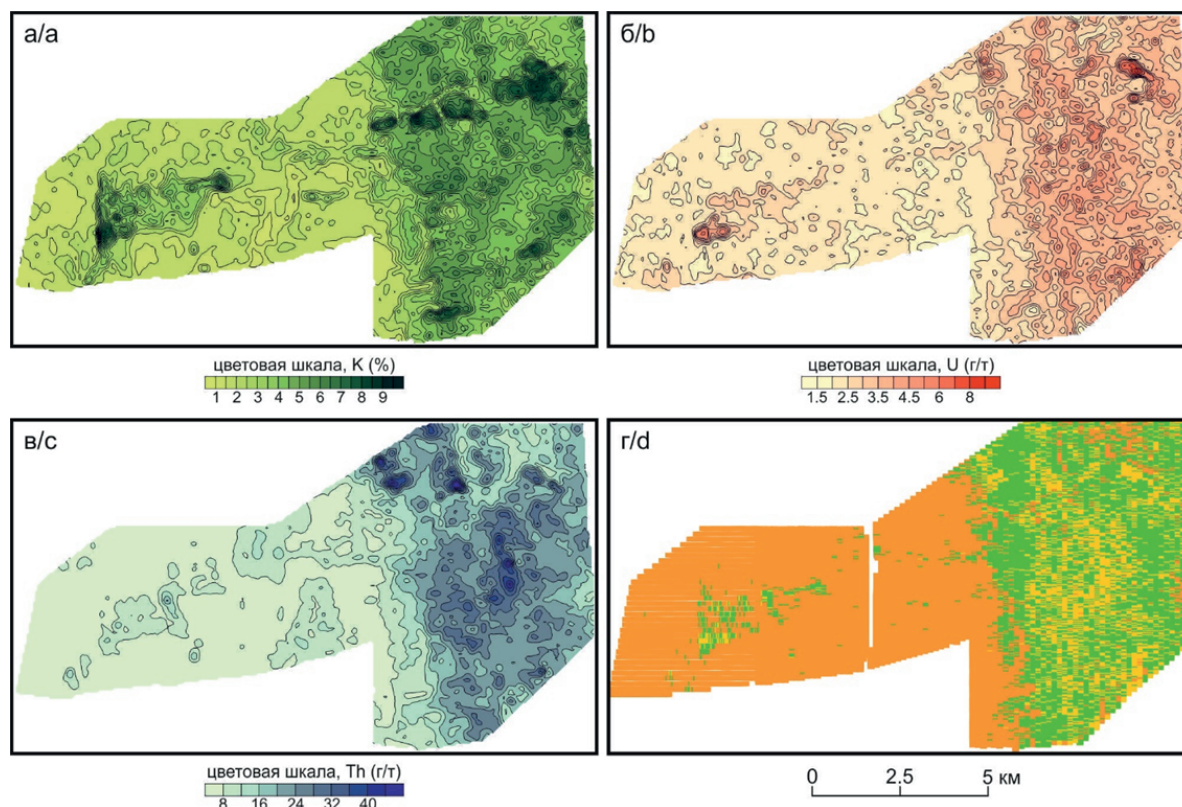


Рис. 6. Распределение калия (а), урана (б), тория (в) и схема радиогеохимических квазиоднородных участков (г) на Поисковом участке

Fig. 6. Potassium (a), uranium (b), thorium (c) spatial distribution and schematic map of radiometric quasihomogeneous plots (d) of the Poiskovy study area

обособились существенно карбонатные слаборадиоактивные отложения венда и нижнего кембрия, более радиоактивные, преимущественно терригенные, силурийские отложения и гранитоиды таннуольского комплекса (рис. 5, г). Для уменьшения влияния ландшафтно-морфологических факторов на слабо изменчивые поля содержаний ЕРЭ рудопроявления Обручева использовалось минимально возможное количество кластеров (рис. 4, г). Поисковый участок тремя группами статистической классификации разделился на восточную часть, сложенную высокорadioактивными гранитами, и западную область развития гранитогнейсов и кристаллических сланцев, для которых характерна значительно пониженная гамма-активность (рис. 6, г). Более дробная дифференциация радиогеохимического поля в пространственном распределении точек трех кластеров на востоке территории обусловлена сильно расчлененным рельефом с выраженной ландшафтной зональностью. Крупная неоднородность высокого содержания ЕРЭ в западном секторе не находит отражения на геологической карте и по нашим предположениям связана с наложенными процессами гранитизации в районе узла пересечения двух крупных разломов. Ослабление вклада фоновых колебаний в распределение радиоактивных элементов производи-

лось путем перехода к безразмерным величинам – коэффициентам концентрации (kk). Для этого содержания радионуклидов каждой точки измерений нормировались по медианному значению, рассчитанному для выборок тех кластеров, к которым эти точки были определены.

С целью определения радиогеохимической специализации аномалий применялся факторный дисперсионный анализ методом главных компонент. Известны примеры совместного анализа результатов гамма-спектрометрических измерений концентраций ЕРЭ с другими геофизическими, геохимическими и геологическими данными [15, 18]. В нашем случае в качестве входных признаков кроме коэффициентов концентраций радионуклидов привлекались отношения: $kkK/kkTh$, $kkU/kkTh$ и kkU/kkK . Во всех трех случаях было установлено, что объясненная дисперсия радиогеохимического поля описывается двумя главными компонентами (табл. 2).

Обсуждение результатов

Кластер-анализ не является идеальным методом для оценки региональной составляющей изменчивости радиогеохимического поля. Однако, в сравнении с фильтрацией данных в скользящих статистических окнах и аппроксимации поверхно-

сти тренда полиномами, кластер-анализ обладает рядом преимуществ. В частности, не возникает ложной взаимозависимости между отдельными членами, пригоден для описания прерывистых геологических объектов. К тому же, доверительные вероятности отнесения точек к кластерам выше, чем у получаемых значений «скользящих средних», особенно при реализации второго способа с небольшим числом наблюдений в скользящем окне. Приведение полей концентраций ЕРЭ к одному уровню фона позволяет при дальнейшем анализе в большей мере сосредоточиться на аномальной составляющей, что особенно важно в условиях слабого проявления «полезного» сигнала.

Таблица 2. Вращаемые факторные нагрузки в двухфакторных моделях радиогеохимического поля

Table 2. Rotated factor loadings in two-factors models of radio-metric spatial patterns

Признак Indicator	Тардан Tardan		Обручева Obruchev		Поисковый Poiskovy	
	ГК-1 PC-1	ГК-2 PC-2	ГК-1 PC-1	ГК-2 PC-2	ГК-1 PC-1	ГК-2 PC-2
kkK	0,82	-0,53	0,92	0,36	0,61	-0,75
kkU	0,10	0,97	0,03	0,03	0,37	0,89
kkTh	-0,88	-0,33	0,01	0,98	-0,96	-0,13
kkK/kkTh	0,98	-0,04	0,92	-0,39	0,92	-0,32
kkU/kkTh	0,62	0,75	0,02	-0,42	0,83	0,49
kkU/kkK	-0,30	0,90	-0,49	-0,18	-0,06	0,99
%, от общей дисперсии Total variance	50,2	44,4	51,5	30,0	49,5	46,4

Примечание/Note: ГК – главная компонента/PC – principal component.

Многофакторный анализ методом главных компонент в своей основе несет информацию по статистическим характеристикам дисперсии и корреляции. По мнению Ф.П. Кренделева и др., дисперсию радиоактивных и других химических элементов можно рассматривать как реальную меру вероятности появления рудных концентраций в полях метаморфических преобразований пород. При этом «метаморфизм» понимается в широком смысле слова, охватывая региональный и контактовый, а также гидротермальные изменения в окорудном пространстве.

На Тарданском месторождении первая главная компонента имеет ярко выраженный тренд концентрирования калия, сопровождающийся существенным снижением содержания тория (табл. 2). Разнонаправленное поведение этих радионуклидов определило высокий факторный вес и его одинаковый с калием знак калий-ториевого отношения. Уран в данном случае в большей степени выступает как нейтральный элемент, что подчеркивается противоположными знаками факторных нагрузок для уран-ториевого и уран-калиевого отношений. Во второй главной компоненте из трех ЕРЭ своими особенностями распределения контрастирует уран. Однако высокие значения уран-ториевого и уран-калиевого отношений, если не в основном, то во многом, определяются синхронным

снижением калия и тория при практически постоянном калий-ториевом отношении. В пространственном распределении факторной нагрузки первой главной компоненты картируются сублинейные зоны высоких положительных значений (рис. 7, а). По своей радиогеохимической характеристике они больше похожи на продукты щелочного калиевого метасоматоза, чем на геологические тела гранитоидов или пород схожего состава. Во втором случае наблюдался бы синхронный рост содержания калия и тория, а не разные знаки их факторных весов. Положительные ореолы второй главной компоненты сосредоточены в пределах рудного поля и проявляют геологические границы областей развития наиболее обедненных калием и торием пород (рис. 7, б). Таким радиогеохимическим параметрам на площади съемки хорошо подходят мраморизованные известняки, а также низкорадиоактивные скарны [19]. Корреляционный анализ в скользящем статистическом окне не дублирует, а дополняет картину взаимосвязей ЕРЭ. Корреляционные ореолы отрицательных связей наиболее информативной пары (kkK-kkTh) подчеркивают влияние калий-специализированных сублинейных структур на формирование аномальных эффектов в радиогеохимическом поле (рис. 7, в). По всей видимости, в особенностях распределения ЕРЭ на Тарданском месторождении проявили себя два основных момента. Один из них связан с формированием скарнов в блоках карбонатных пород, другой обусловлен наложенными гидротермальными процессами щелочной калиевой направленности на послемагматическом этапе, либо автотасоматической калийшпатизацией краевых частей отдельных массивов таннуольского комплекса [12].

Первая главная компонента гамма-спектрометрического поля рудопроявления Обручева определяет характер сугубо калиевых аномалий без существенного влияния на значения индикаторных отношений содержаний урана и тория (табл. 2). Пространственное распределение факторной нагрузки сложное для геологической интерпретации (рис. 8, а). Относительно крупные ореолы положительных значений единичны, а аномалия на юге участка имеет техногенное происхождение. На карте распределения факторной нагрузки второй главной компоненты обособляются отрицательные ореолы, имеющие связь с гидротермальными процессами (рис. 8, б). Они характеризуются невысокими концентрациями калия и тория с опережающим снижением содержания последнего (табл. 2). Это позволяет идентифицировать данные радиогеохимические аномалии как области окварцевания и кварц-жильные зоны. Одинаковое направление изменений концентраций калия и тория относительно фоновых флуктуаций подтверждается появлением в границах кварц-вмещающих структур контрастных субширотных ореолов высокой положительной калий-ториевой корреляции (рис. 8, в).

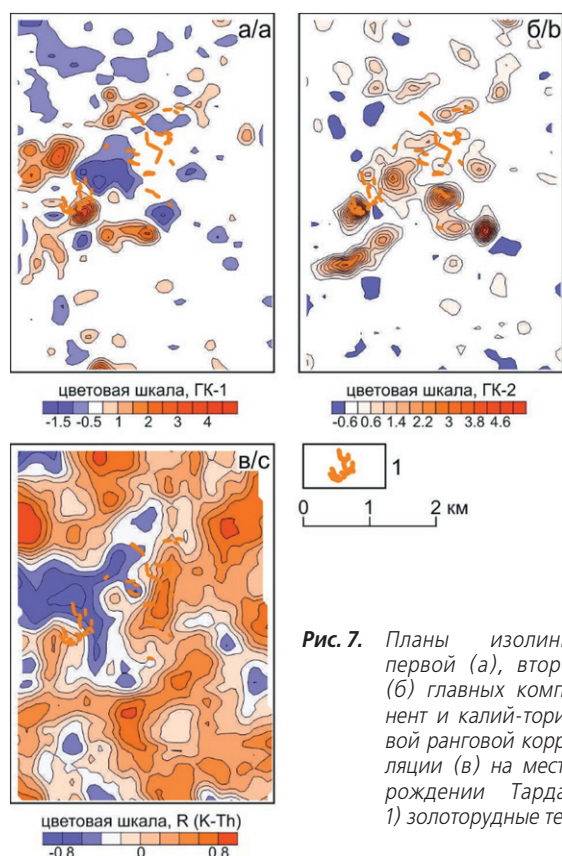


Fig. 7. Contour maps of first (a), second (b) principal components and potassium-thorium rank correlation (c) of the Tardan deposit: 1) gold ore bodies

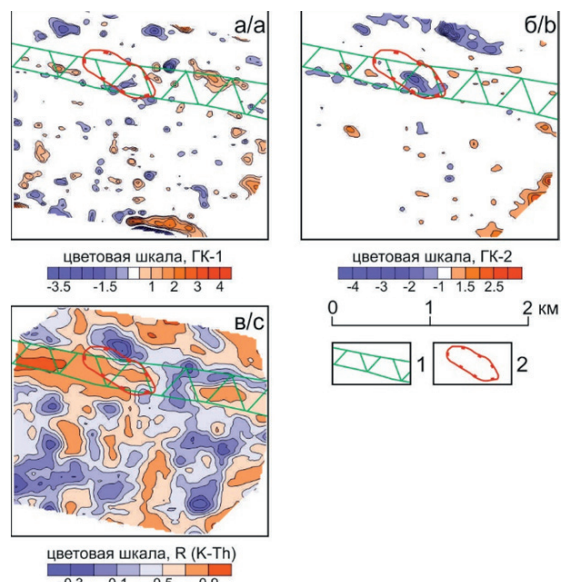


Рис. 8. Планы изолиний первой (а), второй (б) главных компонент и ранговой калий-ториевой корреляции (в) на рудопроявлении Обручева: 1) зоны прожилково-вкрапленной сульфидной и железисто-магнезильно карбонатной минерализации; 2) кварцево-жилвные зоны

Fig. 8. Contour maps of first (a), second (b) principal components and potassium-thorium rank correlation (c) of the Obruchev ore manifestation: 1) zones of streaky-impregnated sulfides and siderite-magnesium carbonate mineralization; 2) quartz-veinous zone

Изучение в Бодайбинском районе состава гидротермалитов гигантского по запасам золота месторождения Сухой Лог показало, что ранний (до-рудный) этап гидротермальной деятельности характеризуется натриевой специализацией. Березитоподобные продукты рудного этапа выделяются обратной тенденцией соотношения натриевых и калиевых слюд. При этом величина отношения содержания мусковит/парагонит находится в прямой зависимости от степени флюидопроницаемости пород и интенсивности потока рудообразующих растворов. Согласно результатам минералого-геохимических исследований, на расположенных близко и схожих геологических условиях небольшого золоторудного месторождения Кавказ и рудопроявления Успенское в распределении минеральных ассоциаций руд и рудовмещающих пород не выявлена гидротермально-метасоматическая зональность [20]. Это обстоятельство принимается как одно из основных доказательств отсутствия наложенных процессов метасоматоза, связанных с внешним источником вещества. Тем не менее, Е.Е. Паленова [20] отмечает, что золоторудные зоны контролируются ореолами повышенного содержания калия. Данный факт объясняется преимущественной локализацией жильных кварцевых и кварц-сульфидных зон в филитовых толщах с относительно высоким содержанием слюд и преобладанием в их составе серицита над парагонитом. Росту содержания калия могла способствовать метаморфическая регенерация мусковита в зонах интенсивного синскладчатого расланцевания. В радиогеохимическом поле рудопроявления Обручева аномалии калиевой специализации местами трассируют периферийные части областей и зон окварцевания, но в целом они не получили значимого распространения. Данный факт наряду с отсутствием выраженных признаков антагонизма калия и тория, характерных для продуктов калиевого метасоматоза, указывает на невысокие промышленные перспективы рудопроявления.

Поисковый участок по гамма-спектрометрическим характеристикам наиболее полно соответствует радиогеохимической модели гидротермальных золоторудных объектов. В значениях обих главных компонент выделяются ореолы развития адуляризованных зон (рис. 9, а, б). Различие двух компонент определяется поведением урана. Параметрами факторных весов первой главной компоненты подчеркивается, что золоторудный гидротермальный процесс сопровождался концентрированием калия и в меньшей степени урана при интенсивном выносе тория (табл. 2). Вторая главная компонента обособляет дисперсию радиогеохимического поля, характеризующегося геохимическим разъединением калия и урана при сравнительно слабой роли тория. Отрицательными значениями картируются зоны опережающего роста содержания калия относительно тория с невысокими уровнями накопления урана. Точки гамма-спектрометрических измерений

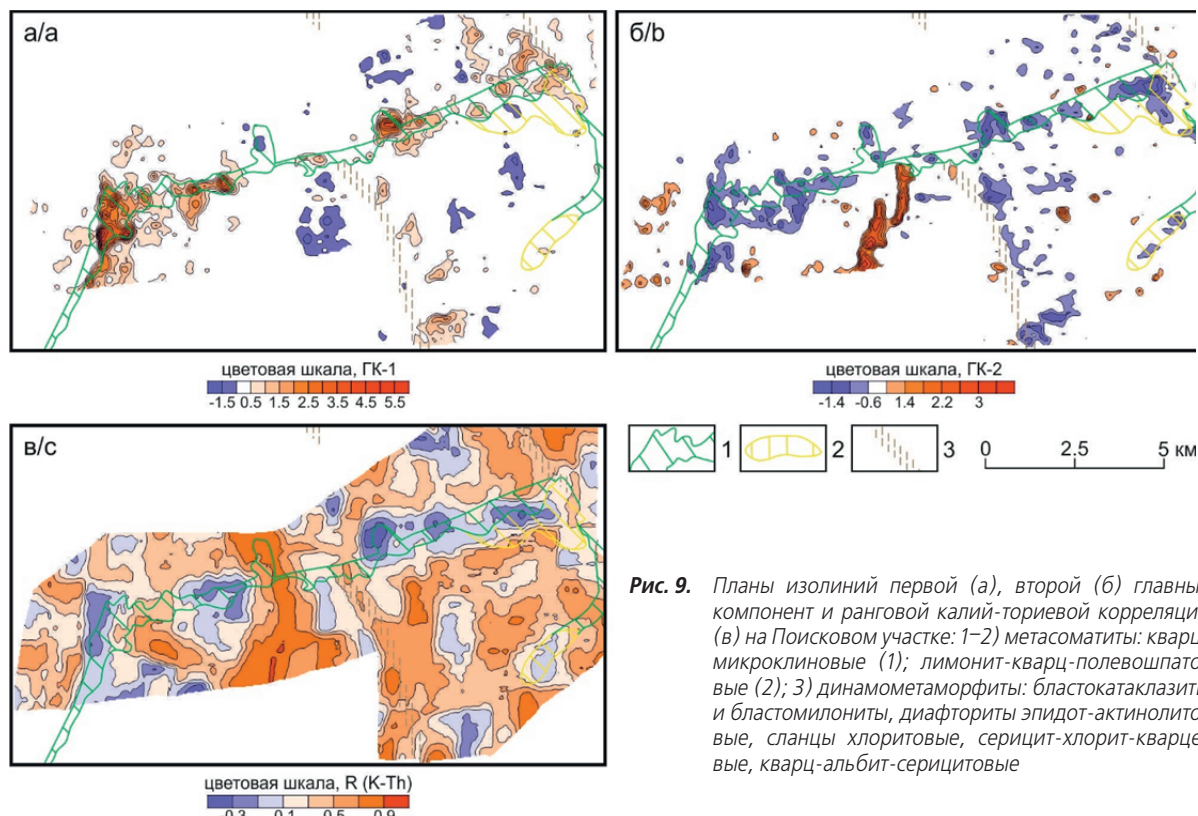


Рис. 9. Планы изолиний первой (а), второй (б) главных компонент и ранговой калий-ториевой корреляции (в) на Поисковом участке: 1–2) метасоматиты: кварц-микроклиновые (1); лимонит-кварц-полевошпатовые (2); 3) динамометаморфиты: бластокатаклазиты и бластомилониты, диафориты эпидот-актинолитовые, сланцы хлоритовые, серицит-хлорит-кварцевые, кварц-альбит-серицитовые

Fig. 9. Contour maps of first (a), second (b) principal components and potassium-thorium rank correlation (c) of the Poiskovy study area: 1–2) hydrothermal alterations: quartz-microcline (1), limonite-quartz-feldspathic (2); 3) dynamic metamorphism: blastomylonite and blastomylonite, epidote-actinolite diaphorite, chlorite, sericite-chlorite-quartz and quartz-albite-sericite schist's

калий-урановой и калиевой специализации нередко в пространстве смешаны между собой. Поэтому в результате интерполяции данных конфигурация и положение «рудных» аномалий второй и первой главной компонент во многом совпадают. Возможно, разделение аномального радиогеохимического поля на две компоненты в какой-то мере обусловлено особенностями радиогеохимической зональности гидротермалитов. Однако мы имеем дело с характеристиками вторичных ореолов рассеяния химических элементов. Уран в зоне гипергенеза по сравнению с калием и торием является значительно более активным мигрантом. Отсюда велика вероятность существенного влияния на его распределение гипергенных процессов. Известно, что разделение зон концентраций калия и тория при гидротермально-метасоматических изменениях наиболее явно происходит в крупных трещинах. Поэтому наряду с интенсивностью аномалий главных компонент признаком высокой открытости пронизываемых структур и значительных масштабов деятельности флюидогенных систем является появление крупных ореолов отрицательной калий-ториевой корреляции (рис. 9, в).

Заключение

1. Процедура оценки и учета значений фоновой флуктуации содержаний радиоактивных элементов положительно сказывается на дальнейшем выделении и анализе аномальной составляющей радиогеохимического поля.
2. Изучение особенностей распределения радиоактивных элементов и значений индикаторных отношений удобно проводить совместно с использованием многофакторного дисперсионного анализа методом главных компонент.
3. Главные компоненты гамма-спектрометрического поля позволяют проводить оценку радиогеохимической специализации аномалий, а также определять границы областей и зон с благоприятным для золоторудного процесса структурно-геологическим строением и признаками гидротермально-метасоматических процессов.
4. Применение гамма-спектрометрических поисков гидротермальных рудных месторождений целесообразно не только в аэроварианте при проведении мелко- и среднемасштабных работ, но и как наземный метод при крупномасштабных съемках в условиях литогенных стационарных ландшафтов открытых площадей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рихванов Л.П. Радиогеохимическая типизация рудно-магматических образований (на примере Алтае-Саянской складчатой области). – Новосибирск: Изд-во СО РАН «Гео», 2002. – 536 с.
2. Володькова Т.В. Тренды отношений радиоактивных элементов и природа магматогенных месторождений Приамурья // Литосфера. – 2012. – № 2. – С. 67–89.
3. Dickson B.L., Scott K.M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors // AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics. – 1997. – V. 17. – № 2. – P. 187–200.
4. Кренделев Ф.П., Миронов А.Г., Гофман А.М. Применение гамма-спектрометрических методов для оконтуривания рудных зон в Забайкалье // Геология и геофизика. – 1976. – № 8. – С. 67–75.
5. Shives R.B.K., Charbonneau B.W., Ford K.L. The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry – recognition of alteration related to mineralization // Geophysics. – 2000. – V. 65. – № 6. – P. 2001–2011.
6. Ефимов А.В. Мультипликативный показатель для выделения эндогенных руд по аэрогамма-спектрометрическим данным // Методы рудной геофизики. Гамма-спектрометрия при поисках рудных месторождений. – Л.: Геофизика, 1978. – С. 40–43.
7. Relation of thorium – normalized surface and aerial radiometric data to subsurface petroleum accumulations / D.F. Saunders, K.R. Burson, J.F. Branch, C.K. Thompson // Radiometric surveys in petroleum exploration: Association of Petroleum Geochemical Explorationists. Special Publication. – 1995. – № 3. – P. 96–110.
8. Maden N., Akaryali E. Gamma ray spectrometry for recognition of hydrothermal alteration zones related to a low sulfidation epithermal gold mineralization (eastern Pontides, NE Türkiye) // Journal of Applied Geophysics. – 2015. – № 122. – P. 74–85.
9. Irvine R.J., Robertson I. Interpretation of airborne geophysical data over Ok Tedi porphyry copper-gold ore body using image processing techniques // Ext. abstr. 5th ASEG Conference Exploration Geophysics. – Sidney, 1987. – V. 8. – P. 103–107.
10. Портнов А.М. О геохимической связи калия и тория в изверженных породах и околорудных метасоматитах // Доклады АН СССР. – 1978. – Т. 239. – № 6. – С. 1441–1444.
11. Dickson B.L., Fraser S.J., Kinsey-Henderson A. Interpretation aerial gamma-ray surveys utilising geomorphological and weathering models // Journal of Geochemical Exploration. – 1996. – № 57. – P. 75–88.
12. Коробейников А.Ф., Зотов И.А. Закономерности формирования месторождений золото-скарновой формации. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2006. – 235 с.
13. Петролого-геохимические черты околорудного метасоматизма в золоторудном месторождении Сухой Лог (Ленский район). Ч. 2. Петрология околорудного метасоматизма / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхоzin // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 28–37.
14. Золоторудные районы и узлы Алдано-Становой металлогенической провинции / А.В. Молчанов, А.В. Терехов, В.В. Шатов, О.В. Петров, К.А. Кукушкин, Д.С. Козлов, Н.В. Шатов // Региональная геология и металлогения. – 2017. – № 71. – С. 93–111.
15. Altdorff D., Dietrich P. Combination of electromagnetic induction and gamma spectrometry using K-means clustering: a study for evaluation of site partitioning // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. – 2012. – № 175. – P. 345–354.
16. Соболев И.С., Чернев Е.М. Отражение глубинного строения юго-восточной части Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции в элементном составе осадочных пород дневной поверхности // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2010. – № 3. – С. 21–29.
17. Chemical diagenesis in near-surface zone above oil fields in geochemical exploration // I.S. Sobolev, N.P. Bredikhin, T. Bratec, A.Yu. Falk, O.S. Tolkahev, L.P. Rikhvanov, P.A. Tishin // Applied Geochemistry. – 2018. – № 95. – P. 33–44.
18. Ranjbar H., Masoumi F., Carranza E.J.M. Evaluation of geophysics and spaceborne multispectral data for alteration mapping in the Sar Cheshmeh mining area, Iran // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – V. 32. – № 12. – P. 3309–3327.
19. Рихванов Л.П., Сарнаев С.И., Безходарнова Т.А. Радиогеохимические особенности скарнов // Геохимия. – 1985. – № 3. – С. 300–313.
20. Паленова Е.Е. Минералогия месторождений золота Копыловское, Кавказ, Красное (Артемовский рудный узел, Бодайбинский район): дис.... канд. геол.-минерал. наук. – Миасс, 2015. – 202 с.

Поступила 21.05.2018 г.

Информация об авторах

Соболев И.С., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Орехов А.Н., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Соболева Н.П., кандидат географических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.835.232, 550.84.094.2, 550.8.053

USE OF MULTIVARIATE STATISTICS ELEMENTS FOR GROUND GAMMA-RAY SPECTROMETRY DATA PROCESSING IN EXPLORATION OF HYDROTHERMAL GOLD DEPOSITS

Igor S. Sobolev¹,
geolsob@yandex.ru

Aleksander N. Orekhov¹,
orekhovan@mail.tomsknet.ru

Nadezhda P. Soboleva¹,
sobnadi@yandex.ru

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

The relevance of the research is determined by the requirements of improving the informative value of gamma-spectrometric exploration under the low contrast of radiometric anomalies. Large- and medium-size hydrothermal gold deposits in the developed areas have already been discovered. The prospecting of small gold objects, which poorly manifested in geochemical patterns, requires the use of additional steps for processing gamma-spectrometry data in order to extract «useful» signs from hydrothermal altered rocks. Enhancement of contrast in gamma-spectrometric effects from products of fluid-generating systems is possible due to the analysis of local variability in background content of radionuclides. The complexity of finding the solution for this problem is fed by the simultaneous influence of several strong natural factors on the features of the radiogeochemical field background fluctuation. The main factors are the mineral composition of rocks and landscape-morphological structure of the territories. In order to determine the peculiarities of radioactive anomalies, in addition to the natural radioactive elements content, the K/Th, U/Th and U/K ratios are often attracted. There is a need for their joint analysis, which can be simplified using statistical methods to identify the most informative features and reduce their number.

The main aim is: testing the algorithm of large-scale ground gamma-ray spectrometric surveys data processing with the use of statistics at three hydrothermal gold objects

Methods: surface gamma-spectrometric measurements of ^{40}K , ^{238}U (^{226}Ra), ^{232}Th concentrations; statistical data processing using cluster and multi-factor variance analysis by principal component method

Results. We estimated the features of background fluctuations of natural radioactive elements content. The radiogeochemical peculiarities of gamma-spectrometric anomalies are defined based on multidimensional statistical analysis of concentration coefficients and indicative ratios. The correlation of the radioactive anomalies with wallrock alterations is estimated.

Key words:

Gamma-spectrometry, multivariate statistics, hydrothermal wallrocks, radiogeochemical peculiarities, hydrothermal gold deposits.

REFERENCE

1. Rikhvanov L.P. Radiogeokhimicheskaya tipizatsiya rudno-magmatischenkikh obrazovaniy (na primere Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti) [Radiogeochemical typification of ore-magmatic formations (by the example of the Altai-Sayan folded area)]. Novosibirsk, SB RAS, GEO Publ., 2002. 536 p.
2. Volodkova T.V. Trends of radioactive element ratios and the nature of the magmatogenic deposits of Priamurye. *Lithosphere*, 2012, vol. 2, no. 53, pp. 67–89. In Rus.
3. Dickson B.L., Scott K.M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 1997, vol. 17, no. 2, pp. 187–200.
4. Krendeleev F.P., Mironov A.G., Gofman A.M. *Primenenie gamma-spektrometricheskikh metodov dlya okonturivaniya rudnykh zon v Zabaykalye* [Gamma-ray spectrometry applied to contouring of ore zones in Transbaikalia]. *Russian Geology and Geophysics*, 1976, no. 8, pp. 67–75.
5. Shives R.B.K., Charbonneau B.W., Ford K.L. The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry – recognition of alteration related to mineralization. *Geophysics*, 2000, vol. 65, no. 6, pp. 2001–2011.
6. Efimov A.V. *Multiplikativny pokazatel dlya vydeleniya endogennykh rud po aerogamma-spektrometricheskim dannym* [Multiplicative index for exploration of endogenous ores using aerogamma-spectrometric data]. *Metody rudnoy geofiziki. Gamma-spektrometriya pri poiskakh rudnykh mestorozhdeniy* [Ore geophysics methods. Gamma-ray spectrometry explorations of ore deposits]. Leningrad, Geofizika Publ., 1978. pp. 40–43.
7. Saunders D.F., Burson K.R., Branch J.F., Thompson C.K. Relation of thorium – normalized surface and aerial radiometric data to subsurface petroleum accumulations. Radiometric surveys in petroleum exploration. *Association of Petroleum Geochemical Explorationists*, Special Publication, 1995, no. 3, pp. 96–110.
8. Maden N., Akaryali E. Gamma ray spectrometry for recognition of hydrothermal alteration zones related to a low sulfidation epithermal gold mineralization (eastern Pontides, NE Türkiye). *Journal of Applied Geophysics*, 2015, no. 122, pp. 74–85.
9. Irvine R.J., Robertson I. Interpretation of airborne geophysical data over Ok Tedi porphyry copper-gold ore body using image processing techniques. *Ext. abstr. 5th ASEG Conference Exploration Geophysics*. Sidney, 1987. Vol. 8, pp. 103–107.
10. Portnov A.M. *O geokhimicheskoy svyazi kaliya i toriya v izverzhennykh porodakh i okolorudnykh metasomatitakh* [About geochemical bond of potassium and thorium in igneous rocks and wallrock alterations]. *Reports of USSR Academy of Sciences*, 1978, vol. 239, no. 6, pp. 1441–1444.
11. Dickson B.L., Fraser S.J., Kinsey-Henderson A. Interpretation aerial gamma-ray surveys utilising geomorphological and weathering models. *Journal of Geochemical Exploration*, 1996, no. 57, pp. 75–88.
12. Korobeynikov A.F., Zotov I.A. *Zakonomernosti formirovaniya mestorozhdeniy zoloto-skarnovoy formatsii* [Formation patterns

- of skarn gold deposits]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2006. 235 p.
13. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Petrologic-geochemical features of peri-ore metasomatism in Sukhoi Log gold-ore deposit (Lena region). Part 2. Petrology of wallrock metasomatism. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 28–37. In Rus.
 14. Molchanov A.V., Terekhov A.V., Shatov V.V., Petrov O.V., Kuskushkin K.A., Kozlov D.S., Shatova N.V. Gold ore districts and ore clusters of the Aldanian metallogenic province. *Regional Geology and Metallogeny*, 2017, no. 71, pp. 93–111. In Rus.
 15. Altdorff D., Dietrich P. Combination of electromagnetic induction and gamma spectrometry using K-means clustering: a study for evaluation of site partitioning. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, no. 175, pp. 345–354.
 16. Sobolev I.S., Chernov E.M. Reflection of deep structure in southeastern part of the Western Siberian oil-and-gas bearing province in elemental composition of sedimentary surface rocks. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2010, no. 3, pp. 21–29. In Rus.
 17. Sobolev I.S., Bredikhin N.P., Bratec T., Falk A.Yu., Tolkachev O.S., Rikhvanov L.P., Tishin P.A. Chemical diagenesis in near-surface zone above oil fields in geochemical exploration. *Applied Geochemistry*, 2018, no. 95, pp. 33–44.
 18. Ranjbar H., Masoumi F., Carranza E.J.M. Evaluation of geophysics and spaceborne multispectral data for alteration mapping in the Sar Cheshmeh mining area, Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, vol. 32, no. 12, pp. 3309–3327.
 19. Rikhvanov L.P., Sarnaev S.I., Bezgodarnova T.A. Radiogeokhimicheskie osobennosti skarnov [Radiogeochemical features of skarns]. *Russian Geochemistry*, 1985, no. 3, pp. 300–313.
 20. Palenova E.E. *Mineralogiya mestorozhdeniy zolota Kopylovskoe, Kavkaz, Krasnoe (Artemovskiy rudnyy uzel, Bodaybinskiy rayon)*. Diss. Kand. nauk [Mineralogy of Kopylovskoe, Kavkaz and Krasnoe gold deposits (Artemovskiy ore node, Bodaybo region). Cand. Diss.]. Mias, 2015. 202 p.

Received: 21 May 2018.

Information about the authors

Igor S. Sobolev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Aleksandr N. Orekhov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Nadezhda P. Soboleva, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 620.9

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ (10 кВ) АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Карамов Дмитрий Николаевич^{1,2},
dmitriy.karamov@mail.ru

Наумов Игорь Владимирович^{2,3},
professornaumov@list.ru

Пержабинский Сергей Михайлович¹,
smper@isem.irk.ru

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

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

³ Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, Россия, 664038, Иркутский район, пос. Молодёжный, Молодежный переулок, 1/1.

Актуальность работы обусловлена совершенствованием существующих подходов моделирования отказов элементов электрической сети автономных энергетических систем с возобновляемой распределенной генерацией.

Цель работы: продемонстрировать возможность использования хронологического метода расчета системы при моделировании отказов элементов электрической сети автономных энергетических систем с возобновляемой распределенной генерацией; показать значимость применения многолетних метеорологических рядов при решении задачи определения аварийных отказов воздушных линий 10 кВ, осуществляющих передачу электрической энергии потребителю; выявить закономерности между временными интервалами, с учетом значений актинометрических и ветроэнергетических показателей, при которых происходит генерация, и количеством отказов рассматриваемых элементов электрической сети.

Методы. Представленный подход поэтапно выстроен на главенствующих положениях теории системных и мультидисциплинарных исследований с использованием апробированных математических моделей, позволяющих обрабатывать и моделировать как актинометрические (прямую, рассеянную и суммарную солнечную радиацию), так и ветроэнергетические показатели с фиксированным дискретным шагом и привязкой к реальной местности. В работе используются общеизвестные модели статистической обработки информации и генерирования случайных чисел при определении возможных аварийных отказов элементов электрической сети. Применяется высокоуровневый язык программирования Matlab.

Результаты. Проведен анализ отказов воздушных линий электропередачи в регионах РФ и Норвегии. Исследованы закономерности этих отказов, а также приведены их основные причины и процентные соотношения. Представлены наиболее распространенные подходы к моделированию возможных отказов ВЛ – 10 кВ. Описаны основные логические условия предлагаемого авторами подхода. Получены численные результаты моделирования возможных отказов воздушных линий 10 кВ в рамках автономных энергетических систем с возобновляемой распределенной генерацией. Результаты получены на основании расчета виртуальной автономной энергетической системы, условно расположенной в населенном пункте Узуры Ольхонского района Иркутской области.

Ключевые слова:

Возобновляемые источники энергии, распределенная генерация, автономные энергетические системы, прогнозирование, солнечная радиация, ветроэнергетический потенциал, хронологический метод.

Введение

Современный этап развития мировой энергетики сопровождается значительным ростом мощности возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и аккумулирующих устройств, как в централизованных, так и автономных энергетических системах [1]. Естественно, такой рост является следствием сложившейся в последнее время мировой энергетической политики в области экологически чистого производства энергии [2–4].

Стоит подчеркнуть, что в различных регионах мира применение ВИЭ и элементов аккумулирования энергии позволяет решить ряд значимых задач социально-экономического характера [5–8].

К примеру, большое внимание уделяется применению ВИЭ при электрификации сельских территорий, развивающихся стран, где отсутствует централизованное электроснабжение или же оно осуществляется не регулярно [9–14].

Необходимо отметить, что реализация многих проектов, использующих ВИЭ и аккумулирующие устройства в рамках автономных энергетических комплексов, требует рационального размещения объектов генерации с учетом показателей, характеризующих актинометрический и ветроэнергетический потенциал рассматриваемой территории. В доказательство данному положению отметим, что большинство генерирующих объектов, исполь-

зующих ВИЭ, расположены в определенных локациях, имеющих более приемлемые уровни актинометрических, ветроэнергетических и других показателей, по сравнению с непосредственным расположением у потребителя. Данная концепция развития энергетики известна как *малая распределенная генерация*, получившая распространение как в научно-исследовательских работах прикладного характера, так и на практике, в рамках различных программ развития и электрификации удаленных и труднодоступных сельских территорий различных регионов мира.

При этом ряд мировых исследовательских коллективов, энергетических департаментов и агентств выделяют определенный перечень задач, требующих особого внимания при использовании ВИЭ в автономных энергетических системах с *распределенной генерацией*. Основной из этих задач является определение показателей надежности как отдельных элементов электрической сети среднего уровня напряжения, так и объектов *распределенной генерации* автономных энергетических комплексов, где в качестве основного генерирующего оборудования используются ВИЭ [15–18].

Стоит отметить, что по своей специфике небольшие автономные энергетические системы с *распределенной генерацией* имеют схожие классификационные показатели с традиционными сельскими электрическими сетями, например, такие, как большая протяженность и разветвленность воздушных линий 6–10 кВ в России и 11–22 кВ за рубежом. Кроме того, рассматриваемые электрические сети относятся к сетям с низким уровнем наблюдаемости, что в достаточной мере снижает быстроту локализации поврежденных участков при устойчивых аварийных отключениях [19, 20].

Воздушные линии электропередачи 10 кВ, расположенные в сельской местности, подвержены влиянию множества внешних факторов (природно-климатические, антропогенные и т. д.), снижающих надёжность воздушных линий (ВЛ) и приводящих к их отказам и, как следствие, к соответствующему недоотпуску электрической энергии потребителям [21–23]. Основными причинами возникновения отказов в линиях электропередачи данного уровня напряжений является повреждение их конструктивных составляющих, таких как высоковольтные изоляторы, разрядники и другой линейной арматуры, а также возможное перекрытие изоляции [22, 23].

В связи с тем, что ВЛ электропередачи являются одним из основных элементов электрических сетей автономных энергетических систем с ВИЭ, превентивная оценка их повреждаемости на основе моделирования, прогнозирования и анализа позволяет существенно повысить эффективность электроснабжения еще на стадии проектирования, а также запланировать необходимые организационно-технические мероприятия, как для улучшения условий эксплуатации, так и для создания необходимого складского резерва.

Показатели аварийности воздушных линий

Анализ показателей аварийности электрических сетей позволяет выявить ряд особенностей и закономерностей, связанных с условиями их эксплуатации [24]. Большую практическую и научную значимость имеют ежегодные статистические отчеты энергетических компаний, осуществляющих эксплуатацию электрических сетей с разным уровнем напряжения [21]. При этом следует отметить, что такие ежегодные отчеты, как правило, отображают информацию о электрических сетях с уровнем напряжения свыше 110 кВ, в то время как подобная информация по электрическим сетям с более низких напряжений не всегда доступна.

В качестве примера рассмотрим основные показатели аварийности в электрических сетях Норвегии, используя информацию ежегодных отчетов, включающих как количественную оценку перерывов электроснабжения вследствие отказов, так и качественное обоснование событий, произошедших в рассматриваемых сетях [25]. При этом следует отметить, что, если в России диапазон среднего напряжения сети составляет 6, 10 кВ, то в странах ЕС и Скандинавии – 11, 22 кВ.

В настоящее время общая протяженность ВЛ в электрических сетях Норвегии с уровнем напряжения до 22 кВ составляет 59 тыс. километров. При этом обработка ежегодных отчетов показывает, что суммарное количество отказов в электрических сетях данного уровня напряжения в течении последних десяти лет находится в диапазоне от 8793 до 13456 в год [25]. Суммарное количество отказов относительно каждого года и месяца в период с 2007 по 2016 гг. представлено на рис. 1.

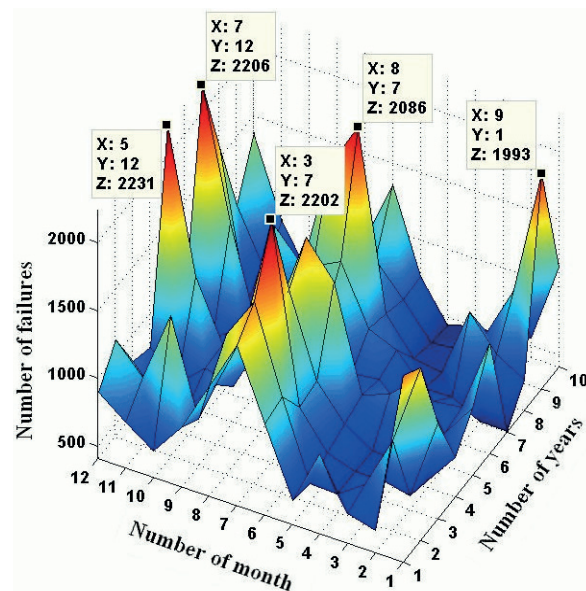


Рис. 1. Количество отказов относительно каждого месяца и года рассматриваемого периода (2007–2016) в электрических сетях Норвегии

Fig. 1. Number of overhead power line failures relative to each month and year of the period under review (2007–2016) in electric networks of Norway

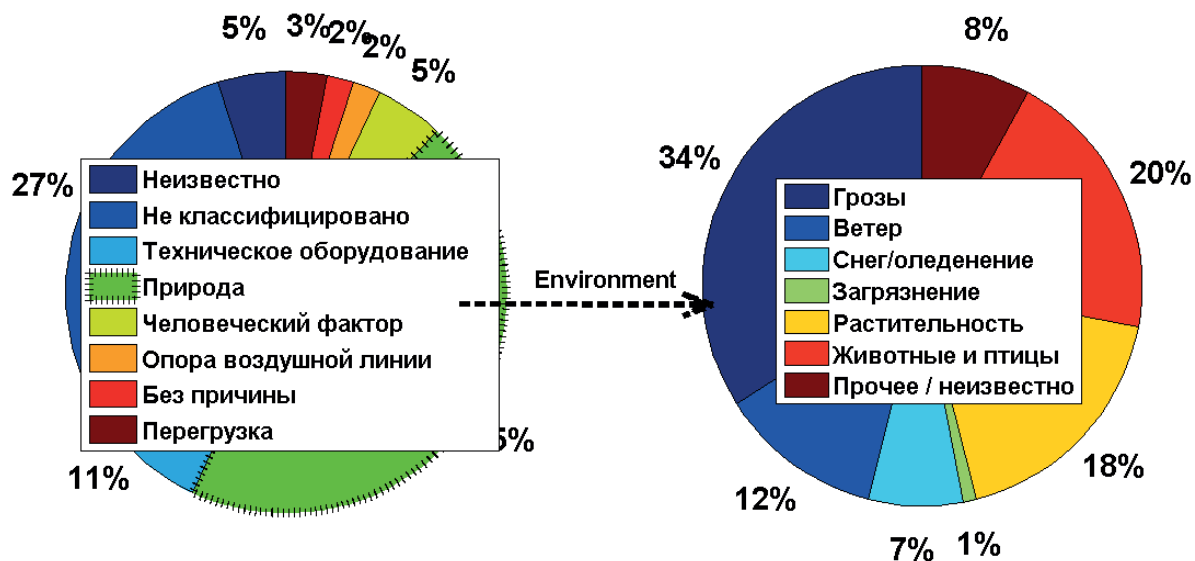


Рис. 2. Диаграмма отказов ВЛ в электрических сетях Норвегии до 22 кВ

Fig. 2. Diagram of overhead line failures in distribution networks of Norway up to 22 kV

Как видно из рис. 1, наибольшее количество отказов наблюдается в зимний и летний период. Основная часть аварийных отключений в электрических сетях Норвегии связана природно-климатическими изменениями в эти периоды, например, такими, как *грозовая деятельность, ветровая нагрузка, снегопады, гололёдно-изморозевые отложения, загрязнение, повреждения, вызванные различной растительностью, птицы/животные и прочее* [26].

Характер возникновения аварийных отключений в процентном соотношении представлен на рис. 2.

Следует отметить, что около трети из общего числа отказов невозможно классифицировать. При этом, как отмечается отдельными исследовательскими коллективами, половина из не классифицированных отказов также связана с различного рода комбинациями *природно-климатического воздействия* [23, 27].

Анализ статистики повреждаемости электрических сетей аналогичного уровня напряжений в различных регионах Сибирского Федерального округа РФ показывает, что от 35 до 44 % из общего числа аварийных отказов ВЛ 10 кВ приходится на сдвиг проводов в результате действия ветровой нагрузки, а также их обрыв в следствии воздействия разного рода не предусмотренных дополнительных механических нагрузок. Следует отметить, что сдвиг проводов ВЛ под действием *ветровой нагрузки* обусловлен различной амплитудой колебания фазных проводников вследствие изменяющейся по разным причинам стрелы провеса провода. К дополнительным механическим нагрузкам можно отнести *гололёдно-изморозевые отложения*, которые приводят к существенному уве-

личению массы провода и соответствующему обрыву проводов ВЛ. *Грозовая активность* приводит к перекрытию изоляции и коротким замыканиям, что вызывает отключение участков ВЛ действием релейной защиты. Кроме того, аварийные отказы ВЛ 10 кВ происходят и по причине разрушения изоляторов вследствие разного рода статических и динамических нагрузок. Такие отказы составляют от 24 до 35 % всех событий отказов в рассматриваемых электрических сетях.

Отдельно стоит выделить отказы, которые были не классифицированы вследствие самоустранения или не имеющие сопутствующих факторов, указывающих на причину возникновения. В данном случае данные по этим отказам существенно разнятся в зависимости от рассматриваемого региона и составляют от 7 до 46 % [22, 28, 29].

В качестве наглядного примера рассмотрим основные причины возникновения отказов ВЛ 10 кВ Восточных электрических сетей Иркутской электросетевой компании (ВЭС ИЭСК), общая протяженность которых в настоящее время составляет около 9 тыс. км [30].

На рис. 3 представлено количество отказов ВЛ 10 кВ по причине механического повреждения и сопутствующего выхода из строя изоляторов, а также разрушения опоры. Визуализированные данные были получены на основании соответствующей обработки и анализа диспетчерских журналов, отражающих аварийные ситуации в течение последних 10 лет [31].

На рис. 4 показано количество отказов ВЛ 10 кВ по причине разного рода повреждений проводов, в т. ч. обрыва вследствие механических нагрузок, а также суммарное количество отказов ВЛ 10 кВ ВЭС ИЭСК на протяжении 10 лет [31].

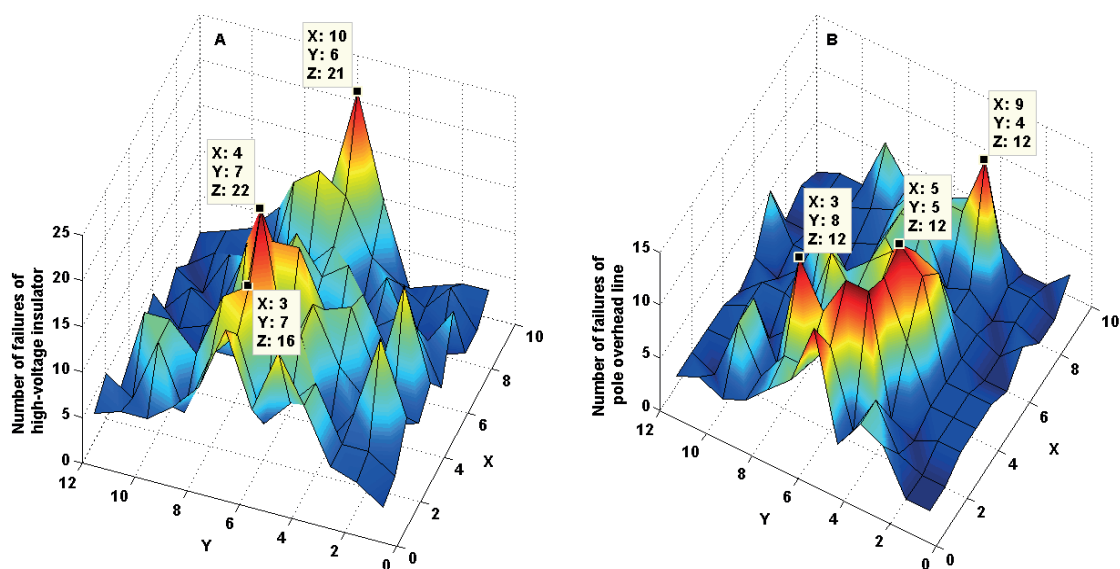


Рис. 3. А – Количество отказов изоляторов, В – повреждение опор ВЛ – 10 кВ на протяжении 10 лет. X – номер года, Y – номер месяца

Fig. 3. А – Number of failures of high-voltage insulator; В – number of failures of pole overhead line for 10 years. X – number of year, Y – number of month

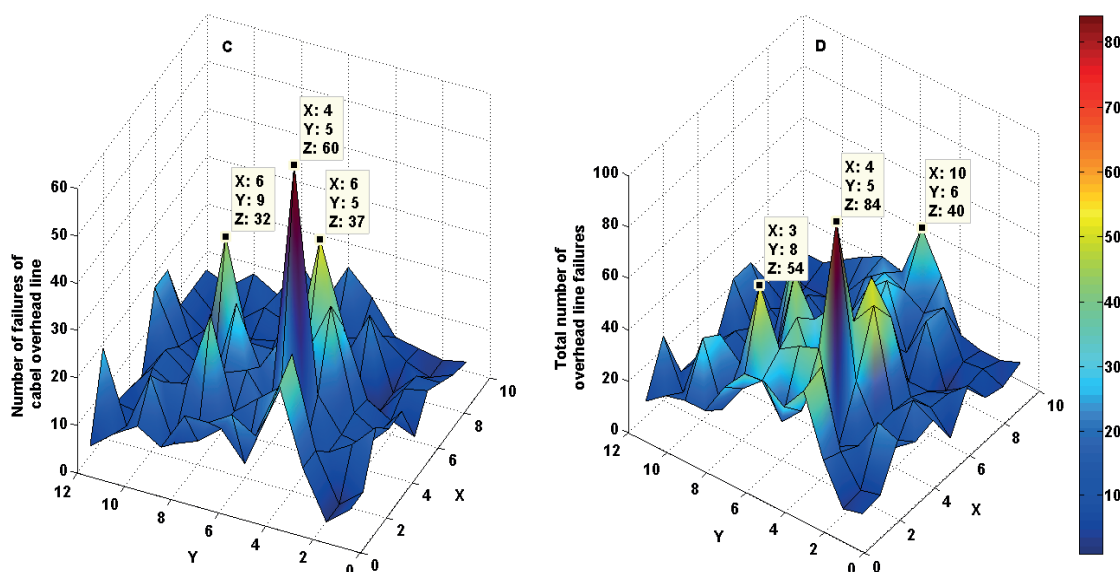


Рис. 4. С – количество отказов высоковольтных проводов, D – суммарное количество отказов ВЛ – 10 кВ на протяжении 10 лет. X – номер года, Y – номер месяца

Fig. 4. C – Number of failures of cable and D – total number of failures of overhead line for 10 years. X – number of year, Y – number of month

Как видно из рис. 1–4, характер возникновения событий отказов в электрических сетях России и Норвегии имеет схожий характер. Кроме того, приведённый анализ процентного соотношения различных повреждающих факторов, приводящих к отказу ВЛ, имеет непосредственную связь с территориальными особенностями региона, его природно-климатическими показателями, а также с техническим оснащением ВЛ средствами управления [32–34]. Вместе с этим следует отме-

тить, что в расчете на 100 км протяженности ВЛ (по результатам обработки ежегодных статистических отчётов энергетических компаний) в среднем за год в электрических сетях в различных регионах РФ количество отказов составляет от 15 до 75, в то время как в Норвегии данный показатель равен от 10 до 12 [21, 31, 35]. По мнению авторов статьи, это связано с существенным различием в оснащении рассматриваемых электрических сетей средствами управления.

Наиболее распространённые подходы прогнозирования отказов в электрических сетях напряжением 6–10 кВ

В данном разделе статьи будут представлены наиболее распространённые подходы к прогнозированию возможных отказов ВЛ 6–10 кВ.

Одним из первых и наиболее распространённых способов определения потенциально возможных отказов в электрических сетях 6–10 кВ является подход, основанный на использовании разного рода распределений с наложением определенных правил, условий и зависимостей, отвечающих как за достоверность получаемых результатов, так и за адекватность применяемого инструментария.

1. В [36] отмечается, что число отказов в рассматриваемый месяц может отклоняться от теоретически определенного значения (среднего) как в меньшую, так и большую сторону. При этом справедливо отмечено, что число отказов находится в относительной близости к математическому ожиданию, в качестве которого принимается среднее количество отказов в месяц за рассматриваемый расчетный период, и имеет характер нормального закона распределения. Подтвердить данное утверждение можно с помощью правила *трех сигм* основной смысл которого состоит в том, что вероятность отклонения случайной величины от своего математического ожидания на большую величину, чем утроенное среднее квадратичное отклонение, практически равна нулю. Данное правило справедливо только для случайных величин, распределенных по нормальному закону. При этом основные параметры распределения, такие как математическое ожидание $M_{k,t}$ и среднее квадратичное отклонение $\sigma_{k,t}$ для k -го элемента относительно месяца t и i -го года расчетного периода определяется следующим образом.

$$M_{k,t} = \frac{\sum_{i=1}^n y_{k,t,i}}{n},$$

$$\sigma_{k,t} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{k,t,i} - M_{k,t})^2}{n-1}},$$

где $y_{k,t,i}$ – суммарное количество отказов k -го элемента относительно месяца t и i -го года расчетного периода; n – количество лет расчетного периода.

Отсюда следует, что математическое ожидание количества отказов за месяц не будет превышено с вероятностью 50 %, что является недостаточным значением. Таким образом, как отмечается в [37], следует использовать прогнозирование количества отказов с доверительной вероятностью 95 %. Следовательно, ограничение площади фигуры с последующим использованием функции Лапласа позволяет определить количество отказов, которое не будет превышено с вероятностью 95 %. Более детально предлагаемый подход описан в [36, 37].

2. В работах [29–31] применяется подход, где на основании матрицы отказов относительно месяца t и i -го года расчетного периода производится разбиение на необходимое количество интервалов с последующим расчетом наблюдаемых частот и выбором наиболее подходящего закона распределения. При этом закон распределения подбирается с помощью программы *Statistica 6.0* с последующей проверкой выбранного закона на адекватность по критерию *Хи-квадрат*, суть которого заключается в сравнении ожидаемых частот появления потенциально возможных событий с фактическими наблюдаемыми частотами. На основании работ [29–31] были получены результаты, в которых экспоненциальное распределение является наиболее пригодным при прогнозировании возможных отказов ВЛ 6–10 кВ. При этом данный закон распределения описывается функцией плотности распределения вероятности, которая имеет следующий вид.

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x},$$

где λ – параметр потока отказов рассматриваемого элемента.

Далее, как и в [36, 37], используется квантиль доверительной вероятности 95 %, а вероятность возникновения отказа рассматриваемого элемента описана следующим образом

$$P = F(x) = \int_0^{a_{0,95}} f(x) dx,$$

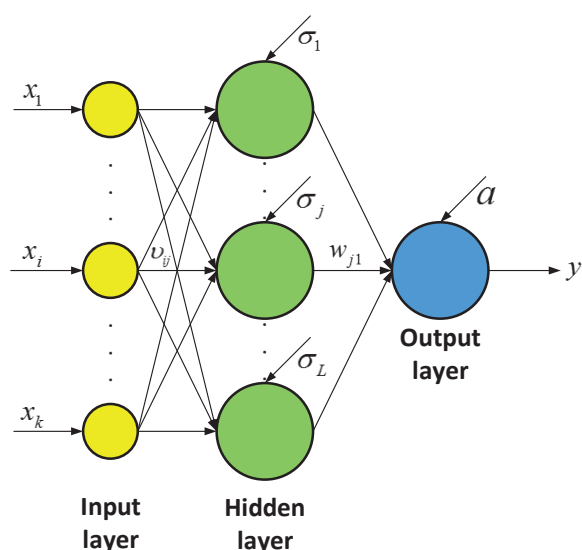
где $F(x)$ – функция распределения отказов; $f(x)$ – функция плотности распределения отказа.

Следовательно, решая уравнение относительно неизвестной $a_{0,95}$, становится возможным определить количество отказов относительно месяца t и i -го года расчетного периода.

3. Одним из наиболее интересных и перспективных способов прогнозирования возможных отказов элементов электрической сети является использование подходов, основанных на методах нейросетевого моделирования. В данном случае большое внимание уделяется многолетним рядам, описывающим состояние элементов электрической сети, как в моменты нормальной работы системы, так и в случаях отказов с учетом времени его устранения, уровнем нагрузки в момент аварии, количеством потребителей и других эксплуатационных параметров [38].

На рис. 5 показана структура искусственной нейронной сети с обратным распространением ошибки [38].

Использование искусственной нейронной сети в качестве инструмента, позволяющего прогнозировать возможные отказы элементов системы электроснабжения, демонстрирует достаточно точные результаты. Данный вывод базируется на результатах, полученных в [38], где ошибка между прогнозируемыми и реальными наблюдаемыми значениями не превышает 7 %.



- x_1, x_i, x_k – входные сигналы/input signals;
- v_{ij} – вес от нейрона i до нейрона j / the weight from the neuron i to the neuron j ;
- w_{j1} – вес от нейрона j в скрытом слое к нейрону в выходном слое/the weight from the neuron j in the hidden layer to the neuron in output layer;
- $\sigma_i, \sigma_j, \sigma_L, \alpha$ – пороговые значения нейронов в скрытом и выходном слоях/the thresholds of neuron j in the hidden layer and the neuron in the output layer

Рис. 5. Структура искусственной нейронной сети с обратным распространением ошибки

Fig. 5. Structure of back propagation artificial neural network

Также отметим, что помимо непосредственного использования искусственной нейронной сети много внимания в настоящее время уделяется разного рода гибридным подходам, в которых предполагается использование современных техник анализа временных рядов, методов машинного обучения и нейросетевого моделирования. Одним из таких гибридных подходов является преобразование Гильберта–Хуанга, использование которого на стадии анализа и преобразования исходных данных и последующего обучения искусственной нейронной сети. Такой подход показал значительную эффективность в задачах прогнозирования в энергетике [39, 40].

Стоит отметить, что представленные в рамках данного раздела статьи подходы к прогнозированию возможных отказов элементов электрической сети 6–10 кВ имеют как ряд непосредственных преимуществ, связанных с простотой использования, быстродействием расчета основных показателей, универсальностью, так и определенное количество недостатков, отраженных в точности получаемых результатов, ограниченности первоначальных данных, большой времязатратности и т. д. Естественно, что данные подходы имеют право на существование, так как в зависимости от исходных данных, связанных не только с количественной оценкой, но и с качественными показате-

лями первоначальной информации, выстраивается возможный сценарий использования тех или иных подходов для решения подобного рода задач.

Особенности прогнозирования отказов элементов электрической сети 6–10 кВ в автономных энергетических системах с возобновляемой распределенной генерацией

Как уже было отмечено, в рамках концепции *малой распределенной генерации* подразумевается локализация генерирующих элементов, использующих ВИЭ на определенных территориях, имеющих более приемлемые природно-климатические показатели, такие как суммарная солнечная радиация, скорость ветра на высоте размещения лопастей ветроэнергетической установки (ВЭУ) и т. д. При этом отмечается, что в зависимости от степени удаления элементов генерации от автономной системы электроснабжения, а также значений установленной мощности ВИЭ зависит уровень напряжения элементов электрической сети, производящих преобразование и передачу электрической энергии потребителю [41]. Зарубежный опыт показывает, что при суммарной установленной мощности ветропарка до 2 МВт наиболее оптимальным уровнем напряжения является 11 кВ, с 2 до 6 МВт – 11–22 кВ от ВЭУ, объединенных в отдельные группы, и т. д. вплоть до 10 МВт [42].

Важной отличительной чертой, существенно усложняющей прогнозирование возможных отказов элементов электрической сети среднего уровня напряжения в автономных системах электроснабжения с *распределенной генерацией*, использующей ВИЭ, является наличие стохастической осциллирующей составляющей производства электрической энергии. Таким образом, необходимо учитывать временные интервалы, в пределах которых энергия от источников не поставляется потребителю из-за низких значений природно-климатических составляющих, выступающих в роли первичных двигателей для элементов генерации, а также в ночное время, когда фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) не работают.

Подобная постановка задачи требует детализированной первоначальной природно-климатической информации, имеющей ярко выраженный циклический характер. При этом необходимо учитывать фактические значения прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации, а также скорость ветра исходя из года, месяца, дня и часа расчетного периода.

Поэтому, исходя из представленных положений, предлагается использовать *хронологический метод* расчета автономной энергетической системы с *распределенной генерацией* на ВИЭ, который, по мнению многих исследовательских коллективов, является одним из эффективных способов решения задач, в которых большую роль играет хронологическая составляющая [43–48].

Содержательное описание предлагаемого подхода

При определении фактических значений актинометрических и ветроэнергетических показателей относительно каждого временного интервала расчетного периода используются многолетние метеорологические ряды с международными кодами *FM 12 Synor* или *METAR*. Главным свойством предлагаемого подхода является полное сочетание хронологического метода расчета системы с многолетними метеорологическими рядами, которые в своей природе учитывают последовательность смен метеопараметров. Более того, так как все метеорологические параметры зафиксированы одно временно, это неявным образом учитывает корреляцию между ними.

На первом этапе определяются природно-климатические показатели в зависимости от рассматриваемой территории. Рассчитываются значения прямой $\dot{I}_b(t)$, рассеянной $\dot{I}_d(t)$ и соответственно суммарной $\dot{I}_t(t)$ солнечной радиации относительно каждого временного интервала с учетом фактической облачности и других природно-климатических показателей на рассматриваемой территории. Аналогичным образом определяются значения скорости ветра $v_{wind}(t)$, давления $p_{air}(t)$, температуры воздуха $T_{air}(t)$ относительно каждого временного интервала расчетного периода.

Использование многолетних метеорологических рядов, находящихся в открытом доступе с международными кодами *FM 12 Synor* и *METAR* для определения не только актинометрических и ветроэнергетических показателей, но и в целом в воспроизведении природно-климатической обстановки на рассматриваемой территории с последующей интеграцией в задачи системного характера, является отдельным самостоятельным исследованием [49, 50].

После того как определены временные интервалы, в которых

$$\dot{I}_b(t), \dot{I}_d(t), \dot{I}_t(t) > 0, \quad v_{wind}(t) \geq v_{wind}^{\min},$$

рассчитываются фактические значения генерации ВЭУ исходя из ветроэнергетических показателей на рассматриваемой территории и технических характеристик используемого оборудования относительно каждого временного интервала (t)

$$P_{WT}(t) = \left[\zeta_{WT} \left\{ \frac{P_{WT}^{ins}}{v_{wind}(t), \rho_{air}(t), p_{air}(t), T_{air}(t)} \right\} \right],$$

где ζ_{WT} и ξ_{n-WT} – логические числовые операторы, описывающие генерацию ВЭУ в зависимости от технических характеристик используемого оборудования и природно-климатических показателей: P_{WT}^{ins} – установленная мощность одной ВЭУ; η_{WT} – КПД; n_{WT} – количество ВЭУ; $v_{wind}^{\min}$ – скорость ветра, при которой происходит страгивание лопастей; $v_{wind}^{\max}$ – максимальная скорость работы и других природно-климатических показателей, включая плотность воздуха $\rho_{air}(t)$.

Аналогичным образом рассчитывается генерация ФЭП

$$P_{PV}(t) = \left[\zeta_{PV} \left\{ \frac{P_{PV}^{ins}}{\xi_{n-PV} \left\{ T_{air}(t), T_{PV}(t), \dot{I}_b(t), \dot{I}_d(t), \dot{I}_t(t) \right\}} \right\} \right],$$

где P_{PV}^{ins} – установленная мощность одного ФЭП; η_{PV} – КПД; n_{PV} – количество ФЭП; S_{PV}^{ins} – установленная площадь ФЭП, а также упомянутые ранее природно-климатические показатели, включая изменение рабочей температуры ($T_{PV}(t)$) ФЭП.

После того, как определены временные интервалы, в которых $P_{WT}(t) \geq v_{wind}^{\min}$, $P_{PV}(t) > 0$, происходит моделирование потенциально возможных отказов ВЛ 6–10 кВ:

$$F_{OL}(t) = \left\{ \begin{array}{l} 0; P_{WT}(t) < v_{wind}^{\min} \wedge P_{PV}(t) = 0 \\ R_n(t); P_{WT}(t) \geq v_{wind}^{\min} \wedge P_{WT}(t) > 0 \end{array} \right\},$$

где $F_{OL}(t)$ – вектор, характеризующий возможный отказ ВЛ; $R_n(t)$ является датчиком, генерирующим случайные числа относительно каждого временного интервала (t), в котором выполняется условие $\dot{I}_b(t), \dot{I}_d(t), \dot{I}_t(t) > 0, v_{wind}(t) \geq v_{wind}^{\min}$.

При этом если $R_n(t) \leq Q_f$, где Q_{f-OL} – вероятность отказа ВЛ, то $F_{OL}(t) = 1$, что свидетельствует об отказе ВЛ с последующим простоем на время выполнения ремонтных мероприятий t_r .

Представленный алгоритм выполняется на протяжении всего количества лет метеорологических наблюдений с определением числовых значений возможных отказов ВЛ 6–10 кВ, относительно i -го месяца и k -го года расчетного периода с последующим осреднением полученных результатов в зависимости от выполняемого номера расчета из серии. При этом для более корректной оценки возможных отказов рассматриваемых элементов серию расчетов следует выполнять не менее 100 тысяч итераций.

Объект исследования

В качестве наглядного примера рассмотрим виртуальную автономную систему электроснабжения с распределенной генерацией, использующей ВИЭ, условно расположенной в населенном пункте (н.п.) Узуры Ольхонского района Иркутской области. Анализ природно-климатических показателей производится на программно-вычислительном комплексе «Локального анализа параметров окружающей среды и солнечной радиации», основные моменты работы которого детально описаны авторами в [49, 50]. В представленном н.п. расположена метеорологическая станция, фиксирующая и передающая погодную сводку с международным кодом *FM 12 Synor*. К настоящему времени период метеорологических наблюдений составляет 12 лет.

На рис. 6 показана прямая, рассеянная и суммарная солнечная радиация в н.п. Узуры на протяжении 12 лет расчетного периода.

Пересчет скорости ветра на высоту размещения лопастей ВЭУ выполняется по общеизвестному выражению, которое имеет следующий вид.

$$v_{wind}(t) = v_{wind}^{10}(t) \left(\frac{H_1}{H_0} \right)^k,$$

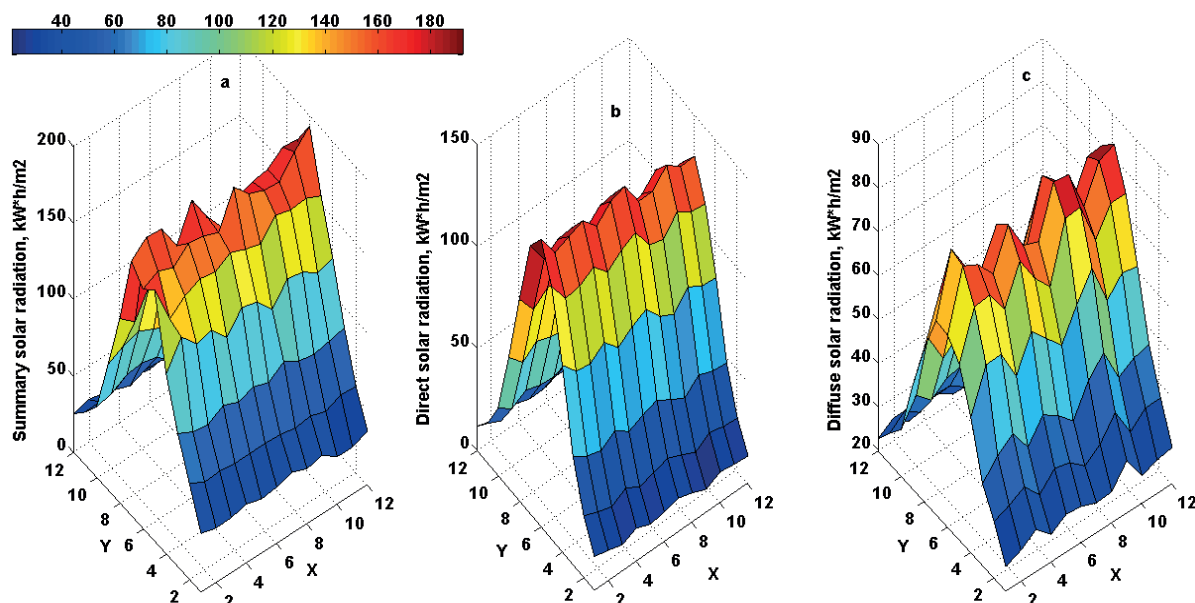


Рис. 6. а) суммарная; б) прямая; в) рассеянная солнечная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность в н.п. Узуры на протяжении 12 лет расчетного периода. X – номер года, Y – номер месяца

Fig. 6. a) summary; b) direct; c) diffuse solar radiation, arriving on horizontal surface in the settlement of Uzury for 12 years of the calculation period. X – number of year, Y – number of month

где v_{wind}^{10} – скорость ветра на высоте измерения (10 м); H_1 – высота размещения лопастей ВЭУ; H_0 – высота измерения скорости ветра; k – эмпирический показатель шероховатости подстилающей поверхности (в работе принимался равным 0,37).

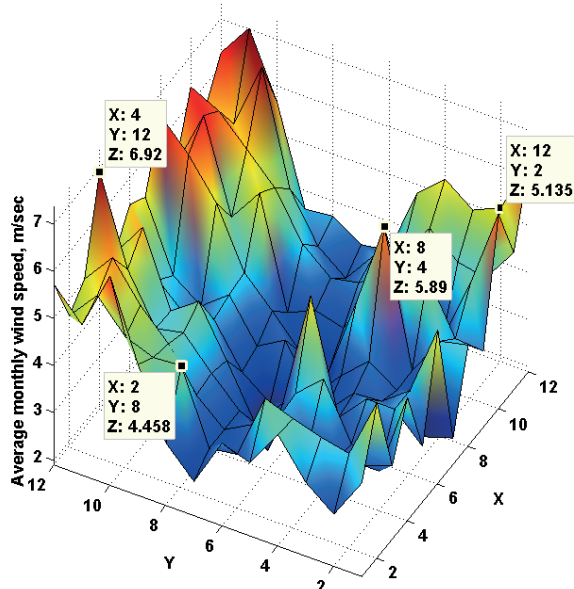


Рис. 7. Среднемесячная скорость ветра на высоте 50 м по месяцам расчетного периода в н.п. Узуры. X – номер года, Y – номер месяца

Fig. 7. Average monthly wind speed at a height of 50 meters in months of the calculation period in Uzury. X – number of year, Y – number of month

На рис. 7 показана характеристика среднемесячных значений скорости ветра на высоте 50 м в

н.п. Узуры на протяжении 12 лет расчетного периода.

Актинометрические и ветроэнергетические показатели были получены путем обработки первоначальной природно-климатической информации с формированием итогового многолетнего массива размерностью 20×105120 (12 лет расчетного периода с шагом один час) для последующего использования при прогнозировании возможных отказов ВЛ 10 кВ.

В качестве первоначальных не изменяющихся данных задается состав генерирующего оборудования, который представлен ВЭУ и ФЭП, расположенными на некотором удалении от потребителя. Связь между элементами генерации и потребителем осуществляется через электрическую сеть напряжением 10 кВ.

В таблице представлены основные технические характеристики ВЭУ и ФЭП, используемых в работе.

Таблица. Технические характеристики рассматриваемых ФЭП и ВЭУ

Table. Technical characteristics of photovoltaic panel (PV) and wind turbines (WT)

ФЭП/PV	P_{PV}^{ins} , кВт/kW	U_{mppt} , В/V	η_{PV} , о.е./p.u.
ТСМ – 250 А	0,250	31	0,19
ВЭУ/WT	P_{WT}^{ins} , кВт/ kW	v_{wind}^{min} , м/с/m/s	η_{WT} , о.е./p.u.
CWEL C 30/250	250	4	0,40

* P_{PV}^{ins} , P_{WT}^{ins} – установленная мощность ФЭП и ВЭУ/installation power of PV and WT; U_{mppt} – напряжение в точке максимальной отбора мощности/voltage of maximum power point tracking; v_{wind}^{min} – стартовая скорость ВЭУ/start wind speed of wind turbines; η_{PV} , η_{WT} – КПД/efficiency.

Определение генерации $P_{PV}(t)$, $P_{WT}(t)$ ФЭП и ВЭУ осуществляется с применением общеизвестных математических моделей, описанных авторами статьи в [47].

При моделировании возможных отказов ВЛ 10 кВ учитывалась статистика рассматриваемого района и других регионов РФ. Следовательно, было принято, что количество отказов на 100 км будет иметь значение 50, а среднее время устранения неисправности равно трем часам [22, 51]. Исходя из рельефных особенностей рассматриваемого в примере района, было принято, что солнечная электростанция суммарной установленной мощностью 1,5 МВт расположена на расстоянии 7 км от потребителя, в то время как четыре ветроэнергетические установки мощностью 0,250 МВт каждая (итого 1 МВт) отдалены от потребителя на 12 км.

Расчет возможных отказов ВЛ 10 кВ для рассматриваемой условной автономной энергетической системы с *распределенной генерацией*, использующей ВИЭ, выполнялся на протяжении 100 тысяч итераций с воспроизведением на каждой итерации как природно-климатической обстановки, отвечающей за возможную выработку электрической энергии ВИЭ, так и самих элементов генерации с соблюдением ряда эксплуатационно-технических ограничений относительно каждого временного интервала (t) на всю длину наблюдаемого метеорологического ряда.

Таким образом, расчетная итоговая матрица, по данным которой формируется количество отказов ВЛ 10 кВ, имеет следующий вид.

$$M = \begin{bmatrix} t & n_1 & n_2 & \dots & n_n \\ t_0 & \chi_{1-0} & \chi_{2-0} & \dots & \chi_{n-0} \\ t_1 & \chi_{1-1} & \chi_{2-1} & \dots & \chi_{n-1} \\ t_2 & \chi_{1-2} & \chi_{2-2} & \dots & \chi_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_n & \chi_{1-105120} & \chi_{2-105120} & \dots & \chi_{n-105120} \end{bmatrix},$$

где n_1 , n_2 , n_n – номера итерации, при этом n_n – 100 тысячная итерация; $\chi_{1-105120}$, $\chi_{n-105120}$ – состояния относительно рассматриваемой итерации n_1 , n_2 , n_n и временного интервала (t), при котором выполняются описанные ранее логические условия.

Таким образом, итоговая размерность расчетной матрицы для рассматриваемой автономной энергетической системы составляет 105120×100000. Время, потраченное на решение задачи при данных условиях, составляет 36 часов. При исследовании использовался компьютер со следующими характеристиками: Intel® Core™ i5–4690, 4x3.50 GHz, 8 Gb RAM.

Обсуждение полученных результатов

Определение потенциально возможного количества отказов ВЛ 10 кВ для условной автономной энергетической системы с *распределенной генерацией*, использующей ВИЭ, для метеоусловий насе-

ленного пункта *Узуры* показало следующие результаты:

1. Среднегодовое количество отказов, полученное на основании 100 тысяч итераций расчета ВЛ 10 кВ, соединяющей потребителя и ФЭП, составляет 3,42, а для ВЭУ данный показатель имеет значение 1,70.
2. Полученные результаты демонстрируют сокращение среднегодового количества отказов на 57 и 52 % по сравнению со статистическими данными отказов, полученных для линий аналогичной длины, находящихся в централизованных системах электроснабжения, численные значения которых составляют 3,26 и 6 отказов в год.
3. Имеются некоторые расчеты из суммарной серии, в которых не наблюдаются отказы ВЛ, при этом единичные расчеты из серии показывают до 6 отказов в год, что является достаточно высоким значением.
4. Осреднение полученных результатов относительно i -го месяца и k -го года расчетного периода распределено достаточно равномерно и составляет 0,038–0,044 для ВЛ-ФЭП и 0,009–0,015 для ВЛ-ВЭУ – рис. 8.

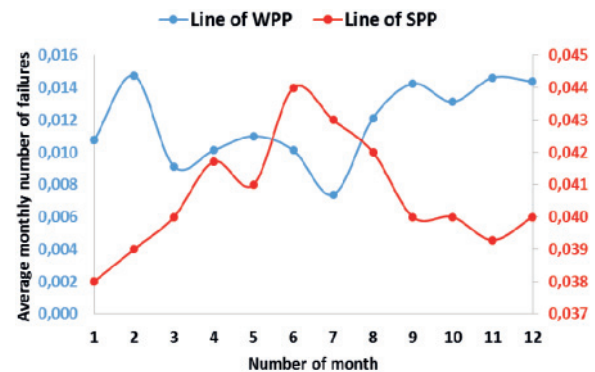


Рис. 8. Среднемесячное количество отказов ВЛ-ВЭУ и ВЛ-ФЭП для н.п. Узуры. WPP – wind power plant, SPP – solar power plant

Fig. 8. Average monthly number of failures of overhead power line 10 kV in Uzury. WPP – wind power plant, SPP – solar power plant

5. Полученные результаты демонстрируют состоятельность предложенного в рамках данной статьи подхода, основанного на определении временных интервалов (t), в которых выполняются описанные ранее логические условия. Число часов, при которых $v_{win}(t) \geq v_{wind}^{min}$ на высоте 50 м относительно 12 лет расчетного периода (105120 часов), составляет 31918 (31 %) часов. Число часов, при которых суммарная солнечная радиация $\dot{I}(t) > 0$ Вт, составляет 54464 (52 %) часов. Характер полученных численных значений отказов ВЛ 10 кВ (рис. 8) в целом совпадает с природно-климатическими показателями на рассматриваемой территории (рис. 6, 7), При этом количество отказов

ВЛ-ФЭП имеет достаточно предсказуемый характер, отражающий поведение Солнца на рассматриваемой территории.

Заключение

В статье представлен подробный обзор наиболее распространенных способов определения и прогнозирования возможных аварийных отказов элементов электрической сети. Выделены их основные преимущества, связанные с простотой и легкостью использования и недостатки, отраженные в относительной сложности, а зачастую невозможности применения в задачах прогнозирования отказов элементов электрической сети автономных систем электроснабжения с *распределенной генерацией*, использующей ВИЭ.

Описаны основные моменты и особенности при решении задачи прогнозирования отказов элементов электрической сети, на концах которой расположены генерирующие источники, описывающиеся стохастическими осциллирующими функциями.

Предложен один из подходов, позволяющих моделировать возможные аварийные отказы элементов электрической сети рассматриваемых энергетических систем. Представленная постановка подразумевает использование общих положений *хронологического метода* расчета энергетической системы с определением основных эксплуатационных параметров отдельных элементов электрической сети, с установленным дискретным шагом относительно i -го месяца и k -го года расчетного периода, с учетом актинометрических показателей, включающих прямую, рассеянную и суммарную солнечную радиацию и ветроэнергетических показателей, необходимых для определения потенциально возможной выработки энергии. Предложен алгоритм решения подобного рода задачи с описанием логических систем.

В качестве наглядного примера была рассмотрена *виртуальная* энергетическая система, условно расположенная по географическим координатам н.п. *Узуры* Ольхонского района Иркутской области. Для определения необходимых природно-климатических показателей использовался программно-вычислительный комплекс «*Локального анализа параметров окружающей среды и солнечной радиации*», где на основании многолетнего метеорологического массива с международным кодом *FM 12 Synop* были определены все необходимые в рамках исследования показатели.

Согласно постановке задачи данного исследования, было принято, что ФЭП и ВЭУ удалены от *виртуальной* энергетической системы на 7 и 12 км в локации с более приемлемыми уровнями актинометрических и ветроэнергетических показателей.

Результаты, полученные на основании серии расчетов из *100 тысяч итераций*, показывают, что среднегодовое количество аварийных отказов

ВЛ 10 кВ, соединяющих ВИЭ с потребителем, на 57 и 52 % меньше по сравнению со статистическими данными отказов, полученных для линий аналогичной длины, находящихся с централизованных системах электроснабжения. Такие результаты показывают, что определение временных интервалов (t), в которых выполняется условие $\dot{I}_b(t), \dot{I}_d(t), \dot{I}_t(t) > 0, v_{wind}(t) \geq v_{wind}^{min}$, имеет непосредственное влияние на моменты, в которые происходит отказ рассматриваемого оборудования. Анализ среднегодового количества отказов ВЛ 10 кВ относительно ФЭП и ВЭУ показывает, что ВЛ 10 кВ от потребителя до ВЭУ в среднем на 50 % меньше выходит из строя по сравнению с аналогичной линией до ФЭП. Численная трактовка данных результатов показывает, что на протяжении 12-летнего расчетного периода (105120 часов) ВЭУ работают 31 % времени, в то время как ФЭП – 52 %, что и объясняет картину полученных результатов.

Предложенный подход можно использовать на стадии предпроектной оценки строительства автономных систем с *распределенной генерацией*, использующих ВИЭ. При этом следует отметить, что подобный подход является достаточно сложным и трудозатратным, поэтому, в случае отсутствия детализированной природно-климатической информации, использование данного подхода, основанного на *хронологическом моделировании системы*, невозможно.

В то же время стоит отметить, что в представленной статье отражены только основополагающие базисные моменты, исследуемые в рамках конкретной задачи с использованием *хронологического метода* расчета системы. Вместе с этим преимущества используемого подхода очевидны, так как наличие определенного временного интервала (t), в котором имеются все необходимые данные, позволяет учитывать как технические мероприятия с определением фактических значений простоя и недоотпуска электрической энергии, так и соответствующие последствия экономического характера

Дальнейшие исследования

Дальнейшие исследования будут направлены на определение разного рода корреляционных связей между показателями отказов элементов электрической сети и совершенствованием представленного в рамках данной статьи подхода. Полученные результаты будут использоваться при решении задачи *балансовой надежности* автономной энергетической системы с *распределенной генерацией*, использующей ВИЭ, где данная система будет представлена как концентрированный узел.

Исследование поддержано проектом III.17.4.1 программой фундаментальных исследований Сибирского отделения Российской академии наук / The research is supported by project III.17.4.1 of Fundamental Research Program of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable energy statistics 2016. URL: http://www.irena.org/Document_Downloads/Publications/IRENA_RE_Statistics_2016.pdf (дата обращения: 25.10.2017).
2. Climate change 2013. The physical science basis. Working Group I. Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. URL: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf (дата обращения: 25.10.2017).
3. Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change. URL: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf> (дата обращения: 25.10.2017).
4. The Paris Agreement. A new framework for global climate action. URL: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573910/EPRS_BRI_\(2016\)573910_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573910/EPRS_BRI_(2016)573910_EN.pdf) (дата обращения: 25.10.2017).
5. Thapar S., Sharma S., Verma A. Economic and environmental effectiveness of renewable energy policy instruments: Best practices from India // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 66. – P. 487–498.
6. Mishra P., Behera B. Socio-economic and environmental implications of solar electrification: Experience of rural Odisha // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 56. – P. 953–964.
7. Dugoua E., Liu R., Urpelainen J. Geographic and socio-economic barriers to rural electrification: New evidence from Indian villages // *Energy Policy*. – 2017. – V. 106. – P. 278–287.
8. Adil A.M., Ko Y. Socio-technical evolution of Decentralized Energy Systems: A critical review and implications for urban planning and policy // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 57. – P. 1025–1037.
9. Govinda R.T., Kalim U.S. Filling the gaps: Policy supports and interventions for scaling up renewable energy development in Small Island Developing States // *Energy Policy*. – 2016. – V. 98. – P. 653–662.
10. Prospects, progress, policies, and effects of rural electrification in Bangladesh / S. Mollik, M.M. Rashid, M. Hasanuzzaman, M.E. Karim, M. Hosenuzzaman // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 65. – P. 553–567.
11. Renewable energy development in rural areas of Iran / N. Afsharzade, A. Papzan, M. Ashjaee, S. Delangizan, S.V. Passel, H. Azadi // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 65. – P. 743–755.
12. Akpan U., Essien M., Isihak S. The impact of rural electrification on rural micro-enterprises in Niger Delta, Nigeria // *Energy for Sustainable Development*. – 2013. – V. 17. – P. 504–509.
13. Gevelt T.V. Rural electrification and development in South Korea // *Energy for Sustainable Development*. – 2014. – V. 23. – P. 179–187.
14. Enabling private sector investment in microgrid-based rural electrification in developing countries: a review / N.J. Williams, P. Jaramillo, J. Taneja, T.S. Ustun // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – V. 52. – P. 1268–1281.
15. Borges C.L.T. An overview of reliability models and methods for distribution systems with renewable energy distributed generation // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2012. – V. 16. – P. 4008–4015.
16. Optimum electricity purchase scheduling for aggregator storage in a reliability framework for rural distribution networks / A. Narimani, G. Nourbakhsh, G.F. Ledwich, G.R. Walker // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2018. – V. 94. – P. 363–373.
17. Adefarati T., Bansal R.C. Reliability assessment of distribution system with the integration of renewable distributed generation // *Applied Energy*. – 2017. – V. 185. – P. 158–171.
18. International Renewable Energy Agency (IRENA). Boosting solar PV markets: the role of quality infrastructure URL: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Quality_Infrastructure_for_Solar_PV_2017.pdf (дата обращения: 25.10.2017).
19. Разгильдеев Г.И., Храмцов Р.А. Показатели надежности систем электроснабжения сельского хозяйства // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2005. – Т. 47. – № 3. – С. 32–34.
20. Разгильдеев Г.И., Ногин Е.В. Показатели надежности электрооборудования распределительных сетей 10-6-0,4 кВ // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2010. – № 6. – С. 85–89.
21. Разгильдеев Г.И., Ногин Е.В. Характеристика распределительных сетей системы электроснабжения Кемеровской области // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2009. – № 5. – С. 65–69.
22. Сукьясова Е.Ю., Сукьясов С.В., Корнаков К.А. Анализ отключений и повреждений в электрических сетях 0,4–10 кВ // *Актуальные вопросы аграрной науки*. – 2016. – № 21. – С. 51–54.
23. Шаулева Н.М., Захарова А.Г., Стариченко Д.К. Влияние погодноклиматических факторов на эксплуатационную надежность распределительных сетей угольных разрезов // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2010. – № 1. – С. 114–116.
24. A fault analysis of 11 kV distribution system (a case study of ado Ekiti electrical power distribution district) / K. Olusuyi, A.S. Oluwole, T. Adefarati, A.K. Babarinde // *Applied Energy*. – 2017. – V. 185. – P. 158–171.
25. StatNet. Årsstatistikk 2007–2016. Driftsforstyrrelser, feil og planlagte utkoplinger i 1–22 kV-nettet. URL: <http://www.statnett.no/Kraftsystemet/Nedlastingssenter/Feilstatistikk> (дата обращения: 25.10.2017).
26. Kjølle G.H. What do fault statistics tell us regarding causes resulting in power outages? Workshop DNV–NTNU 2011–09–27. Risk and vulnerabilities in power systems in light of climate change. URL: https://www.sintef.no/globalassets/project/vulnerability-and-security/publications/presentations/workshop-20110927_fault-statistics.pdf (дата обращения: 25.10.2017).
27. Кудряков А.Г., Сазыкин В.Г., Кравченко И.И. Способ повышения надежности воздушных линий электропередачи // *Успехи современной науки*. – 2016. – № 10. – С. 73–75.
28. Разгильдеев Г.И., Ногин Е.В. Потоки отказов воздушных линий электропередачи при грозах // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2011. – № 1. – С. 69–71.
29. Наумов И.В., Ланин А.В. Анализ уровня надежности сельских распределительных электрических сетей напряжением 10 кВ (на примере филиала Восточных электрических сетей ОАО «ИЭСК») // *Вестник иркутской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2010. – № 40. – С. 115–120.
30. Наумов И.В., Ланин А.В., Ерин В.Н. Математическая модель прогнозирования уровня надежности электроснабжения в электрических сетях 10 кВ // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. – 2011. – № 8. – С. 88–91.
31. Прогнозирование уровня надежности сельских распределительных сетей напряжением 10 кВ / И.В. Наумов, Я.М. Иванов, А.В. Ланин, А.В. Мищенко // *Ползуновский вестник*. – 2014. – № 4. – С. 151–156.
32. Kjølle G.H., Aabø Y., Hjartsjø B.T. Fault statistics as a basis for designing cost-effective protection and control solutions // *Proc. 2002 CIGRE Session*. – 2002. – P. 1–6. URL: https://www.sintef.no/globalassets/project/vern_kontroll-ogautomatisering/cigre_2002.pdf (дата обращения: 25.10.2017).
33. Darveniza M., Saha T.K. The Reliability and Power Quality Performance of Overhead Lines-with Reference to the Electrical Properties of Wood and Covered Conductors // *The 7th International*

- Energy Transmission and Distribution Conference and Exhibition. – Melbourne, 2003. – P. 1–8.
34. Protection System Faults – a Comparative Review of Fault Statistics / G.H. Kjolle, O. Gjerde, B.T. Hjartsjø, H. Engen, L. Haarla, L. Koivisto, P. Lindblad // Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2006. PMAPS 2006. – Stockholm, 2006. – P. 1–7. URL: https://www.sintef.no/globalassets/project/kile/publikasjoner/pmaps_2006_kjolle.pdf (дата обращения: 25.10.2017).
35. Kjolle G.H., Heggset J., Sagen K. FASIT – a tool for collection calculation and reporting of reliability data // 20th International Conference on Electricity Distribution. – Prague, 2005. – P. 8–11.
36. Волков С.В., Рыбаков Л.М. Прогнозирование отказов элементов и аппаратов в распределительной сети 10 кВ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2004. – № 1. – С. 84–89.
37. Рыбаков Л.М., Иванова З.Г. Прогнозирование отказов и планирование резерва запасных элементов, аппаратов и оборудования распределительных электрических сетей 10 кВ // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 1. – С. 104–110.
38. Xie K., Zhang H., Singh C. Reliability forecasting models for electrical distribution systems considering component failures and planned outages // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2016. – V. 79. – P. 228–234.
39. О нейросетевом подходе к прогнозированию нестационарных временных рядов на основе преобразования Гильберта-Хуанга / В.Г. Курбацкий, Д.Н. Сидоров, В.А. Спириев, Н.В. Томин // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 7. – С. 58–68.
40. Прогнозирование нестационарных временных рядов на основе преобразования Гильберта-Хуанга и машинного обучения / В.Г. Курбацкий, Д.Н. Сидоров, В.А. Спириев, Н.В. Томин // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 5. – С. 143–158.
41. Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. – М.: Изд-во «Атмограф», 2008. – 584 с.
42. Kothari D.P., Singal K.C., Ranjan R. Renewable energy sources and emerging technologies (second edition). – New Dehli, PHI Learning Private Limited Publ., 2011. – 456 p.
43. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems / W. Zhou, C. Lou, Z. Li, L. Lu, H. Yang // Applied Energy. – 2010. – V. 87. – P. 380–389.
44. Tina G., Gagliano S., Raiti S. Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment // Solar Energy. – 2006. – V. 80. – P. 578–588.
45. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of wind energy utilization for electricity and heat supply in northern regions of Russia // Renewable Energy. – 2004. – V. 29. – P. 1793–1809.
46. A review of optimum sizing of hybrid PV-Wind renewable energy systems in Oman / A.S.A. Busaidi, H.A. Kazem, A.H. Al-Badi, M.F. Khan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 53. – P. 185–193.
47. Карамов Д.Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – Т. 104. – № 9. – С. 133–140.
48. Оптимизация состава энергогенерирующего оборудования энергетического комплекса нефтегазодобывающего предприятия / А.М. Клер, Э.А. Тюрина, Ю.М. Потанина, А.Ю. Маринченко, С.П. Константинов // Известия Российской Академии Наук. Энергетика. – 2010. – № 3. – С. 92–99.
49. Карамов Д.Н. Математическое моделирование солнечной радиации с использованием многолетних метеорологических рядов находящихся в открытом доступе // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 28–38.
50. Карамов Д.Н. Формирование исходных метеорологических массивов с использованием многолетних рядов FM 12 Супор и METAR в системных энергетических исследованиях // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 1. – С. 69–88.
51. Перспективы повышения электроэнергетического комплекса Кубани. Электрогенерация – совершенствование эксплуатации изношенного электрооборудования / В.Г. Сазыкин, А.Г. Кудряков, С.А. Нетребко, В.В. Пронь. – Краснодар: Изд-во Кубанского государственного аграрного университета, 2012. – 448 с.

Поступила 30.12.2017 г.

Информация об авторах

Карамов Д.Н., кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории исследования энергетических установок № 71 отдела теплосиловых систем № 70 Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук; доцент Иркутского национального исследовательского технического университета.

Наумов И.В., доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и электротехники института энергетики Иркутского национального исследовательского технического университета; профессор Иркутского государственного аграрного университета им. А.А. Ежевского.

Пержабинский С.М., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории методов математического моделирования и оптимизации в энергетике № 93 отдела прикладной математики № 90 Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 620.9

MATHEMATICAL MODELLING OF FAILURES OF ELECTRICAL GRID (10 kV) OF AUTONOMOUS ENERGY SYSTEMS WITH RENEWABLE DISTRIBUTED GENERATION

Dmitriy N. Karamov^{1,2},
dmitriy.karamov@mail.ru

Igor V. Naumov^{2,3},
professornaumov@list.ru

Sergey M. Perzhabinsky¹,
smper@isem.irk.ru

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

² Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

³ Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky,
1/1, Molodezhnaya street, Irkutsk district Molodezhny settlement, 664038, Russia.

Relevance of the work is caused by the improvement of the existing approaches to modeling possible component failures of autonomous power systems with distributed generation using renewable energy sources.

The main aim of the study is to demonstrate the possibility of using the chronological method of calculating the system in modeling possible failures of the elements of the electric grid of autonomous energy systems with distributed generation using renewable energy sources; to show the significance of applying multi-year meteorological series in solving the problem of determining possible emergency failures of 10 kV overhead power lines transmitting electric power to a consumer; to identify possible patterns between the time intervals considering actinometric and wind energy indicators values at which the generation occurs and the number of failures of the elements of the electric network in question.

The methods. The approach introduced was implemented step-by-step on the main provisions of the theory of system and multi-disciplinary studies using the approved mathematical models that allow processing, modeling both actinometric (direct, diffuse, summary solar radiation) and wind energy indicators with a fixed discrete step and binding to the real terrain. The authors use the well-known models of statistical processing of information and generation of random numbers in determining possible emergency failures of electrical network elements. A high-level Matlab programming language is used.

The results. The authors carried out the analysis of overhead power line failures in the regions of Russia and Norway. The patterns of these failures are introduced, and the main causes and their percentages are given. The most common approaches to modeling of possible failures of 10 kV overhead lines are presented. The paper describes the main logical conditions of the approach proposed by the authors. The authors obtained the numerical results of modeling of possible failures of 10 kV overhead power lines in the framework of autonomous energy systems with distributed generation using renewable energy sources. The results were obtained on the basis of calculation of a virtual autonomous energy system conventionally located in the settlement of Uzury in the Olkhon district of the Irkutsk region.

Key words:

Renewable energy sources, distributed generation, autonomous energy systems, forecasting, solar radiation, wind energy potential, chronological method.

The research is supported by the project III.17.4.1 of Fundamental Research Program of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

REFERENCES

1. International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable energy statistics 2016*. Available at: http://www.irena.org/Document_Downloads/Publications/IRENA_RE_Statistics_2016.pdf (accessed 25 October 2017).
2. *Climate change 2013. The physical science basis. Working Group I. Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Available at: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf (accessed 25 October 2017).
3. *Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change*. Available at: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/krpeng.pdf> (дата обращения: 25.10.2017).
4. *The Paris Agreement. A new framework for global climate action*. Available at: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573910/EPRS_BRI_\(2016\)573910_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573910/EPRS_BRI_(2016)573910_EN.pdf) (accessed 25 October 2017).
5. Thapar S., Sharma S., Verma A. Economic and environmental effectiveness of renewable energy policy instruments: Best practices from India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 66, pp. 487–498.
6. Mishra P., Behera B. Socio-economic and environmental implications of solar electrification: Experience of rural Odisha. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 56, pp. 953–964.
7. Dugoua E., Liu R., Urpelainen J. Geographic and socio-economic barriers to rural electrification: New evidence from Indian villages. *Energy Policy*, 2017, vol. 106, pp. 278–287.
8. Adil A.M., Ko Y. Socio-technical evolution of Decentralized Energy Systems: A critical review and implications for urban planning

- and policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 57, pp. 1025–1037.
9. Govinda R.T., Kalim U. S. Filling the gaps: Policy supports and interventions for scaling up renewable energy development in Small Island Developing States. *Energy Policy*, 2016, vol. 98, pp. 653–662.
 10. Mollik S., Rashid M.M., Hasanuzzaman M., Karim M.E., Hosenuzzaman M. Prospects, progress, policies, and effects of rural electrification in Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 65, pp. 553–567.
 11. Afsharzade N., Papzan A., Ashjaee M., Delangizan S., Passel S.V., Azadi H. Renewable energy development in rural areas of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 65, pp. 743–755.
 12. Akpan U., Essien M., Isihak S. The impact of rural electrification on rural micro-enterprises in Niger Delta, Nigeria. *Energy for Sustainable Development*, 2013, vol. 17, pp. 504–509.
 13. Gevelt T.V. Rural electrification and development in South Korea. *Energy for Sustainable Development*, 2014, vol. 23, pp. 179–187.
 14. Nathaniel J. W., Jaramillo P., Taneja J., Ustun T.S. Enabling private sector investment in microgrid-based rural electrification in developing countries: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 52, pp. 1268–1281.
 15. Borges C.L.T. An overview of reliability models and methods for distribution systems with renewable energy distributed generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16, pp. 4008–4015.
 16. Narimani A., Nourbakhsh G., Ledwich G.F., Walker G.R. Optimum electricity purchase scheduling for aggregator storage in a reliability framework for rural distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, vol. 94, pp. 363–373.
 17. Adefarati T., Bansal R.C. Reliability assessment of distribution system with the integration of renewable distributed generation. *Applied Energy*, 2017, vol. 185, pp. 158–171.
 18. International Renewable Energy Agency (IRENA). *Boosting solar PV markets: The role of quality infrastructure*. Available at: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Quality_Infrastructure_for_Solar_PV_2017.pdf (accessed 25 October 2017).
 19. Razgildeev G.I., Khramtsov R.A. Indicators of reliability of power supply systems for agriculture. *Vestnik of Kuzbass State Technical University*, 2005, no. 3, pp. 32–34. In Rus.
 20. Razgildeev G.I., Nogin E.V. Indicators of reliability of electrical equipment of 10-6-0,4 kV distribution grids. *Vestnik of Kuzbass State Technical University*, 2010, no. 6, pp. 85–89. In Rus.
 21. Razgildeev G.I., Nogin E.V. Characteristics of distribution grids of power supply system of Kemerovo region. *Vestnik of Kuzbass State Technical University*, 2009, no. 5, pp. 65–69. In Rus.
 22. Sukyasova E.Yu., Sukyasov S.V., Kornakov K.A. Analysis of trips and injuries in 0,4–10 kV electric networks. *Actual Issues of Agrarian Science*, 2016, no. 21, pp. 51–54. In Rus.
 23. Shauleva N.M., Zakharova A.G., Starinchenko D.K. Influence of weather factors on operational reliability of distribution networks of coal mines. *Vestnik of Kuzbass State Technical University*, 2010, no. 1, pp. 114–116. In Rus.
 24. Olusuyi K., Oluwole A.S., Adefarati T., Babarinde A.K. A fault analysis of 11kV distribution system (a case study of ado Ekiti electrical power distribution district). *Applied Energy*, 2017, vol. 185, pp. 158–171.
 25. StatNet. *Årsstatistikk 2007–2016 Driftsforstyrrelser, feil og planlagte utkoplinger i 1–22 kV-nettet* [The annual statistics provide an overview of errors, interruptions and outcomes during operating disruptions in the Norwegian 1–22 kV (for 2006) and the 33–420 kV network]. Available at: <http://www.statnett.no/Kraftsystemet/Nedlastingssenter/Feilstatistikk> (accessed 25 October 2017).
 26. Kjølle G.H. What do fault statistics tell us regarding causes resulting in power outages? *Workshop DNV–NTNU 2011–09–27. Risk and vulnerabilities in power systems in light of climate change*. Available at: https://www.sintef.no/globalassets/project/vulnerability-and-security/publications/presentations/workshop-20110927_fault-statistics.pdf (accessed 25 October 2017).
 27. Kudryakov A.G., Sazykin V.G., Kravchenko I.I. Method for increasing the reliability of overhead power lines. *Modern Science Success*, 2016, no. 10, pp. 73–75. In Rus.
 28. Razgildeev G.I., Nogin E.V. Failures of overhead transmission lines during thunderstorms. *Vestnik of Kuzbass State Technical University*, 2011, no. 1, pp. 69–71. In Rus.
 29. Naumov I.V., Lanin A.V. The analysis of reliability level of rural 10 kV electricity distribution networks (on the example of the eastern branch of electricity networks of the public cooperation on «IESK»). *Bulletin of the Irkutsk State Agricultural Academy*, 2010, no. 40, pp. 115–120. In Rus.
 30. Naumov I.V., Lanin A.V., Erin V.N. Mathematical model for forecasting the level of reliability of power supply in 10 kV electric grids. *Bulletin of Altai State Agricultural University*, 2011, no. 8, pp. 88–91. In Rus.
 31. Naumov I.V., Ivano Ya.M., Lanin A.V., Mishenko A.V. Forecasting the level of reliability of 10 kV rural distribution grids. *Polzunovskiy vestnik*, 2014, no. 4, pp. 151–156. In Rus.
 32. Kjølle G.H., Aabø Y., Hjartsjø B.T. Fault statistics as a basis for designing cost-effective protection and control solutions. *Proc. 2002 CIGRE Session*, 2002, pp. 1–6. Available at: https://www.sintef.no/globalassets/project/vern_kontroll-ogautomatisering/cigre_2002.pdf (accessed 25 October 2017).
 33. Darveniza M., Saha T.K. The Reliability and Power Quality Performance of Overhead Lines-with Reference to the Electrical Properties of Wood and Covered Conductors. *The 7th International Energy Transmission and Distribution Conference and Exhibition*. Melbourne, 2003. pp. 1–8.
 34. Kjølle G.H., Gjerde O., Hjartsjø B.T., Engen H., Haarla L., Koivisto L., Lindblad P. Protection System Faults—a Comparative Review of Fault Statistics. *Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2006, PMAPS 2006*. Stockholm, 2006. pp. 1–7. Available at: https://www.sintef.no/globalassets/project/kile/publikasjoner/pmaps_2006_kjolle.pdf (accessed 25 October 2017).
 35. Kjølle G.H., Heggset J., Sagen K. FASIT – a tool for collection calculation and reporting of reliability data. *20th International Conference on Electricity Distribution*. Prague, 2005. pp. 8–11.
 36. Volkov S.V., Rybakov L.M. Quantity of failures (refusals) of members and vehicles of a 10 kV distributive network (grid). *Proceedings of higher educational establishments. Energy problems*, 2004, no. 1, pp. 84–89. In Rus.
 37. Rybakov L.M., Ivanova Z.G. Failure and planning reserves of spare parts, apparatus and equipment for 10 kV electric distribution grids. *Bulletin of the Chuvash University*, 2015, no. 1, pp. 104–110. In Rus.
 38. Xie K., Zhang H., Singh C. Reliability forecasting models for electrical distribution systems considering component failures and planned outages. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, vol. 79, pp. 228–234.
 39. Kurbatskii V.G., Sidorov D.N., Spiryaev V.A., Tomin N.V. On the neural network approach for forecasting of nonstationary time series on the basis of the Hilbert–Huang transform. *Automation and remote control*, 2011, no. 7, pp. 58–68.
 40. Kurbatskii V.G., Sidorov D.N., Spiryaev V.A., Tomin N.V. Forecasting nonstationary time series based on Hilbert–Huang transform and machine learning. *Automation and remote control*, 2014, no. 5, pp. 143–158. In Rus.
 41. Nikolaev V.G., Ganaga S.V., Kudryashov Yu.I. *Natsionalny kadastr vetroenegeticheskikh resursov Rossii i metodicheskie osnovy*

- ikh opredeleniya* [National cadaster of Russia wind energy resources and methodology for their determination]. Moscow, Atmosgraph Publ., 2008. 584 p.
42. Kothari D.P., Singal K.C., Ranjan R. *Renewable energy sources and emerging technologies (second ed.)*. New Dehli, PHI Learning Private Limited Publ., 2011. 456 p.
 43. Zhou W., Lou C., Li Z., Lu L., Yang H. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar–wind power generation systems. *Applied Energy*, 2010, vol. 87, pp. 380–389.
 44. Tina G., Gagliano S., Raiti S. Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment. *Solar Energy*, 2006, vol. 80, pp. 578–588.
 45. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of wind energy utilization for electricity and heat supply in northern regions of Russia. *Renewable Energy*, 2004, vol. 29, pp. 1793–1809.
 46. Busaidi A.S.A., Kazem H.A., Al-Badi A.H., Khan M.F. A review of optimum sizing of hybrid PV–Wind renewable energy systems in Oman. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 53, pp. 185–193.
 47. Karamov D.N. Mathematical modelling of an autonomous power supply system using renewable energy sources. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2015, vol. 104, no. 9, pp. 133–140. In Rus.
 48. Kler A.M., Tyurina E.A., Potanina Yu.M., Marinchenko A.Yu., Konstantinov S.P. Optimization of power generation equipment mix of the energy complex at oil and gas production. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2010, no. 3, pp. 92–99. In Rus.
 49. 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. 28–37. In Rus.
 50. Karamov D.N. Formation of initial meteorological arrays with the use of long-term series FM 12 Synop and METAR in systems energy studies. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 1, pp. 69–88. In Rus.
 51. Sazykin V.G., Kudryakov A.G., Netrebko S.A., Pron V.V. *Perspektivy povysheniya elektroenergeticheskogo kompleksa Kubani. Elektrogeriatriya – Sovershenstvovanie ekspluatatsii iznoshennogo elektrooborudovaniya* [Perspectives of improving efficiency of Kuban electric complex. Electrogeriatriy – Improvement of operation of worn out equipment]. Krasnodar, Kuban State Agrarian University Publ., 2012. 448 p.

Received: 30 December 2017.

Information about the authors

Dmitriy N. Karamov, Cand. Sc., researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Science; associate professor, Irkutsk National Research Technical University.

Igor V. Naumov, Dr. Sc., professor, Irkutsk National Research Technical University; professor, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky.

Sergey M. Perzhabinsky, Cand. Sc., senior researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Science.

УДК 528.44

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОСТРОЕНИЯ 3D-МОДЕЛИ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В ГОРОДАХ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА РФ

Аврунев Евгений Ильич¹,

avrynev_ei@ngs.ru

Чернов Александр Викторович¹,

kadastr-204@yandex.ru

Дубровский Алексей Викторович¹,

kadastr-204@yandex.ru

Комиссаров Александр Владимирович¹,

kadastr-204@yandex.ru

Пасечник Елена Юрьевна²,

paseyu@yandex.ru

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Россия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания в городах, характеризующихся сложной многоуровневой структурой инженерных сооружений, 3D кадастра недвижимости. В настоящее время разработка оптимальной структуры кадастра недвижимости, его унификация и возможность использования не только для целей регулирования земельно-имущественных отношений, но и для решения других важнейших научно-технических задач является направлением развития геодезической и кадастровой науки.

Цель исследования: предложить алгоритм по формированию 3D-модели, которая необходима для построения 3D кадастра в городах, особенно в арктическом регионе, поскольку здания и инженерные сооружения, расположенные на вечной мерзлоте, могут подвергаться существенным осадкам и деформациям, которые определяют вероятность возникновения предельно-напряженного состояния конструкции.

Объект: модель инженерного сооружения.

Методы: математическое моделирование.

Результаты. Предложено для конкретного инженерного сооружения, испытывающего значительные осадки и деформации, в том числе в условиях арктического региона, дополнительно создавать деформационный паспорт и полученную в результате этой технологической процедуры кадастровую информацию вносить в соответствующие разделы единого государственного реестра недвижимости. Обоснованы условия, определяющие необходимость создания локальной 3D-модели инженерного сооружения. Предложены критерии, позволяющие выбрать оптимальную систему координат и структуру построения локальной 3D-модели, в которую может включаться деформационный паспорт объекта. Получены уравнения, позволяющие вычислять необходимую точность геодезических измерений, исходя из установленных нормативно средних квадратических ошибок элементов 3D-модели инженерного сооружения. Разработан математический алгоритм, на основании которого можно рассчитывать необходимую точность геодезических измерений исходя из предложенных точностных параметров для построения 3D-модели инженерного сооружения.

Ключевые слова:

3D-кадастр, 3D-модель, средняя квадратическая ошибка (СКО), измерительное технологическое оборудование, инженерное сооружение, помещение.

Введение

Эффективное развитие экономики Российской Федерации, особенно в городах Арктического региона, невозможно без создания научно-обоснованной налогооблагаемой базы, основой которой служит единый государственный реестр недвижимости (ЕГРН) основным разделом которого является кадастр недвижимости. Поэтому разработка оптимальной структуры кадастра недвижимости, его унификация и возможность использования не только для целей регулирования земельно-имущественных отношений, но и для решения других

важнейших научно-технических задач является направлением развития геодезической и кадастровой науки в настоящее время. Неслучайно данной проблематике посвящено значительное число работ ведущих российских и зарубежных ученых [1–20].

Решение этой глобальной научно-технической задачи наиболее эффективно выполнять с использованием методики построения 3D-моделей объектов капитального строительства (ОКС) [4], однако сплошное трехмерное лазерное сканирование или использование традиционных измерительных тех-

нологий (электронный безотражательный тахеометр) для создания пространственных моделей городских территорий сопряжено со значительными финансовыми затратами, поэтому в ряде случаев может быть неэффективным и экономически не обоснованным. Кроме этого, в научно-технической литературе, к сожалению, остается не исследованным вопрос о назначении точности геодезических измерений при построении 3D-моделей инженерных сооружений.

Другим важным аспектом решения этой научно-технической задачи, особенно для городов, расположенных в арктическом регионе на вечной мерзлоте, является создание деформационного паспорта инженерного сооружения. Это обусловлено тем обстоятельством, что в условиях сезонных колебаний температур фундамент и расположенное на нем инженерное сооружение может испытывать значительные осадки и деформации, которые приводят к предельно напряженному состоянию конструкции и существенному снижению комфортности его эксплуатации. Это обуславливает целесообразность и необходимость корректировки кадастровой стоимости.

Вместе с этим и в условиях ограниченного финансирования деформационный паспорт для всех зданий и сооружений на все территориальное образование создавать экономически нецелесообразно. Поэтому мы предлагаем данную технологическую процедуру выполнять только в том случае, когда величина деформации инженерного сооружения находится в пределах 10 % от предельно напряженного состояния конструкции, которое устанавливается соответствующими строительными нормативно-правовыми документами. Следовательно, критерий K_1 , определяющий необходимость составления деформационного паспорта, будет выглядеть следующим образом

$$K_1 = t\Delta = 0,1\Delta. \quad (1)$$

Сформулируем основные требования, обуславливающие необходимость построения 3D-модели инженерного сооружения, расположенного в территориальном образовании, для которого планируется в перспективе сплошное 3D моделирование для создания 3D кадастра:

- 1) высокая кадастровая стоимость объекта капитального строительства;
- 2) наличие большого числа правообладателей недвижимого имущества, расположенного в инженерном сооружении;
- 3) большая вероятность возникновения значительных деформаций, обуславливающих необходимость корректирования кадастровой стоимости и проведения эксплуатационными службами соответствующих профилактических мероприятий.

Построение 3D-модели инженерного сооружения при пространственном моделировании территориального образования или при моделировании только этого объекта целесообразно, на наш

взгляд, представить в виде совокупности следующих технологических операций:

- 1) установление системы координат для построения 3D-модели инженерного сооружения;
- 2) координирование относительно исходных пунктов опорной межевой сети (ОМС) характерных точек, определяющих контур инженерного сооружения в принятой координатной системе;
- 3) выбор измерительного технологического оборудования для построения 3D-модели, определяющей внешний контур инженерного сооружения;
- 4) координирование помещений, определяющих внутреннее содержание внешней модели с выбором соответствующего измерительного технологического оборудования;
- 5) построение 3D-модели инженерного сооружения в виде совокупности отдельных проекции каждого этажа на горизонтальную плоскость;
- 6) при необходимости создания в 3D-модели деформационного паспорта повторение через научно-установленный интервал времени координирования характерных точек инженерного сооружения и построения векторов деформаций блоков инженерного сооружения с внесением этих характеристик в деформационный паспорт объекта и соответствующие разделы ЕГРН.

Установление системы координат для построения 3D-модели сооружения целесообразно выполнять исходя из соответствия проектных или фактических размеров инженерного сооружения ($\alpha_{\text{проект}}$) своим значениям в принятом координатном пространстве $\alpha_{\text{ред}}$. Исходя из этого положения, установим критерий для выбора оптимальной системы координат в следующем виде

$$K_2 = t\Delta = 0,1(\alpha_{\text{проект}} - \alpha_{\text{ред}}). \quad (2)$$

При невыполнении этого условия возникнет систематическое расхождение между проектными размерами сооружения и его размерами в координатном пространстве. Данное обстоятельство не позволит использовать результаты координирования для составления технического плана и определения реальных характеристик для внесения в деформационный паспорт объекта.

Важнейшим технологическим аспектом выполнения геодезических измерений для создания 3D-модели является выбор соответствующего измерительного технологического оборудования для координирования характерных точек, определяющих внешнюю модель инженерного сооружения.

Установим нормативную точность определения координат характерных точек инженерного сооружения. Если в основу этого критерия положить нормативное требование к точности координирования характерных точек при выполнении кадастровых работ для ведения ЕГРН и создания исходной основы для восстановления характерных точек, определяющих границы земельного участка,

то в соответствии с предложениями, озвученными в работе [3], в качестве такого критерия целесообразно использовать $m_{ХТ}=7,5$ см.

Следовательно, выбор соответствующего измерительного технологического оборудования $m_{изм}$ при координировании инженерного сооружения целесообразно осуществлять исходя из установленного критерия по алгоритму, предложенному в работе [1].

$$m_{ХТ}^2 = m_{го}^2 + m_{изм}^2, \quad m_{изм}^2 = m_{ХТ}^2 - m_{го}^2 = 5,6 \text{ см},$$

где $m_{го}$ – средняя квадратическая ошибка (СКО) взаимного положения пунктов ОМС внутри кадастрового квартала, которая в соответствии с работой [3] принимается равной 5 см.

В предположении, что при координировании будет использоваться безотражательный электронный тахеометр в варианте применения способа полярных координат (наиболее, в настоящее время, распространенная схема использования измерительного технологического оборудования)

$$m_{изм}^2 = m_L^2 + \frac{m_\beta^2}{p^2} L^2,$$

где m_β , m_L – соответственно инструментальная точность измерительного оборудования; L – максимальная длина линии от пункта ОМС до характерной точки сооружения.

Применяя к этому выражению принцип равногo влияния и подставляя предвычисленное значение $m_{изм}$, получим

$$m_L = \frac{m_\beta}{p} L = \frac{m_{изм}}{\sqrt{2}}, \quad m_L = \frac{5,6}{\sqrt{2}} = 4,0 \text{ см},$$

$$m_\beta = \frac{5,6 p}{\sqrt{2} L} = 4,0 \frac{p}{L}. \quad (3)$$

В том случае, когда геодезические измерения необходимо выполнять для составления деформационного паспорта объекта в качестве $m_{изм}$, необходимо использовать критерий, непосредственно связанный с нормативно-установленным предельно-напряженным состоянием конструкции инженерного сооружения (1). Тогда уравнение (3), определяющее требования к инструментальной точности измерительного технологического оборудования, переписывается в следующем виде

$$m_L = \frac{0,1 \cdot 0,1 \Delta}{\sqrt{2}} = 0,02 \Delta, \quad m_\beta = \frac{0,1 \cdot 0,1 \Delta p}{\sqrt{2} L}.$$

При координировании внутренних помещений инженерного сооружения в настоящее время отсутствует единый методический подход, определяющий соответствие между исполнительной съемкой, которая должна выполняться для определения качества строительно-монтажных работ, и обеспечением наполнения 3D-модели инженерного сооружения внутренним содержанием. В этом варианте точность координирования должна соответствовать точности геодезических измерений, выполняемых при определении внешней модели объекта.

При принятии гипотезы о правильной геометрической фигуре, образованной стенами помещения (квадрат или прямоугольник), площадь вычисляется по элементарным геометрическим формулам

$$P = ab.$$

Продифференцировав формулу по двум переменным и считая их независимыми величинами, получим уравнение для вычисления СКО площади прямоугольника

$$m_p^2 = a^2 m_b^2 + b^2 m_a^2.$$

Установим нормативное значение точности определения в зависимости от площади геометрической фигуры. Для этого воспользуемся уже принятым значением коэффициента $t=0,1$, такое значение соответствует «критерию ничтожного влияния» и, по нашему мнению, является оптимальной величиной, определяющей соотношение между качеством выполняемой работы и трудозатратами на ее реализацию.

Принимая гипотезу о равнозначности измерений и подставляя вместо m_p принятое нормативное значение, получаем следующую формулу для вычисления необходимой точности измерений

$$\Delta_p^2 = a^2 m_b^2 + b^2 m_a^2 = m_L^2 (a^2 + b^2) m_L =$$

$$= \frac{\Delta_p}{\sqrt{a^2 + b^2}} = \frac{0,10 p}{\sqrt{a^2 + b^2}}. \quad (4)$$

Более сложная ситуация возникает в варианте, когда гипотезу о правильной геометрической фигуре помещения принять нельзя. Это имеет место при исполнительной съемке, когда качество строительства подвергается тщательному контролю или когда в соответствии с проектом помещение имеет произвольную конфигурацию. Для этого варианта площадные и геометрические характеристики целесообразно определять в результате координирования по способу свободной станции в соответствии со схемой, изображенной на рис. 1.

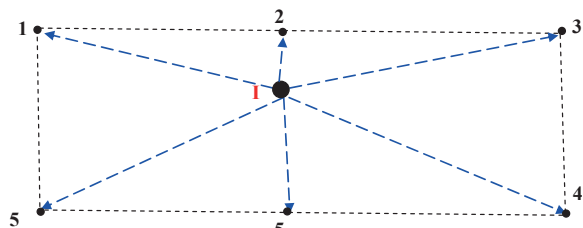


Рис. 1. Схема координирования помещения произвольной конфигурации

Fig. 1. Diagram of coordinating a room with optional configuration

Если с одной точки стояния тахеометра нет возможности на все определяемые характерные точки, предлагается использовать следующую схему (рис. 2).

Для представленных схем координирования площадь помещения вычисляется по следующей известной аналитической формуле:

$$2P = \sum_{i=1}^n (Y_{i+1} - Y_{i-1}) X_i,$$

а точность ее вычисления в соответствии со следующим уравнением

$$m_p = \frac{\mu}{2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{i+1} - Y_{i-1})^2 Q_{X_i} + \sum_{i=1}^n X_i^2 (Q_{Y_{i+1}} + Q_{Y_{i-1}} - 2Q_{Y_{i+1}Y_{i-1}})},$$

где X_i , Y_i – координаты характерной точки помещения; i – текущий номер характерной точки; n – число характерных точек; Q_{X_i} , Q_{Y_i} – диагональные элементы матрицы весовых коэффициентов, характеризующие точность определения координат характерных точек; μ – СКО единицы веса, принимаемая равной точности угловых измерений при координировании.

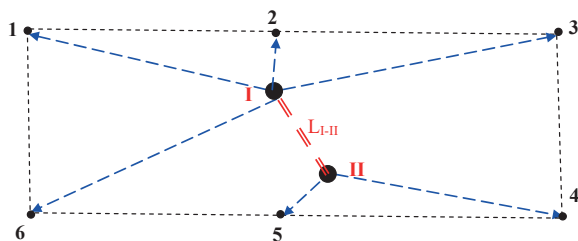


Рис. 2. Схема координирования помещения произвольной конфигурации с двух точек установки тахеометра

Fig. 2. Diagram of coordinating a room with optional configuration from tacheometer two points

Установим СКО определения площади как нормативно заданное значение и, выразив в этом уравнении неизвестное значение m_p , получим

$$\mu = \frac{2 \cdot 0,1P}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{i+1} - Y_{i-1})^2 Q_{X_i} + \sum_{i=1}^n X_i^2 (Q_{Y_{i+1}} + Q_{Y_{i-1}} - 2Q_{Y_{i+1}Y_{i-1}})}}.$$

Представим СКО характерной точки в виде известной формулы и, принимая гипотезу о равенстве ошибок по осям координат и их независимости между собой, тогда имеем

$$m = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} = \sqrt{\mu^2 Q_x + \mu^2 Q_y} = \mu \sqrt{Q_x + Q_y} = \mu \sqrt{2} \sqrt{Q}.$$

Учтем, что при координировании помещений произвольной конфигурации наиболее оптималь-

ным является способ полярных координат (формула 2 для вычисления СКО), и получим следующее уравнение

$$m^2 = m_L^2 + \frac{m_\beta^2}{p^2} L^2 = 2\mu^2 Q. \quad (5)$$

Применяя к уравнению (5) принцип равного влияния и выражая неизвестный весовой коэффициент с учетом условия $\mu = m_\beta$, получим

$$m_L = \frac{m_\beta}{p} L = \mu \sqrt{Q} = m_\beta \sqrt{Q}. \quad Q = \frac{p^2}{L^2}.$$

Подставив полученное значение для Q в формулу (4), получим окончательное уравнение для вычисления необходимой точности измерительного технологического оборудования при координировании помещения произвольной формы.

$$\mu = m_\beta = m_L = \frac{0,2P}{\sqrt{\frac{p^2}{L^2}}} \left(\sum_{i=1}^n (Y_{i+1} - Y_{i-1}) + 2 \sum_{i=1}^n X_i^2 \right).$$

Построение 3D-модели инженерного сооружения в виде совокупности отдельных проекции каждого этажа на горизонтальную плоскость целесообразно выполнять с использованием проектных размеров (толщины стен, высоты междуэтажных перекрытий, размеров лестничных пролетов и т. д.).

Заключение

Основные результаты выполненных научных исследований заключаются в следующем:

- 1) обоснованы и сформулированы основные принципы формирования 3D-модели инженерного сооружения, которая необходима для создания 3D кадастра на соответствующее территориальное образование;
- 2) предложен критерий K_1 , на основании которого определяется необходимость при построении 3D-модели инженерного сооружения создавать деформационный паспорт объекта;
- 3) предложен критерий K_2 , на основании которого устанавливаются требования к выбору системы координат для составления 3D-модели инженерного сооружения;
- 4) разработан математический алгоритм, на основании которого можно рассчитывать необходимую точность геодезических измерений исходя из предложенных точностных параметров для построения 3D-модели инженерного сооружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аврунев Е.И. Геодезическое обеспечение государственного кадастра недвижимости: монография. – Новосибирск: СГГА, 2010. – 144 с.
2. Аврунев Е.И., Карпик К.А. Оценка точности геодезических сетей для целей государственного кадастра недвижимости // Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 5. – С. 94–99.
3. Аврунев Е.И., Метелева М.В. Предложения по восстановлению границ земельных участков при их восстановлении или несанкционированном нарушении // ИнтерЭкспо ГЕО-СИБИРЬ-2015. Т. 3. Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования. Землеустройство, Лесостроительство, Управление недвижимостью. – Новосибирск, 2015. – С. 98–106.

4. Карпик А.П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий: монография / отв. ред. Д.В. Лисицкий. – Новосибирск: СГГА, 2004. – 259 с.
5. Карпик А.П. Структурно-функциональная модель геодезической пространственной информационной системы // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2004. – № 6. – С. 140–148.
6. Карпик А.П. Информационное обеспечение геодезической пространственной информационной системы // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4. – С. 70–73.
7. Карпик А.П. Основные принципы формирования геодезического информационного пространства // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4. – С. 73–78.
8. Карпик А.П. Разработка методики качественной и количественной оценки кадастровой информации // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4. – С. 137–142.
9. Карпик А.П. Применение сведений государственного кадастра недвижимости для решения задач территориального планирования // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 6. – С. 112–117.
10. Чернов А.В. Трехмерный кадастр – основной вектор развития успешной кадастровой системы // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016: XII Междунар. науч. конгр.: Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью: Междунар. науч. конф.: сб. материалов в 3 т. Т. 2. – Новосибирск, 18–22 апреля 2016. – Новосибирск: СГУГиТ, 2016. – С. 81–87. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/trehmernyy-kadast-osnovnoy-vektor-razvitiya-uspeshnoy-kadastrovoy-sistemy> (дата обращения: 10.10.2017)
11. Initial Analysis of the Second FIG 3D Cadastres Questionnaire: Status in 2014 and Expectations for 2018 / P. van Oosterom, J. Stoter, H. Ploeger, Ch. Lemmen, R. Thompson, S. Karki // 4th International Workshop on 3D Cadastres. – Dubai, United Arab Emirates, 9–11 November 2014. – P. 55–74. URL: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2014_14.pdf (дата обращения: 10.10.2017).
12. Pouliot J., Vasseur M. Terrestrial LiDAR Capabilities for 3D Data Acquisition (Indoor and Outdoor) in the Context of Cadastral Modelling: a Comparative Analysis for Apartment Units // 4th International Workshop on 3D Cadastres. – Dubai, United Arab Emirates, 9–11 November 2014. – P. 99–107. URL: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2014_17.pdf (дата обращения: 10.10.2017).
13. Paulsson J. Swedish 3D Property in an International Comparison // 3rd International Workshop on 3D Cadastres: Developments and Practices. – Shenzhen, China, 25–26 October 2012. – P. 23–39. URL: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2012_32.pdf (дата обращения: 10.10.2017).
14. 3D Cadastral Data Model Based on Conformal Geometry Algebra / Ji-yi Zhang, Peng-cheng Yin, Gang Li, He-he Gu, Hua Zhao and Jian-chun Fu // ISPRS Int. J. Geo-Inf. – 2016. – V. 5. – 16 p. URL: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_00.pdf (дата обращения: 10.10.2017).
15. A Conceptual Model Supporting a Range of 3D Parcel Representations through all Stages: Data Capture, Transfer and Storage / R. Thompson, P. van Oosterom, K. Soon, R. Priebebenow // FIG Working Week 2016 Recovery from Disaster Christchurch. – New Zealand, May 2–6, 2016. – 23 p. URL: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_02.pdf (дата обращения: 10.10.2017).
16. Andrée M., Seipel S., Milutinovic G. Virtual 3D Models as a Basis for Property Formation. FIG Working Week 2016 Recovery from Disaster Christchurch. – New Zealand, May 2–6, 2016. – 9 p. URL: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_04.pdf (дата обращения: 10.10.2017).
17. Construction of Geometric Model and Topology for 3d Cadastre – case Study in Taizhou, Jiangsu / Yuan Ding, Changbin Wu, Nan Jiang, Bingqing Ma, Xinxin Zhou, China // FIG Working Week 2016 Recovery from Disaster Christchurch. – New Zealand, May 2–6, 2016, 17 p. URL: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_06.pdf (дата обращения: 10.10.2017).
18. Thompson R.J., Van Oosterom P., Soon K.H. Mixed 2D and 3D Survey Plans with Topological Encoding // FIG Working Week 2016 Recovery from Disaster Christchurch. – New Zealand, May 2–6, 2016 – P. 133–152. URL: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_17.pdf (дата обращения: 10.10.2017).
19. First 3D Cadastral Registration of Multi-level Ownerships Rights in the Netherlands / J. Stoter, H. Ploeger, R. Roes, E. van der Riet, F. Biljecki, H. Ledoux // FIG Working Week 2016 Recovery from Disaster Christchurch. – New Zealand, May 2–6, 2016. – P. 491–504. URL: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_37.pdf (дата обращения: 10.10.2017).
20. Попов В.К., Козина М.В. Экологизация кадастровой оценки земель для устойчивого развития урбанизированных территорий // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 11. – С. 98–105.

Поступила 31.01.2018 г.

Информация об авторах

Аврунев Е.И., кандидат технических наук, заведующий кафедрой кадастра и территориального планирования Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Чернов А.В., ассистент кафедры кадастра и территориального планирования Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Дубровский А.В., кандидат технических наук, доцент кафедры кадастра и территориального планирования Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Комиссаров А.В., доктор технических наук, доцент кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Пасечник Е.Ю., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и землеустройства Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 528.44

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF CONSTRUCTING 3D-MODEL OF ENGINEERING STRUCTURES IN THE CITIES OF THE RF ARCTIC REGION

Evgeny I. Avrunev¹,
avrynevei@ngs.ru

Aleksandr V. Chernov¹,
kadastr-204@yandex.ru

Aleksey V. Dubrovsky¹,
kadastr-204@yandex.ru

Aleksandr V. Komissarov¹,
kadastr-204@yandex.ru

Elena Yu. Pasechnik²,
paseyu@yandex.ru

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies,
10, Plakhotny street, Novosibirsk, 630108, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by the necessity to develop 3D cadastral register in the cities with complex multilevel structure of engendering constructions. Currently, the development of optimal structure of the cadastral register, its standardization and opportunity of being used not only to control land-property relations but to solve the other important scientific and engineering issues as well, is the direction in development of geodesic and cadastral science. **The aim** of the research is to propose the algorithm for forming 3D-model required to construct 3D land cadaster in the cities, especially for those located in the arctic region, as the buildings and engineering constructions in the permafrost zone may suffer from sufficient sediments and deformations, which determine the probability of occurrence of construction limit stress state.

Subject of the research: the engineering structure model.

Methods: mathematical modeling.

Results. The authors have proposed to develop additionally the deformation certificate for a certain engineering construction, suffering from sufficient sediments and deformation, including the constructions being in the permafrost zone. They proposed as well the cadastral information obtained to put into appropriate sections of the Unified State Register of Immovable Property. The conditions determining the necessity of developing the local 3D model of engineering constructions were proved. The paper introduces the criteria which allow selecting the optimal coordinate system and structure for constructing the local 3D model, which may include the deformation certificate of the object. The authors derived the equations for calculating the required accuracy in geodesic measurements owing to the prescribed root-mean-square errors of the 3D model elements of the engineering construction. The mathematical algorithm was developed. Based on the algorithm one can calculate the required accuracy of geodesic measurements owing to the proposed accuracy parameters for constructing 3D model of engineering structure.

Key words:

3D land cadaster, 3D-model, root-mean-square, measuring processing equipment, engineering construction, room.

REFERENCES

1. Avrunev E.I. *Geodezicheskoe obespechenie gosudarstvennogo kadastra nedvizhimosti: monografiya* [Geodetic support of the state land cadaster: monography]. Novosibirsk, SGGA Publ., 2010. 144 p.
2. Avrunev E.I., Karpik K.A. Estimation of accuracy of geodetic networks for State cadastral register. *Scientific journal Izvestia vuzov «Geodesy and aerophotography»*, 2011, no. 5, pp. 94–99. In Rus.
3. Avrunev E.I., Meteleva M.V. Predlozheniya po vosstanovleniyu granits zemelnykh uchastkov pri ikh vosstanovlenii ili nesanktsionirovannom narushenii [Proposals to reestablish the borders of land plots at their reset or illegal violation]. *InterEkspo GEO-Sibir-2015. T. 3. Ekonomicheskoe razvitiye Sibiri i Dalnego Vostoka. Ekonomika prirodopolzovaniya. Zemleustroystvo, lesoustroystvo, upravleniye nedvizhimostyu* [InterExpo Geo-Siberia-2015. V. 3. Economic development of Siberia and Far East. Environmental economics. Land, forest and property management]. Novosibirsk, 2015. pp. 98–106.
4. Karpik A.P. *Metodologicheskie i tekhnologicheskie osnovy geoinformatsionnogo obespecheniya: monografiya* [Methodological and engineering bases of geoinformation support: monography]. Ed. by D.V. Lisitsky. Novosibirsk, SGGA Publ., 2004. 259 p.
5. Karpik A.P. Structural-functional model of geodesic space information system. *Scientific journal Izvestia vuzov «Geodesy and aerophotography»*, 2004, no. 6, pp. 140–148. In Rus.
6. Karpik A.P. Information support of geodesic space information system. *Scientific journal Izvestia vuzov «Geodesy and aerophotography»*, 2013, no. 4, pp. 70–73. In Rus.
7. Karpik A.P. Key principles of forming geodesic information space. *Scientific journal Izvestia vuzov «Geodesy and aerophotography»*, 2013, no. 4, pp. 73–78. In Rus.
8. Karpik A.P. Development of the technique of qualitative and quantitative estimation of cadastral information. *Scientific jour-*

- nal Izvestia vuzov «Geodesy and aerophotography»*, 2013, no. 4, pp. 137–142. In Rus.
9. Karpik A.P. Application of data on national cadaster for solving the issues of space planning. *Scientific journal Izvestia vuzov «Geodesy and aerophotography»*, 2013, no. 6, pp. 112–117. In Rus.
 10. Chernov A.V. Trekhmerny kadastr – osnovnoy vektor razvitiya uspekhov kadastrvoy sistemy [3D cadastre is the main vector for efficient cadastre system development]. *InterEkspo GEO-Sibir-2016. T. 3. Ekonomicheskoe razvitiye Sibiri i Dalnego Vostoka. Ekonomika prirodopolzovaniya. Zemleustroystvo, lesoustroystvo, upravleniye nedvizhimostyu* [InterExpo Geo-Siberia-2016. Vol. 3. Economic development of Siberia and Far East. Environmental economics. Land, forest and property management]. Novosibirsk, 2016. pp. 81–87. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/trehmernyy-kadastr-osnovnoy-vektor-razvitiya-uspekhov-kadastrvoy-sistemy> (accessed 10 October 2017).
 11. Van Oosterom P., Stoter J., Ploeger H., Lemmen Ch., Thompson R., Karki S. Initial Analysis of the Second FIG 3D Cadastres Questionnaire: Status in 2014 and Expectations for 2018. *4th International Workshop on 3D Cadastres*. Dubai, United Arab Emirates, 9–11 November 2014. pp. 55–74. Available at: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2014_14.pdf (accessed 10 October 2017).
 12. Pouliot J., Vasseur M. Terrestrial LiDAR Capabilities for 3D Data Acquisition (Indoor and Outdoor) in the Context of Cadastral Modelling: a Comparative Analysis for Apartment Units. *4th International Workshop on 3D Cadastres*. Dubai, United Arab Emirates, 9–11 November 2014. pp. 99–107. Available at: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2014_17.pdf (accessed 10 October 2017).
 13. Paulsson J. Swedish 3D Property in an International Comparison. *3rd International Workshop on 3D Cadastres: Developments and Practices*. Shenzhen, China, 25–26 October 2012. pp. 23–39. Available at: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2012_32.pdf (accessed 10 November 2017).
 14. Ji-yi Zhang, Peng-cheng Yin, Gang Li, He-he Gu, Hua Zhao, Jian-chun Fu. 3D Cadastral Data Model Based on Conformal Geometry Algebra. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2016, vol. 5, 16 p. Available at: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_00.pdf (accessed 10 October 2017).
 15. Thompson R., Van Oosterom P., Soon K., Priebbenow R. A Conceptual Model Supporting a Range of 3D Parcel Representations through all Stages: Data Capture, Transfer and Storage. *FIG Working Week 2016 Recovery from Disaster Christchurch*. New Zealand, May 2–6, 2016. Available at: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_02.pdf (accessed 10 October 2017).
 16. Andrée M., Seipel S., Milutinovic G. Virtual 3D Models as a Basis for Property Formation. *FIG Working Week 2016 Recovery from Disaster Christchurch*. New Zealand, May 2–6, 2016. Available at: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_04.pdf (accessed 10 October 2017).
 17. Yuan Ding, Changbin Wu, Nan Jiang, Bingqing Ma, Xinxin Zhou, China Construction of Geometric Model and Topology for 3d Cadastre – case Study in Taizhou, Jiangsu. *FIG Working Week 2016 Recovery from Disaster Christchurch*. New Zealand, May 2–6, 2016. Available at: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_06.pdf (accessed 10 November 2017).
 18. Thompson R.J., Van Oosterom P., Soon K.H. Mixed 2D and 3D Survey Plans with Topological Encoding. *FIG Working Week 2016 Recovery from Disaster Christchurch*. New Zealand, May 2–6, 2016. Available at: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_17.pdf (accessed 10 October 2017).
 19. Stoter J., Ploeger H., Roes R., Van der Riet E., Biljecki F., Ledoux H. First 3D Cadastral Registration of Multi-level Ownerships Rights in the Netherlands. *FIG Working Week 2016 Recovery from Disaster Christchurch*. New Zealand, May 2–6, 2016. Available at: http://www.gdmc.nl/3DCadastres/literature/3Dcad_2016_37.pdf (accessed 10 October 2017).
 20. Popov V.K., Kozina M.V. Ecologization of cadastral valuation of lands for sustainable development of urbanized lands. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 11, pp. 98–105.

Received: 31 January 2018.

Information about the authors

Evgeny I. Avrunev, Cand. Sc., head of the department, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

Aleksandr V. Chernov, teaching assistant, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

Aleksey V. Dubrovsky, Cand. Sc., associate professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

Aleksandr V. Komissarov, Dr. Sc., associate professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

Elena Yu. Pasechnik, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.313.2: 621.7.08

ПОВЫШЕНИЕ КОММУТАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭДП-800 КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ

Харламов Виктор Васильевич¹,
emoe@omgups.ru

Чупрына Евгений Юрьевич²,
chuprina@ssep.ru

Сергеев Роман Владимирович¹,
emoe@omgups.ru

Шкодун Павел Константинович¹,
emoe@omgups.ru

Попов Денис Игоревич¹,
emoe@omgups.ru

Москалев Юрий Владимирович¹,
emoe@omgups.ru

¹ Омский государственный университет путей сообщения,
Россия, 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

² ООО «СибЭлектроПривод»,
Россия, 630088, г. Новосибирск, ул. Петухова, 69.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения бесперебойной добычи угля открытым способом при работе на угольном карьере. Как свидетельствуют результаты проведенного анализа статистики отказов тяговых электродвигателей ЭДП-800 карьерных самосвалов БелАЗ, основная часть данных отказов непосредственно связана с неудовлетворительным состоянием коммутации. Таким образом, повышение коммутационной устойчивости тяговых электродвигателей ЭДП-800 является неотъемлемой частью задачи повышения надежности карьерных самосвалов БелАЗ и, следовательно, всего процесса добычи угля, обеспечиваемой самосвалами данного типа.

Цель исследования: разработка методики настройки коммутации тяговых двигателей карьерных самосвалов, позволяющей повысить их коммутационную устойчивость и снизить износ элементов коллекторно-щеточного узла.

Объект исследования – тяговый электродвигатель ЭДП-800 карьерных самосвалов БелАЗ.

Методы анализ статистики отказов, математический анализ данных бортовой системы мониторинга самосвала, экспериментальные исследования процесса коммутации тяговых электродвигателей, синтез методики настройки коммутации.

Результаты. Анализ данных по эксплуатации тяговых электродвигателей ЭДП-800 карьерных самосвалов БелАЗ выявил высокий процент отказов, связанных с неудовлетворительным состоянием коммутации, обусловивший высокую интенсивность выхода из строя элементов коллекторно-щеточного узла и, в первую очередь, электрических щеток. Анализ данных бортовой системы мониторинга самосвалов и выполненные на испытательной станции экспериментальные исследования позволили дать рекомендации по повышению коммутационной устойчивости тяговых электродвигателей ЭДП-800 карьерных самосвалов и разработать методику настройки коммутации данных электродвигателей с учетом параметров эксплуатации, позволяющую добиться удовлетворительной настройки коммутации, исходя из критерия минимизации износа электрических щеток.

Ключевые слова:

Карьерный самосвал, тяговый двигатель, коммутационная устойчивость, методика настройки, износ щеток, режимы работы, коммутационные испытания.

Введение

Обеспечение бесперебойной добычи угля открытым способом при работе на угольном карьере требует наличия высоких показателей надежности применяемых для данной цели тяговых электродвигателей постоянного тока. Тяговые электродвигатели ЭДП-800 используются в качестве привода ведущих колес карьерных автосамосвалов БелАЗ. Данные двигатели работают в двигательном и в генераторном режиме (в режиме электрического торможения на тормозные резисторы) и являются реверсивными [1]. Электродвигатель ЭДП-800 имеет

следующие номинальные параметры: $P_{ном}=800$ кВт; $U_{ном}=850$ В; $I_{а,ном}=1023$ А; $n_{ном}/n_{max}=570/2000$ об/мин; $M_{ном}/M_{max}=13,4/26,8$ кН·м; $\eta_{ном}=92$ %.

Тяжелые условия эксплуатации таких двигателей обуславливают проблемы с состоянием коммутации и как следствие вызывают повышенный износ поверхности коллектора и электрических щеток. Эксплуатация показывает значительное снижение ресурса щеток по сравнению с существующими требованиями, а также неудовлетворительное состояние коммутации, которое приводит к почернению и повышенному износу каждой четвер-

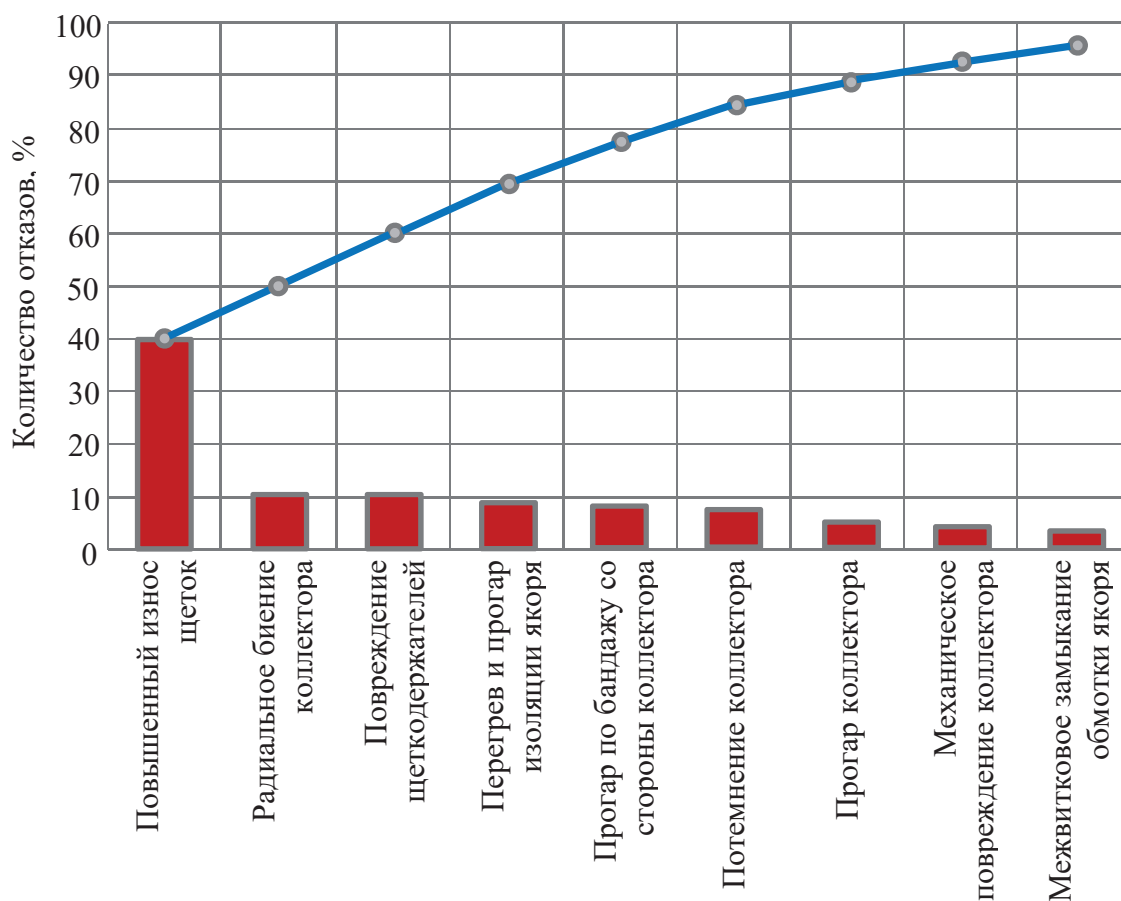


Рис. 1. Диаграмма Парето постепенных и внезапных отказов тяговых электродвигателей ЭДП-800

Fig. 1. Pareto chart of the gradual and sudden failures of traction motors EDP-800

той коллекторной пластины (эффект «зебры») [2–6].

Анализ данных по отказам тяговых электродвигателей ЭДП-800

По данным ряда эксплуатирующих организаций процентное соотношение отказов по причинам за период с 2012 по 2016 гг. приведено на рис. 1.

Анализ данных по отказам тяговых электродвигателей ЭДП-800 (рис. 1) позволяет сделать вывод о том, что причины 80 % отказов (повышенный износ щеток, радиальное биение коллектора, превышающее норму, повреждение щеткодержателей, перегрев или прогар изоляции якоря, а также прогар по бандажу со стороны коллектора) связаны с неудовлетворительной коммутацией [2–4, 7–10].

Обработка и анализ данных бортовой системы мониторинга

Для выяснения причин неудовлетворительного состояния коммутации выполнен анализ режимов работы тяговых электродвигателей ЭДП-800 в условиях эксплуатации по данным, полученным из системы мониторинга самосвала БелАЗ.

На рис. 2 приведены временные диаграммы напряжения мотор-колеса, тока силовой цепи (красная линия), тока возбуждения (синяя линия) и частоты вращения якоря, в различных режимах работы электрической машины: полное возбуждение (ПВ), ослабление возбуждения (ОВ), динамическое торможение (ДТ).

На рис. 3 приведена часть схемы управления тяговыми электродвигателями ЭДП-800, для плавного регулирования тока возбуждения в схеме использованы тиристоры. Установленная система мониторинга позволяет фиксировать ток якоря (силовой цепи), протекающий по шунту $RS1$, и ток, протекающий по шунту $RS2$, в цепи ослабления возбуждения, подключаемой параллельно цепи возбуждения. Для анализа режимов работы машины был определен ток возбуждения путем вычитания из тока якорной цепи тока цепи ослабления возбуждения.

Коэффициент пульсации тока определен как отношение наибольшего значения переменной составляющей пульсирующего тока к его среднему значению [1]:

$$k_{\pi} = \frac{I_{\text{пул}}}{I_{\text{ср}}},$$

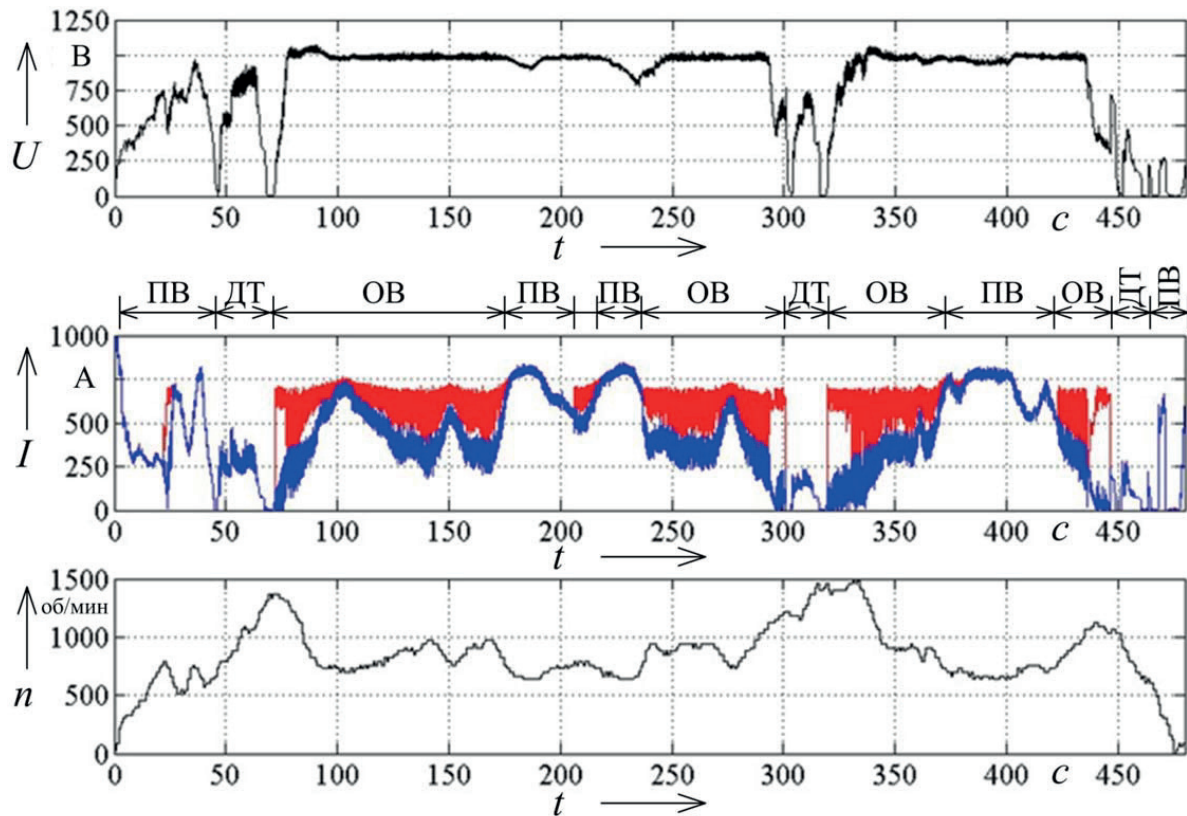


Рис. 2. Временные диаграммы режимов работы тягового электродвигателя: U – напряжение мотор-колеса; I – ток силовой цепи и ток возбуждения; n – частота вращения якоря

Fig. 2. Timing diagram of the operation modes of the electric traction motor: U is the voltage of the motor-wheel; I is the current of the power circuit and the excitation current; n is the rotation frequency of the anchor

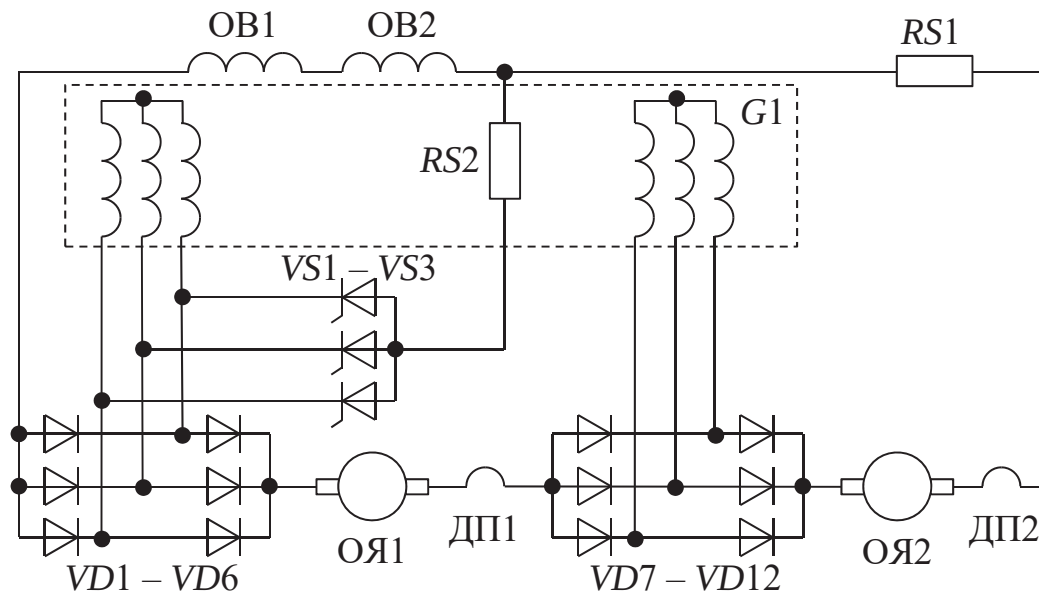


Рис. 3. Часть схемы автоматического плавного регулирования тока возбуждения тяговых электродвигателей ЭДП-800

Fig. 3. Part of the circuit of automatic smooth regulation of the excitation current of the traction motors EDP-800

где $I_{\text{пул}}$ – наибольшее значение переменной составляющей пульсирующего тока, А; $I_{\text{ср}}$ – среднее значение тока якоря, А:

$$I_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N I_i}{N},$$

где N – количество измеренных значений тока за 0,1 с ($N=10$).

По данным системы мониторинга значение тока силовой цепи и тока цепи ослабления поля фиксировались 100 раз в секунду. Расчет коэффициента пульсации тока был выполнен для интервала времени 0,1 с, т. е. было определено среднее значение по данным десяти измерений $I_{\text{ср}}$, наибольшее значение переменной составляющей пульсирующего тока было рассчитано по выражению [1]:

$$I_{\text{пул}} = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{2},$$

где I_{max} – максимальное значение тока на рассматриваемом интервале времени, А; I_{min} – минимальное значение тока на рассматриваемом интервале времени, А.

Тяговый электродвигатель ЭДП-800 карьерного самосвала БелАЗ работает в режиме двигателя с полным возбуждением и ослаблением поля, которое реализуется с использованием тиристорного преобразователя, шунтирующего обмотку возбуждения, а также в режиме электрического торможения. Следовательно, для установления причин неудовлетворительной коммутации необходимо анализировать работу тягового двигателя с учетом всех режимов работы. На круговой диаграмме (рис. 4) приведено процентное соотношение длительности режимов работы тягового электродвигателя ЭДП-800 по данным системы мониторинга самосвала БелАЗ.

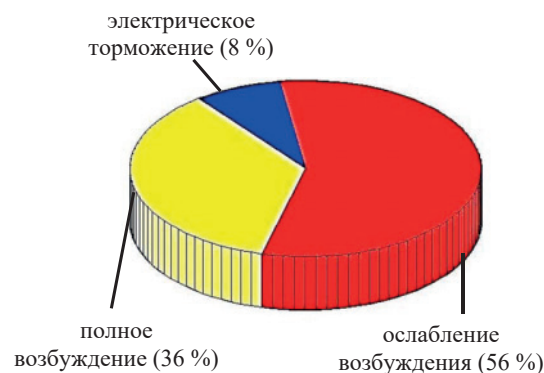


Рис. 4. Круговая диаграмма режимов работы тягового электродвигателя

Fig. 4. Pie chart of operation modes of traction motor

В результате анализа данных системы мониторинга (рис. 4) установлено, что тяговый электродвигатель ЭДП-800 36 % времени в рассматриваемом интервале работает с полным возбуждением, 56 % – с ослаблением возбуждения, 8 % – в режиме динамического торможения.

Изменение коэффициента пульсации тока силовой цепи и тока возбуждения во времени приведено на рис. 5, 6 соответственно. Необходимо отметить, что из-за особенности схемы подключения датчиков тока системы мониторинга (рис. 3) ток возбуждения в режиме динамического торможения (рис. 6) не фиксировался.

График изменения тока силовой цепи при полном возбуждении приведен на рис. 2, пусковой ток ТЭД составил 987 А, частота вращения якоря в среднем равна 676 об/мин, в короткие интервалы времени (10–20 с) достигала 1300–1400 об/мин. Напряжение якоря находилось в диапазоне от 900 до 1000 В. В этом режиме коэффициент пульсации тока якоря и тока возбуждения изменялся в диапазоне 0,05–0,4 (рис. 5, 6), превышая этот диапазон кратковременно при переходе в режим ослабления поля или электрического торможения (до 0,8).

При ослаблении возбуждения ток силовой цепи изменялся от 200 до 780 А, ток возбуждения изменялся от 10 до 780 А, частота вращения якоря в среднем составила 932 об/мин, в короткие интервалы времени (10–20 с) достигала 1500 об/мин. Напряжение якоря находилось в диапазоне от 950 до 1000 В. В этом режиме коэффициент ослабления поля в среднем составил 0,75.

При ослаблении поля имеют место значительные пульсации тока возбуждения (рис. 6), значение коэффициента пульсации изменяется в диапазоне 0,3–1,0 (на некоторых кратковременных интервалах времени даже превышая значение 1,0), что является причиной пульсации основного магнитного потока и поля реакции якоря и оказывает негативное влияние на процесс коммутации [3, 11, 12].

Причиной значительных пульсаций тока возбуждения при ослаблении поля является способ его реализации. Силовая часть схемы автоматического плавного регулирования тока возбуждения (рис. 3) представляет собой трехфазный нулевой управляемый выпрямитель на тиристорах VS1–VS3, образуя при включении тириستоров цепь, шунтирующую обмотки возбуждения ОБ1 и ОБ2 двигателей с обмотками якоря ОЯ1 и ОЯ2 соответственно. Силовая цепь двигателей питается от двух трехфазных мостовых схем выпрямления (VD1–VD6 и VD7–VD12), подключенных к обмоткам статора тягового генератора G1. Относительная продолжительность включенного состояния тириستоров определяет соотношение между значениями тока возбуждения ТЭД и тока якоря, т. е. коэффициент регулирования возбуждения. Изменение этого коэффициента производится посредством регулирования угла управления тиристоров.

В режиме динамического торможения ток силовой цепи изменялся от 60 до 410 А. Частота вращения якоря изменялась в диапазоне от 1350 до 670 об/мин. Напряжение якоря находилось в диапазоне от 10 до 920 В.

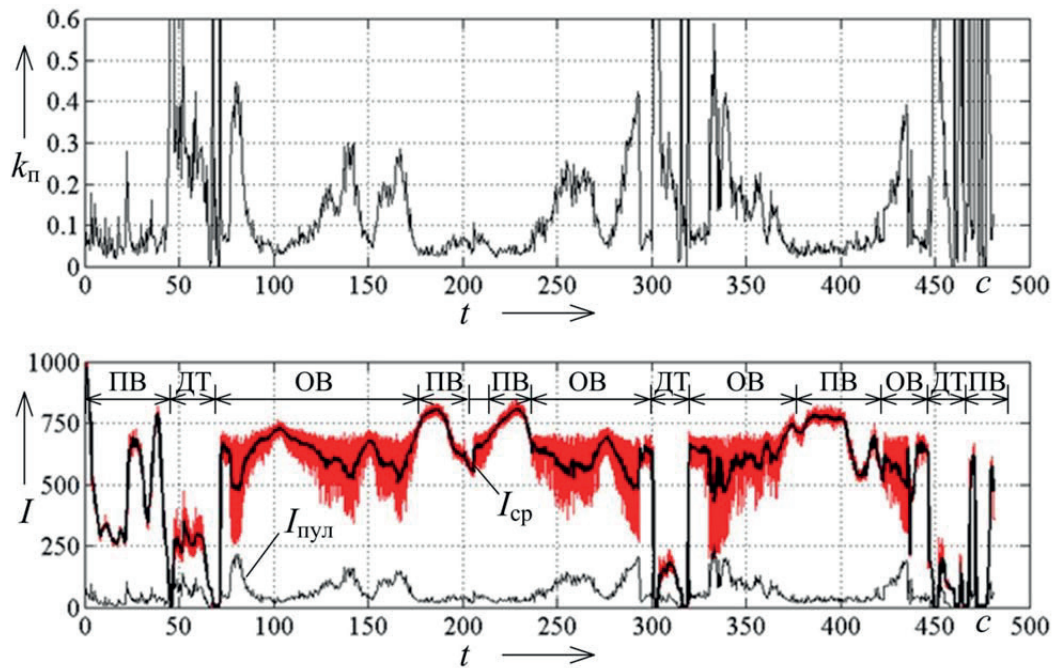


Рис. 5. Временные диаграммы электродвигателя: коэффициент пульсации тока силовой цепи; среднее значение тока силовой цепи ($I_{ср}$) и наибольшее значение переменной составляющей тока силовой цепи ($I_{пул}$)

Fig. 5. Timing diagrams of the motor: factor of ripple of power circuit's current; average current of the power circuits ($I_{ср}$) and the highest value of the variable component of the power circuit's current ($I_{пул}$)

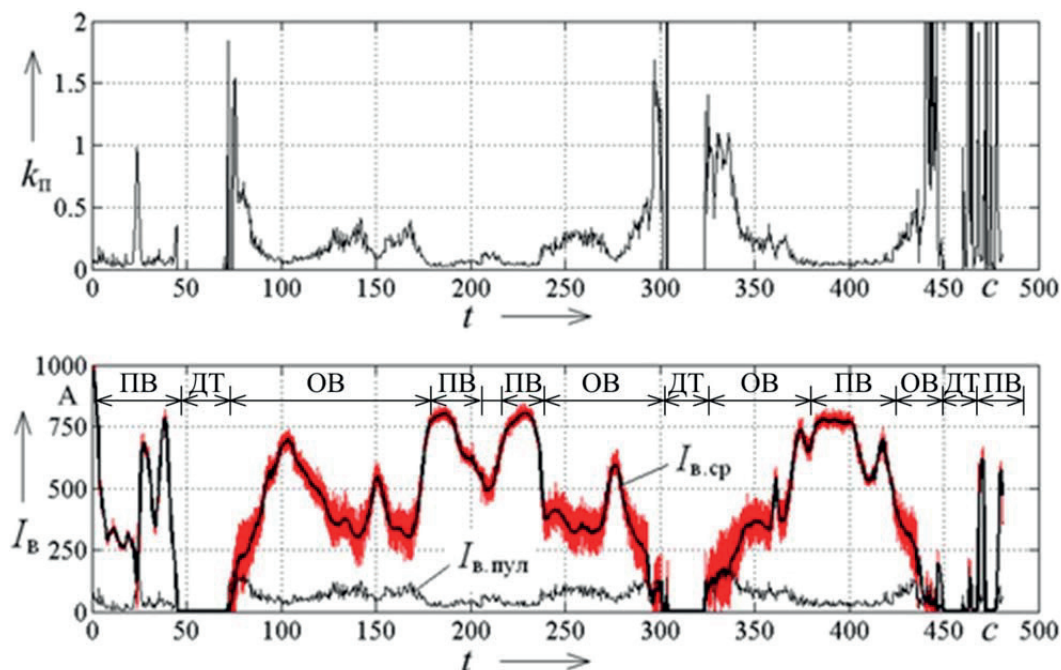


Рис. 6. Временные диаграммы электродвигателя: коэффициент пульсации тока возбуждения; среднее значение тока возбуждения ($I_{в.ср}$) и наибольшее значение переменной составляющей тока возбуждения ($I_{в.пул}$)

Fig. 6. Timing diagrams of the motor: the ripple factor of the excitation current; the mean value of the excitation current ($I_{в.ср}$) and the highest value of the variable component of excitation current ($I_{в.пул}$)

Экспериментальные исследования процесса коммутации тяговых двигателей ЭДП-800

С целью выявления возможных причин неудовлетворительной коммутации на испытательной станции проведены коммутационные испытания тяговых электродвигателей ЭДП-800. Испытания проводились в стационарном режиме методом взаимной нагрузки с подпиткой/отпиткой добавочных полюсов [3, 5]. В качестве линейного генератора и вольтодобавочной машины использовались генераторы постоянного тока, что обуславливает низкий уровень пульсаций тока в обмотках испытуемых электродвигателей («гладкое» питание). Регистрация параметров искрения щеток и состояния поверхности коллектора тяговых двигателей осуществлялась приборами ПКК-5М и ПКП-4М, разработанными в ОмГУПСе.

Характерный пример полученных в результате испытаний безыскровых зон для различных режимов работы (полное и ослабленное возбуждение) приведен на рис. 7, 8.

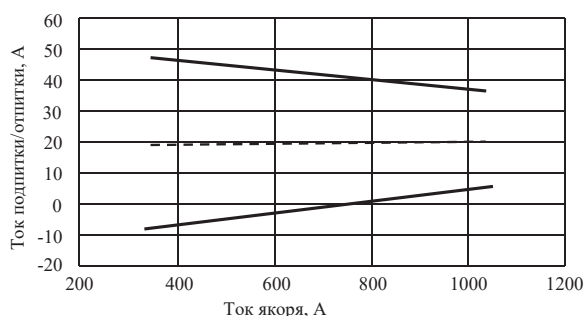


Рис. 7. Безыскровые зоны в режиме полного поля

Fig. 7. Non-sparking zone in full-field mode

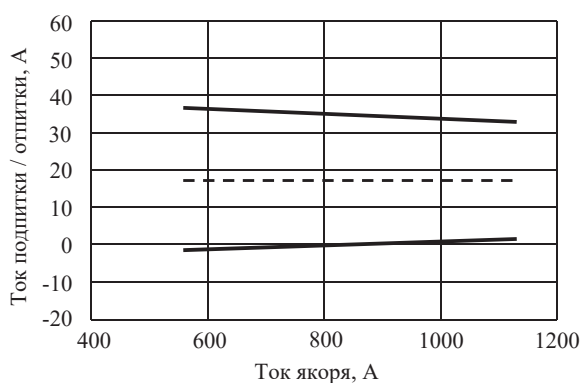


Рис. 8. Безыскровые зоны в режиме ослабленного поля

Fig. 8. Non-sparking zone in the weakened field mode

Как показывают результаты экспериментальных исследований, зона безыскровой работы испытуемых электродвигателей в режиме полного возбуждения смещена вверх, что свидетельствует о недокоммутации ТЭД, вызванной насыщением магнитной цепи добавочных полюсов (ДП).

При ослаблении поля зона безыскровой работы испытуемых электродвигателей смещается вниз, в связи с тем, что степень насыщения магнитной це-

пи добавочных полюсов уменьшается, и они в большей степени обеспечивают усиление коммутационной ЭДС с ростом реактивной ЭДС.

Как показал анализ результатов экспериментальных исследований тяговые электродвигатели ЭДП-800 имеют достаточно широкую зону безыскровой работы при «гладком» питании электродвигателя. Однако такие условия не соответствуют реальным условиям эксплуатации двигателя, работающего большую часть времени в переходных нестационарных режимах с пульсирующими токами якоря и возбуждения.

Как известно, на коммутацию в коллекторно-щеточном узле машины постоянного тока оказывают влияние в различной степени множество факторов: вибрация, климатические факторы, режимы работы машины, работа системы управления [3, 4]. В процессе анализа работы системы управления и стендовых испытаний было установлено, что из-за особенностей работы системы управления и режимов работы машины на процесс коммутации значительное влияние оказывают два фактора:

- 1) насыщение магнитной цепи, по которой замыкается поток ДП, при больших значениях тока возбуждения приводит к сложности настройки безыскровых зон для различных режимов работы электродвигателей, особенно соответствующих различной степени ослабления возбуждения (при полном возбуждении зона безыскровой работы «лежит» выше, чем при ослабленном);
- 2) при ослаблении возбуждения в машине наблюдается усиление пульсаций, как тока возбуждения, так и тока якоря, что приводит к значительному усилению вихревых токов в массивных элементах магнитопровода и, как следствие, к сдвигу фазы переменной составляющей потока ДП (которая оказывается не в противофазе к потоку реакции якоря), что, в свою очередь, ухудшает коммутационную устойчивость электродвигателей.

Рекомендации по повышению коммутационной устойчивости тяговых электродвигателей ЭДП-800 карьерных самосвалов БелАЗ

Для повышения коммутационной устойчивости электродвигателей данного типа предлагаются следующие мероприятия:

- проведение коммутационных испытаний с ослаблением возбуждения по схеме, реализующей пульсирующий характер ослабления возбуждения, аналогично схеме, применяемой на карьерных самосвалах;
- совершенствование методики настройки коммутации, которая должна учитывать значимость (относительную продолжительность работы) в условиях эксплуатации различных режимов (полное поле, ослабление поля, тормозной режим) и пульсирующее ослабление возбуждения. Необходимая величина корректировки МДС ДП и соответствующая ей толщина

немагнитных прокладок должна рассчитываться с учетом относительной продолжительности работы в этих режимах [13–19].

Методика настройки коммутации тяговых электродвигателей ЭДП-800 карьерных самосвалов БелАЗ

Для электродвигателей типа ЭДП-800 предлагается следующая методика настройки коммутации, позволяющая минимизировать износ электрических щеток, которую условно можно разделить на три этапа.

Первый этап методики состоит в проведении коммутационных испытаний на тяговом электродвигателе и определении зависимостей интенсивности искрения щеток от магнитодвижущей силы (МДС), определяемой током подпитки/отпитки, добавочных полюсов в различных режимах работы, соответствующих реальной эксплуатации: $W_{и1}(F)$, $W_{и2}(F)$, ..., $W_{иN}(F)$.

При этом должна быть заранее установлена зависимость МДС добавочных полюсов от толщины немагнитных прокладок $F(\delta_{дп})$ [3, 4].

На втором этапе формируется целевая функция износа электрических щеток [20], который обусловлен фрикционной, электрокоррозионной и электроэрозионной составляющей и зависит от параметров режима работы двигателя, в следующем виде:

$$\Delta И(F) = (nP_{ср.щ})K_{\phi} + (n^4 I^2 P_{ср.щ}^2)K_{\text{экр}} + nW_{и1}(F)K_{\text{эп}}\Delta t_1^* + nW_{и2}(F)K_{\text{эп}}\Delta t_2^* + \dots + nW_{иN}(F)K_{\text{эп}}\Delta t_N^*,$$

где Δt_1^* , Δt_2^* , Δt_N^* – относительные продолжительности работы в различных режимах; n – частота вращения якоря двигателя, об/мин; $P_{ср.щ}$ – средняя величина давления на щетку; I – ток, протекающий по щетке, А; K_{ϕ} – коэффициент фрикционного износа; $K_{\text{экр}}$ – коэффициент электрокоррозионного износа;

$K_{\text{эп}}$ – коэффициент электроэрозионного износа.

И далее решается оптимизационная задача [21, 22] по нахождению $F_{\text{опт}}$, соответствующего глобальному минимуму функции износа:

$$\Delta И(F) \rightarrow \min.$$

Решением оптимизационной задачи является значение $F_{\text{опт}}$, соответствующее минимальному значению износа.

Ввиду того, что средняя величина давления на щетку $P_{ср.щ}$ определяется по известным методикам и рекомендациям, сила тока I и частота вращения n являются параметрами режима работы, а функцией искрения является только электроэрозионная составляющая износа, целевая функция поставленной оптимизационной задачи может быть упрощена до следующего вида:

$$\Delta \dot{E}(F) = W_{и1}(F)\Delta t_1^* + W_{и2}(F)\Delta t_2^* + \dots + W_{иN}(F)\Delta t_N^*.$$

На третьем этапе по полученной зависимости $F(\delta_{дп})$ и найденному решению оптимизационной задачи $F_{\text{опт}}$ определяется необходимая толщина немагнитных прокладок $\delta_{дп \text{ опт}}$, которой соответствует минимальный износ щеток.

Заключение

В результате проведенного анализа данных по эксплуатации тяговых электродвигателей ЭДП-800 карьерных самосвалов БелАЗ выявлен высокий процент отказов, связанных с неудовлетворительным состоянием коммутации.

Осуществленный анализ данных бортовой системы мониторинга самосвала БелАЗ и выполненные экспериментальные исследования позволили предложить методику настройки коммутации тяговых электродвигателей ЭДП-800 с учетом параметров эксплуатации, позволяющую добиться оптимальной настройки коммутации, исходя из критерия минимизации износа щеток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 2582–81. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 37 с.
- Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин. – Л.: Энергия, 1975. – 296 с.
- Авилов В.Д. Методы анализа и настройки коммутации машин постоянного тока: монография. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 237 с.
- Авилов В.Д. Оптимизация коммутационного процесса в коллекторных электрических машинах постоянного тока: монография. – Омск: Омский гос. у-нт путей сообщения, 2013. – 356 с.
- Харламов В.В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока: монография. – Омск: Омский гос. у-нт путей сообщения, 2002. – 233 с.
- Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications. – Burlington: Newnes, 2013. – 440 p.
- Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
- Binder A. Elektrische Maschinen und Antriebe: Grundlagen, Betriebsverhalten. – Berlin: Springer, 2012. – 1249 p.
- Kothari D., Nagrath I. Electric Machines. 4th ed. – New Delhi: Tata McGraw Hill Education, 2010. – 778 p.
- Veltman A., Pulle D., De Doncker R. Direct Current Machine // Fundamentals of Electrical Drives, Power Systems. – Cham: Springer, 2016. – 341 p.
- Drubel O. Converter Applications and their Influence on Large Electrical Machines. – Berlin: Springer, 2013. – 190 p.
- Chiasson J. Modeling and High Performance Control of Electric Machines. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 2005. – 709 p.
- Курбасов А.С., Седов В.И., Сорин Л.Н. Проектирование тяговых электродвигателей. – М.: Транспорт, 1987. – 536 с.
- Проектирование тяговых электрических машин / М.Д. Находкин, Г.В. Василенко, В.И. Бочаров, М.А. Козорезов. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
- Проектирование электрических машин / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев. – М.: Высшая школа, 2002. – 757 с.

16. Tong W. Mechanical Design of Electric Motors. – London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. – 702 p.
17. Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovcova V. Design of Rotating Electrical Machines. 2nd ed. – Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2014. – 584 p.
18. Mukerji S.K., Khan A.S. Electromagnetics for Electrical Machines. – London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. – 421 p.
19. Gerling D. Electrical Machines: Mathematical Fundamentals of Machine Topologies. – Berlin: Springer, 2015. – 472 p.
20. Харламов В.В., Попов Д.И., Байсадыков М.Ф. Алгоритм прогнозирования ресурса работы электрических щеток тяговых электродвигателей // Известия Транссиба. – 2017. – № 1 (29). – С. 47–56.
21. Кочегурова Е.А. Теория и методы оптимизации. – М.: Изд-во «Юрайт», 2017. – 133 с.
22. Сухарев А.Г., Тимохов А.В., Федоров В.В. Методы оптимизации: учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры. 3-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во «Юрайт», 2017. – 367 с.

Поступила 22.01.2018 г.

Информация об авторах

Харламов В.В., доктор технических наук, профессор кафедры электрических машин и общей электротехники Омского государственного университета путей сообщения.

Чупрына Е.Ю., технический директор ООО «СибЭлектроПривод».

Сергеев Р.В., кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и общей электротехники Омского государственного университета путей сообщения.

Шкодун П.К., кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и общей электротехники Омского государственного университета путей сообщения.

Попов Д.И., кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и общей электротехники Омского государственного университета путей сообщения.

Москалев Ю.В., кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и общей электротехники Омского государственного университета путей сообщения.

UDC 621.313.2: 621.7.08

ENHANCEMENT OF COMMUTATION STABILITY OF TRACTION MOTORS EDP-800 TRUCKS

Victor V. Kharlamov¹,
emoe@omgups.ru

Evgeny Yu. Chupryna²,
chuprina@ssep.ru

Roman V. Sergeev¹,
emoe@omgups.ru

Pavel K. Shkodun¹,
emoe@omgups.ru

Denis I. Popov¹,
emoe@omgups.ru

Yuriy V. Moskalev¹,
emoe@omgups.ru

¹ Omsk State Transport University,
35, Marx avenue, Omsk, 644046, Russia.

² SibElectroPrivod,
69, Petukhov street, Novosibirsk, 630088, Russia.

The relevance of the research is caused by the necessity of ensuring the uninterrupted extraction of coal by opencast methods when working in the coal mine. As the results of the analysis of the statistics of failures of traction motors EDP-800 BelAZ dump trucks, the main part of these failures is directly related to the unsatisfactory state of commutation. Thus, increasing the commutation stability of traction motors EDP-800 is an integral part of the task of improving the reliability of BelAZ dump trucks and, consequently, the entire process of coal mining provided by this type of dump trucks.

The main aim of the research is to develop the technique for setting up the commutation of traction engines of dump trucks, which allows increasing their switching stability and reducing wear of the elements of the collector-brush unit.

The object of study is the traction electric motor EDP-800 dump trucks BelAZ.

Methods: methods failure statistics analysis, mathematical analysis of the data of the on-Board truck monitoring system, experimental studies of commutation of traction motors, synthesis of the method for setting up the commutation.

Results. Analysis of data on operation of traction motors EDP-800 BelAZ mining trucks revealed a high percentage of failures associated with poor commutation, which caused a high intensity of failure of the elements of the collector-brush unit and, first of all, electric brushes. The analysis of the data of the on-Board monitoring system of dump trucks and the experimental studies carried out at the test station made it possible to give recommendations for improving the switching stability of the traction motors of the EDP-800 pit dump trucks and to develop a method of configuring the commutation of these motors taking into account the operating parameters, which allows achieving a satisfactory commutation state, based on the criterion of minimizing the wear of electric brushes.

Key words:

Dump truck, traction motor, commutation stability, commutation correction method, brush wear, operating mode, commutation tests.

REFERENCES

1. GOST 2582–81. *Mashiny elektricheskoye vrashchayushchiesya tyagovye. Obshchie tekhnicheskiye usloviya* [State Standard 2582–81. Rotating electrical machines for rail and road vehicles. General specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 1981. 37 p. TOCT
2. Gemke R.G. *Neispravnosti elektricheskikh mashin* [Malfunction of electric machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1975. 296 p.
3. Avilov V.D. *Metody analiza i nastroyki kommutatsii mashin postoyannogo toka* [Methods of analysis and setting of commutation of DC machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995. 237 p.
4. Avilov V.D. *Optimizatsiya kommutatsionnogo protsessa v kollek-tornykh elektricheskikh mashinakh postoyannogo toka* [Optimization of switching process in collector electrical machines DC]. Omsk, OmGUPS Publ., 2013. 356 p.
5. Kharlamov V.V. *Metody i sredstva diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya kollekorno-shchetchnogo uzla tyagovykh elektrodvigately i drugikh kollekornykh mashin postoyannogo toka* [Methods and means of diagnosing the technical condition of collector brush knot of traction electric motors and other collector machines DC]. Omsk, OmGUPS Publ., 2002. 233 p.
6. Hughes A., Drury B. *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications*. Burlington, Newnes, 2013. 440 p.
7. Voldek A. I. *Elektricheskoye mashiny* [Electrical machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1978. 832 p.
8. Binder A. *Elektrische Maschinen und Antriebe: Grundlagen, Betriebsverhalten* [Electrical machines and drives: basics, characteristics]. Berlin, Springer, 2012. 1249 p. In Ger.
9. Kothari D., Nagrath I. *Electric Machines*. 4th ed. New Delhi, Tata McGraw Hill Education, 2010. 778 p.
10. Veltman A., Pulle D., De Doncker R. *Direct Current Machines. Fundamentals of Electrical Drives, Power Systems*. Cham, Springer, 2016. 341 p.

11. Drubel O. *Converter Applications and their Influence on Large Electrical Machines*. Berlin, Springer, 2013. 190 p.
12. Chiasson J. *Modeling and High Performance Control of Electric Machines*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2005. 709 p.
13. Kurbasov A.S., Sedov V.I., Sorin L.N. *Proektirovanie tiagovykh elektrodvigatelye* [Design of traction motors]. Moscow, Transport Publ., 1987. 536 p.
14. Nakhodkin M.D., Vasilenko G.V., Bocharov V.I., Kozorezov M.A. *Proektirovanie tiagovykh elektricheskikh mashin* [Design of traction electric machines]. Moscow, Transport Publ., 1976. 624 p.
15. Kopylov I.P., Klovov B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [The design of electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002. 757 p.
16. Tong W. *Mechanical Design of Electric Motors*. London, New York, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. 702 p.
17. Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovcova V. *Design of Rotating Electrical Machines*. 2nd ed. Chichester, John Wiley & Sons, Ltd., 2014. 584 p.
18. Mukerji S.K., Khan A.S. *Electromagnetics for Electrical Machines*. London, New York, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. 421 p.
19. Gerling D. *Electrical Machines: Mathematical Fundamentals of Machine Topologies*. Berlin, Springer, 2015. 472 p.
20. Kharlamov V.V., Popov D.I., Baisadykov M.F. The algorithm of forecasting of resource of electric brushes traction motors. *Izvestiia Transsiba*, 2017, no. 1 (29), pp. 47–56. In Rus.
21. Kochegurova E.A. *Teoriya i metody optimizatsii* [Theory and methods of optimization]. Moscow, Urayt Publ., 2017. 133 p.
22. Sukharev A.G., Timokhov A.V., Fedorov V.V. *Metody optimizatsii* [Methods of optimization]. Moscow, Urayt Publ., 2017. 367 p.

Received: 22 January 2018.

Information about the authors

Victor V. Kharlamov, Dr. Sc., professor, Omsk State Transport University.

Evgeny Yu. Chupryna, technical director, SibElectroPrivod.

Roman V. Sergeev, Cand. Sc., senior lecturer, Omsk State Transport University.

Pavel K. Shkodun, Cand. Sc., senior lecturer, Omsk State Transport University.

Denis I. Popov, Cand. Sc., senior lecturer, Omsk State Transport University.

Yuriy V. Moskaev, Cand. Sc., senior lecturer, Omsk State Transport University.

УДК 622.3:504.05:628.5

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОЦЕССОВ ЛИКВИДАЦИИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ НА ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ СИТУАЦИЮ В РОССИЙСКОМ ДОНБАССЕ

Молев Михаил Дмитриевич¹,
2play_rnd14716@aaanet.ru.

Масленников Станислав Александрович¹,
maslennikovsa@mail.ru.

Занина Ирина Александровна¹,
zaninabzd@yandex.ru.

Илиев Алексей Георгиевич¹,
iliev-aleksejj@rambler.ru

¹ Донской государственный технический университет,
Россия, 346500, г. Шахты, ул. Шевченко, 147.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью проведения научно обоснованного технического сопровождения работ по ликвидации неперспективных угольных шахт на территории Российского Донбасса (Ростовская область) в целях минимизации негативных воздействий на окружающую природную среду и население региона.

Цель исследования: обосновать и разработать комплекс методов оценки негативного воздействия техногенных факторов на региональную экологическую систему, сопровождающих ликвидационные процессы на неперспективных угольных предприятиях.

Объекты: углепородный массив, подземные и поверхностные водоёмы в регионе, атмосфера, породные отвалы и терриконы.

Методы: интегрированный системный анализ, синтез альтернатив, методы математической статистики и теории вероятностей, математическое моделирование, методы оптимизации и исследования операций, верификация результатов.

Результаты. Разработана методология оценки воздействия ликвидационных процессов на окружающую природную среду Российского Донбасса. Предложены научно-методические подходы к решению проблемы. Выявлены ведущие факторы, которые определяют масштаб и виды негативного влияния, сопровождающего организационно-технические процессы ликвидации неперспективных угольных шахт. В частности, установлено, что характер и пространственно-временные параметры техногенного воздействия зависят от динамики подъёма уровня шахтных вод. Сформирован комплекс частных физических и математических моделей, необходимый для описания техногенных процессов. Системный подход к экспериментальным исследованиям углепородного массива на территории ликвидируемых шахт также позволил установить интегральную пространственно-временную характеристику динамики затопления выработанного пространства. Изложенная методика может быть рекомендована к применению для обоснования ликвидационных технических мероприятий в горно-геологических условиях всех угледобывающих районов России, поскольку базируется на основе фундаментальных положений физико-математической теории, геологии и экологии, при этом выявленные закономерности динамики техногенных процессов имеют универсальный характер. Важно указать, что эколого-экономическая эффективность данной разработки подтверждена практикой использования при закрытии угольных шахт на территории Ростовской области.

Ключевые слова:

Экологическая безопасность, ликвидация шахт, факторы негативного воздействия, методология оценки, системный анализ, динамика затопления.

Введение

Ликвидация неперспективных шахт в Российской Федерации является одной из стратегических, экологических и социально-экономических проблем для регионов страны, в которых развита угольная отрасль и которые требуют адекватной теории для её разрешения. Значимость темы обусловлена, во-первых, масштабом осуществляемой производственной деятельности, которую отражают следующие цифры: за период реструктуризации ликвидировано более 200 нерентабельных шахт, в том числе на территории Ростовской области – 47 предприятий, что повлияло на жизнь свыше семисот тысяч человек [1–3]. Во-вторых, ликвидационные процессы продолжаются в настоящее время во многих регионах России: в Кузбассе, на Урале и в других субъектах Федерации. В-третьих, специфика проявления негативных

экологических последствий требует существенно-го совершенствования методик оценки [4–6].

Совместное воздействие техногенных факторов, возникающих при закрытии угольных шахт, инициирует неблагоприятные для окружающей территории процессы: загрязнение атмосферы, литосферы и гидрографической сети вредными органическими и минеральными соединениями, а также рудничными газами; сдвигание горного массива. На горных отводах закрываемых предприятий расположены многочисленные поверхностные технологические объекты, в которых складированы отходы угольного производства, представляющие мощные источники загрязнения окружающей природной среды (ОПС). В этом контексте логично указать, что в терриконах и породных отвалах России накоплены миллиарды тонн твёрдых отходов [7–9]. Состояние среды обитания в угольных ре-

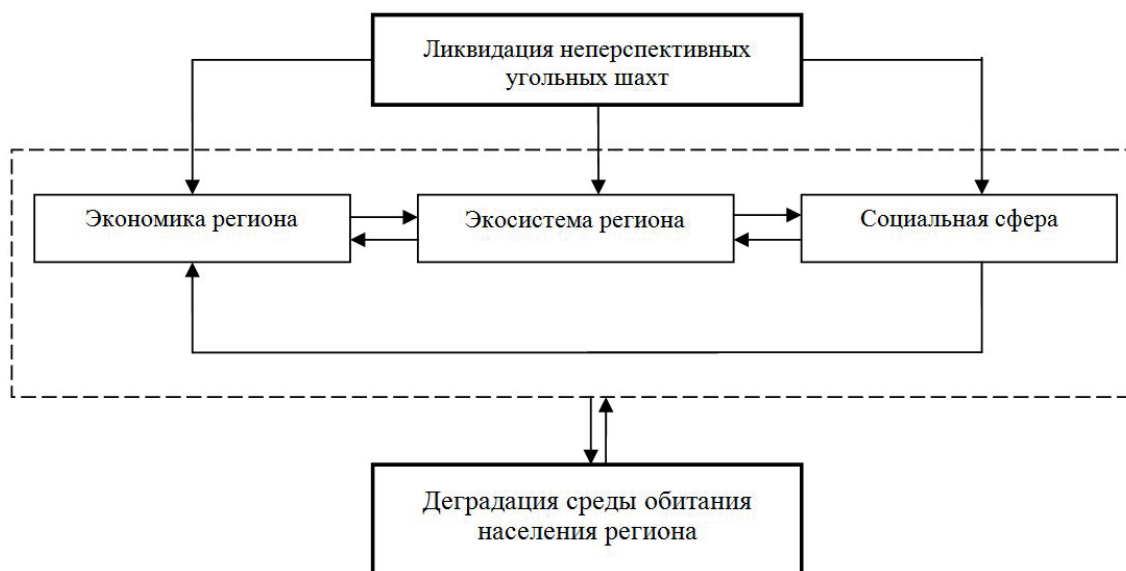


Рис. 1. Взаимосвязь элементов эколого-экономической системы региона на стадии ликвидации шахт

Fig. 1. Relationship of elements of the ecological-economic system of the region at the stage of liquidation of mines

гионах наглядно иллюстрируют следующие цифры: в гидрографическую сеть Ростовской области ежегодно поступает 37 миллионов кубометров шахтных вод, которые содержат 187 тысяч тонн загрязняющих веществ [10].

В связи с этим авторы оценивают ликвидацию как региональный негативный источник влияния на состояние ОПС и жизнедеятельность населения, что можно представить в виде логической схемы взаимосвязей, изображённой на рис. 1.

Продолжающаяся на территории Российской Федерации ликвидация убыточных предприятий обусловила необходимость обеспечить экологическую безопасность жителей регионов на основе минимизации отрицательного воздействия техногенных факторов на ОПС. Указанная цель вполне достижима, если корректно и в полном объёме решить экспериментально-теоретические задачи:

- выявить все техногенные факторы, определяющие основные параметры экологических последствий закрытия угольных шахт;
- ранжировать установленные негативные факторы по значимости влияния на протекающие процессы в ОПС;
- сформировать рациональный комплекс методов натурных наблюдений;
- разработать критерии, позволяющие достоверно оценить параметры негативного воздействия техногенных факторов на экологическую систему в зоне влияния ликвидационных процессов.

Многофакторность и региональная специфика экологических рисков, связанных с реструктуризацией угольной отрасли, как показывает многолетняя практика, требует от специалистов, занимающихся данной проблемой, разработки корректного научно обоснованного обеспечения тех-

нических мероприятий. Оценка экологической безопасности ликвидации с использованием существующих методик привела к чрезвычайным происшествиям регионального уровня, например, в Ростовской области и Кузбассе [11, 12]. Основная причина указанных техногенных аварий состоит в том, что в результате применения существующих методических рекомендаций качество (надёжность и достоверность) полученных прогнозных данных не обеспечило оптимальность управленческих решений. Во многом недостоверная оценка экологической ситуации связана с так называемой научной неопределённостью перспективного прогноза вследствие несовершенства теоретического аппарата прогнозирования. Поэтому методы, используемые в процессе анализа ситуации, должны быть однозначно акцентированы на оценку возможных потерь в случае возникновения аварийных экологических ситуаций по схеме «затраты–выгоды» [13].

Детальный анализ российских и зарубежных публикаций показывает, что отсутствуют работы, в которых системно изложена теория обоснования организационных и технических мероприятий по ликвидации неперспективных угольных предприятий с учётом экологического риска для среды обитания населения.

В опубликованных научных работах представлены результаты исследований воздействия отдельных техногенных факторов на ОПС. Так, А.В. Мохов, А.Н. Петров, Ю.А. Норватов, Д.И. Савельев и Д. Кирнер рассматривают только гидрогеологические аспекты, что сужает круг вопросов, которые необходимо решить для получения полной объективной информации [14, 15]. Другие учёные оценивают геомеханические явления в горном массиве [16–18]. В ряде научных работ изложены

подробные исследования влияния на природную среду объектов поверхностного комплекса шахт [19, 20]. В связи с создавшейся ситуацией авторы считают целесообразным представить методику исследований и экспериментальные результаты.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований

Авторская концепция научного обоснования организационно-технических решений базируется на фундаментальных физико-математических теориях, включая системный анализ и синтез, экологическое моделирование, риск-анализ и теорию прогнозтики.

Исследование проблемы обеспечения региональной экологической безопасности шахтёрских территорий, её структуры и функций с учётом многообразия объектов и явлений, связанных между собой определёнными отношениями и находящимися в перманентном взаимодействии, свидетельствует о том, что угольные шахты совместно с ОПС образуют так называемую «большую» систему, находящуюся в неустойчивом динамическом состоянии. Иерархическая структура подобной природно-технической системы состоит из множества подсистем и элементов, функционирующих как единое целое в рамках стохастического процесса [21].

Анализ публикаций по вопросу эффективности различных методов исследований показал, что для решения поставленных задач необходимо применить системный анализ в модификации «интегральный системный анализ» (ИСА). ИСА, представляющий на настоящий момент наиболее эффективный аналитический инструмент, по мнению авторов, должен включать совместный анализ исследуемой системы и системы-эталона. Интегрированный системный анализ обеспечивает объективное целеполагание на основе коренных системных свойств: синергетический эффект, открытость и адаптивность, эмерджентность, мультипликационный эффект. В предлагаемом варианте ИСА дополнен системно-динамическим и процессным подходами, а также положениям программно-целевого планирования, которые в контексте сформированной методики означают перманентный анализ процессов во времени и пространстве и их последующую оптимизацию.

Необходимо отметить, что эффективным инструментом исследования, как показывает практика, является моделирование [22, 23]. Оптимальный модельный комплекс при построении экологического прогноза должен включать модели:

- объектов горного массива, атмосферы и гидросферы в пределах региона;
- техногенных процессов и явлений геомеханической и гидрогеологической направленности;
- алгоритмы, описывающие методику измерений и обработки материалов наблюдений;
- оценки эколого-экономической эффективности ликвидационных мероприятий.

Основные положения предложенной методики обеспечивают полный комплекс исследований негативного воздействия природных и техногенных процессов, сопровождающих реструктуризацию угольных предприятий: идентификацию опасных факторов, их качественную и количественную оценку, динамику состояния техносферной безопасности в перспективе.

Авторы статьи, используя сформированную методику, выполнили масштабные экспериментальные геоэкологические работы в Ростовской области, на территории которой в период проведения исследований функционировали 59 шахт и шахтоуправлений. Репрезентативность полученной информации обеспечена следующими факторами:

- представительным массивом первичных данных;
- выполнением измерений в режиме дискретно-непрерывного мониторинга;
- синхронными наблюдениями одновременно в нескольких (трёх–пяти) контрольных точках, удалённых друг от друга на расстояние до десяти километров;
- разнообразием горно-геологических и гидрогеологических условий;
- продолжительностью натурных наблюдений, составившей в общей сложности десять лет;
- применением апробированного комплекса методов исследований и обработки полученных результатов.

Детальному анализу были подвергнуты реальные материалы геологических, геофизических и маркшейдерских служб угольных предприятий и научно-исследовательских организаций, а также обширная фактографическая база, полученная авторами при выполнении опытно-методических работ с привлечением геологических, гидрологических и геофизических методов. На основе анализа горно-геологических, гидрогеологических и горнотехнических условий на исследуемой территории был сформирован рациональный комплекс, включающий следующие методы:

- низкочастотное электропрофилеирование и электроразведывание, скважинный электрический каротаж;
- сейсмозондирование и акустическая резонансная дефектоскопия;
- гидрологические измерения уровня затопления горного массива;
- лабораторный анализ шахтных вод;
- определение физико-механических свойств горных пород.

Изучение процессов затопления в соответствии с методологией геолого-геофизических исследований включает поисковую и картировочную стадии. При этом на поисковом этапе использовались более производительные и оперативные геофизические методы (профилеирование), на стадии картирования – зондирование в так называемых «аномальных» зонах. Полевые исследования дополнялись лабораторными испытаниями образцов гор-

ных пород и химическим анализом шахтных и поверхностных вод, а также замерах атмосферного воздуха на территории горных отводов ликвидируемых шахт. По результатам поисковых работ нами обоснованы подходы к формированию оптимальной сети скважинных гидрологических измерений, которые для получения сопоставимых данных производились в режиме дискретного мониторинга. Основные сведения об объемах экспериментальных исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сведения об объемах экспериментальных исследований

Table 1. Information on the volume of experimental studies

Наименование характеристики Characteristic	Единица измерения Unit	Числовое значение Numeric value
Количество исследованных шахт Number of investigated mines	единиц/units	47
Исследованная площадь горных отводов Investigated area of the mining allotment	км ² /km ²	1400
Общее количество гидрологических измерений уровня затопления Total number of hydrologic measurements of flood level	замер measurement	1220
Количество геофизических измерений Number of geophysical measurements	физическая точка physical point	450
Период наблюдений Observation period	год/year	10

В результате изучения полученных экспериментальных данных установлены факторы, кото-

рые определяют геологические, гидрогеологические и экологические процессы во времени и пространстве. На основе анализа пространственного расположения объектов горных работ в углепородном массиве была произведена оценка логистической взаимосвязи между шахтами, что позволило сформулировать первый важный вывод о формировании в выработанном пространстве двенадцати общих техногенных водоаккумулирующих горизонтов (комплексов). Так, например, шахты Несветаевского угольного района имеют общую сеть горных выработок, поэтому в результате затопления образовался подземный комплекс объемом свыше трех км³ (рис. 2).

Второй основной вывод состоит в том, что подземная гидросфера, обладающая значительным энергетическим потенциалом, во взаимодействии с другими факторами (порядка 20 источников различной физической природы) оказывает мощное негативное воздействие на объекты ОПС. К ведущим факторам, обладающим региональным масштабом негативного воздействия, по результатам детального анализа, отнесены следующие природные и техногенные источники (в порядке убывания их значимости): подземная гидросфера (динамика, объем); горно-геологические условия (литология, тектоника, глубина залегания и мощность породных слоев); физико-механические свойства горных пород (крепость, пределы прочности на сжатие и растяжение и др.); технология горных работ; гидрогеохимические условия и миграция газов. Первым высшим рангом (степенью значимости), по данным авторов, обладает подземная гидросфера. Указанные выводы находят подтверждение в работах известных отечественных специалистов в области гидрогеологии, таких как

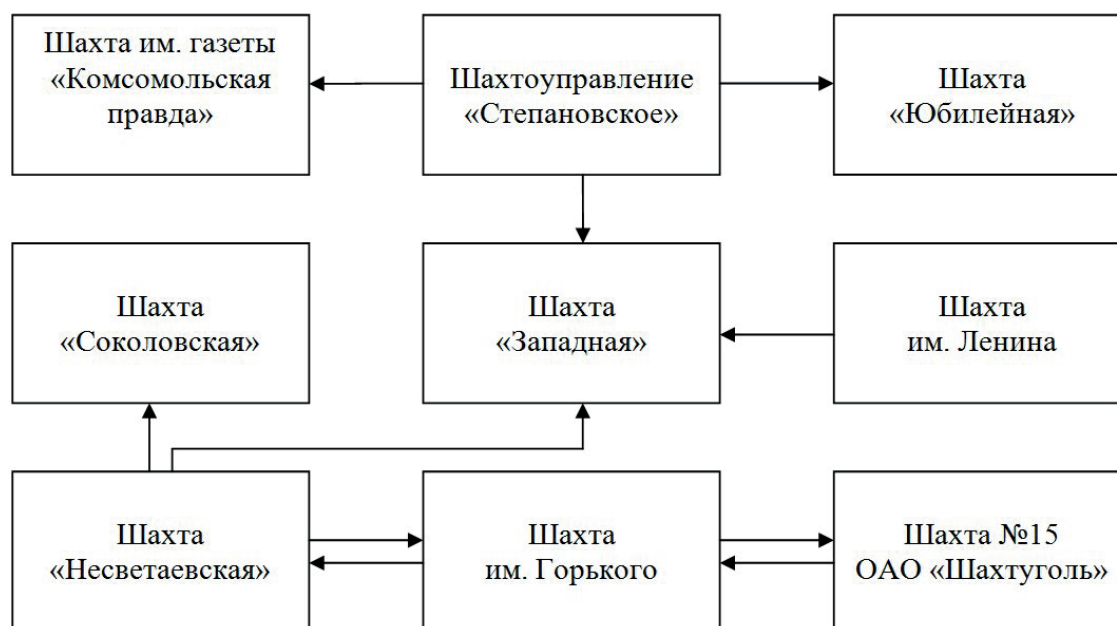


Рис. 2. Схема гидравлической связи между шахтами г. Новошахтинска

Fig. 2. Diagram of hydraulic relation between the mines in the city of Novoshakhtinsk

Ю.А. Норватов, А.Е. Агапов, Д.И. Савельев, В.А. Мохов, А.М. Навитный [2, 11, 15].

Именно динамика шахтных вод в процессе затопления выработанного пространства определяет условия переноса вредных и токсичных веществ, содержащихся в подземной геологической среде, а также миграции газов, составляющих подземную атмосферу. В подтверждение этого приведём результаты анализа. Так, во-первых, ежегодно водоотливными комплексами ликвидируемых шахт сбрасывается в речную сеть Донского региона без очистки около трех с половиной миллионов кубометров загрязнённой воды. Во-вторых, шахтные воды, по данным Шахтинской санэпидстанции (г. Шахты Ростовской обл.), значительно минерализованы, содержат цинк, хром, свинец, концентрации которых значительно превышают ПДК [24], что отражено в табл. 2, 3.

Таблица 2. Загрязнённость дренажных вод ликвидируемых шахт компании «Ростовуголь»

Table 2. Pollution of drainage waters of the liquidated mines of the company «Rostovugol»

Шахта Mine	Содержание микроэлементов, мг/дм ³ Content of microelements, mg/dm ³							
	Pb	Li	Mo	Mn	Cr	Sr	Ti	Zn
«Глубокая» «Glubokaya»	0,005	0,455	0,03	1,35	0,025	6,8	0,05	0,05
им. Красина im. Krasina	0,003	2,6	0,02	2,8	0,02	5,0	0,06	0,1
«Майская» «Mayskaya»	0,003	0,34	0,035	0,02	0,013	9,5	0,1	0,1
«Наклонная» «Naklonnaya»	0,003	0,34	0,01	0,02	0,01	8,5	0,04	0,08
«Аютинская» «Ayutinskaya»	0,003	0,22	0,009	0,1	0,01	4,5	0,02	0,1
«Южная» «Yuzhnaya»	0,004	1,3	0,015	0,02	0,015	8,4	0,02	0,22

Таблица 3. Химический состав шахтных вод ликвидируемых шахт Новошахтинского угольного района

Table 3. Chemical composition of mine waters of the liquidated mines of Novoshakhtinsk coal district

Шахта/Mine	Содержание микроэлементов, мг/дм ³ Content of microelements, mg/dm ³						Минерализация, pH Mineralization, pH
	Na	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃	
им. Ленина im. Lenina	920	276	209	245	2680	503	4880
«Западная» «Zapadnaya»	1085	291	206	327	3090	317	5370
им. Кирова im. Kirova	663	316	212	242	2611	500	4880
«Несветаевская» «Nesvetaevskaya»	997	135	114	551	1172	445	4050
«Самбековская» «Sambekovskaya»	1280	154	114	1100	1625	354	4740

Для обоснования комплекса мероприятий по снижению негативных воздействий, сопровождающих ликвидацию шахт, авторами были проведены экспериментальные исследования гидроди-

намического режима выработанного пространства. Установление тенденций затопления выполнено с использованием результатов анализа 1220 измерений в характерных точках, расположенных на горных отводах ликвидируемых шахт. С этой целью были построены графики подъёма уровня шахтных вод в зависимости от времени. Сравнительный анализ фактических данных показал, во-первых, подобие всех графиков по форме. Во-вторых, экспериментальное распределение значений уровней шахтных вод удовлетворительно аппроксимируется параболической регрессией, как, например, для шахты «Наклонная»:

$$y = -873,1 + 31x - 0,271x^2.$$

С учётом экспериментальных коэффициентов динамика затопления выразится следующим уравнением, выведенным по результатам обобщения (табл. 4),

$$y = h_{\text{нач}} + 26,04x - 0,383x^2,$$

где $h_{\text{нач}}$ – начальная глубина затопления, м; x – нормированное время.

Таблица 4. Зависимость динамики затопления выработанного пространства от времени (обобщенная кривая)

Table 4. Time dependence of flooding dynamics of the mined-out space (generalized curve)

№ замера Measure- ment no.	Уровень за- топления, м Flooding level, m	№ замера Measure- ment no.	Уровень за- топления, м Flooding level, m	№ замера Measure- ment no.	Уровень за- топления, м Flooding level, m
1	-396,34	11	-174,27	21	-28,86
2	-370,68	12	-156,28	22	-18,54
3	-345,79	13	-139,05	23	-8,98
4	-321,67	14	-122,60	24	-0,18
5	-298,31	15	-106,91	25	7,84
6	-275,72	16	-91,98	26	15,1
7	-253,90	17	-77,82	27	21,59
8	-232,84	18	-64,43	28	27,32
9	-212,55	19	-51,81	29	32,27
10	-193,03	20	-39,95	30	36,46

Полученная интегральная зависимость изображена на рис. 3.

Установленная тенденции позволяет специалистам научно обоснованно провести выбор вариантов (альтернатив) организационно-технических ликвидационных мероприятий, опираясь на математическую оценку техногенного риска их реализации. При этом целесообразно применить логическую схему «событие (мероприятие) – воздействие на ОПС – негативный отклик системы». По известным формулам рассчитываются вероятности всех видов риска [25].

Важным этапом обоснования плана мероприятий по ликвидации убыточных шахт является расчёт временного критерия, определяющего дату начала подготовки информации (гидрофизического контроля) для принятия управляющего решения. Основная идея данной процедуры состоит в использовании системного и процессного подходов к оценке комплекса природных и техногенных факторов,

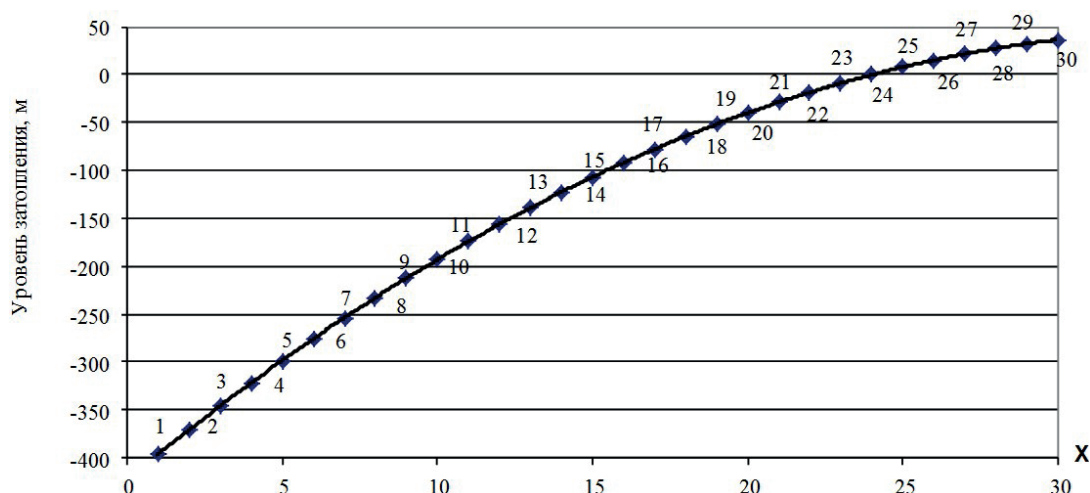


Рис. 3. Зависимость уровня затопления выработанного пространства от времени: X – нормированное время

Fig. 3. Time dependence of the flooding level of the mined-out space: X is the normalized time

сопровождающих технические ликвидационные работы. Для вычисления основных параметров используются следующие исходные данные: объём выработанного подземного пространства, физико-механические свойства горных пород, геологическое строение угленосного массива, глубина разработки угольных пластов, схема гидравлических связей между горными выработками, поверхностными водоёмами и дневной поверхностью. Комплекс вычислительных процедур предлагается производить исходя из гидроэкологической модели затопления горного массива и сетевого графика, определяющего так называемый «критический путь», то есть максимальное время для производства необходимых в каждом конкретном случае ликвидационных работ. В рамках расчёта определяется время выхода шахтных вод на дневную поверхность и максимальное время, необходимое для выполнения технических мероприятий, направленных на предупреждение негативного явления. Одновременно оценивается так называемый «резервный» период, обусловленный потенциальной ошибкой прогнозирования в отношении времени полного затопления выработанного пространства.

Заключение

Системный подход к исследованию угленосного массива на территории ликвидируемых шахт – интегрированный анализ геологического строения, гидравлической связи между объектами техносферы, влияния затопления выработанного пространства с привлечением авторской методологии – позволил:

- определить основные факторы негативного воздействия на окружающую природную среду

при реализации программы организационных мероприятий по ликвидации;

- установить интегральную пространственно-временную характеристику динамики затопления выработанного пространства;
- вывести расчётную формулу для оценки времени начала инструментальных наблюдений за процессом затопления угленосного массива ликвидируемой шахты.

Важно указать, что эколого-экономическая эффективность данной разработки подтверждена практикой использования при закрытии угольных шахт на территории Ростовской области [21].

В рамках дальнейшего развития исследований проблемы, рассмотренной в данной статье, планируется совершенствование методического аппарата анализа техногенных процессов и повышение качества перспективного прогнозирования. В частности, авторы считают насущной необходимостью обоснование и разработку комплекса компьютерных программ для оперативной и эффективной оценки процессов, сопровождающих ликвидацию угольных шахт.

Учитывая, что выявленные закономерности динамики техногенных процессов в угленосном массиве имеют общезначимый характер, логично сделать вывод, согласно которому изложенная методика может быть рекомендована к применению не только для обоснования ликвидационных технических мероприятий, но и при обосновании планов строительства новых шахт во всех угледобывающих регионах России.

Результаты исследования получены в рамках выполнения инициативного научного проекта по государственному заданию № 7.9213.2017/БЧ (7.9213.2017/8.9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Страданченко С.Г., Плешко М.С., Армейсков В.Н. О необходимости проведения комплексного мониторинга подземных объектов на различных стадиях жизненного цикла // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1994 (дата обращения 30.09.2017).
2. Норватов Ю.А., Савельев Д.И., Яшина А.В. Гидрогеологическое обеспечение горных работ при разработке угольных месторождений подземным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 8. – С. 23–28.
3. Restructuring results of Donbass coal mining enterprises / A.A. Belodedov, V.I. Golik, V.B. Zaalishvili, Z.M. Khasheva, L.P. Shulgaty // The Social Sciences. – 2016. – V. 11. – № 16. – P. 4035–4039.
4. Molev M.D., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Theoretical and experimental substantiation of construction regional security monitoring systems technospheric // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2015, September. – № 16. – P. 6787–6792.
5. Golik V., Komashenko V., Morkun V. The economic efficiency of ore fields development technology combination // Metallurgical and Mining Industry. – 2016. – № 4. – P. 111–115.
6. Harris J.M., Roach B. Environmental and Natural Resource Economics. A Contemporary Approach. – New York; Armonk: M.E. Sharpe Inc., 2013. – P. 246–256.
7. Hibbs B.J., Sharp J.M. Hydrogeological impact of the urbanization // Environmental and engineering geoscience. – 2012. – № 18 (1). – P. 3–24.
8. Экономический ущерб от реструктуризации горных предприятий. Донбасса / В.И. Голик, Ю.И. Разоренов, А.А. Белодедов, А.В. Логачев // Социально-экономические проблемы развития южного макрорегиона. – Сборник научных трудов. – Краснодар, 2017. – С. 37–45.
9. Golik V.I., Khasheva Z.M., Shulgaty L.P. Economical efficiency of utilization of allied mining enterprises waste // Journal of the Social Sciences. – 2015. – V. 10. – № 6. – P. 750–754.
10. Лисуткина Л.А., Ганичева Л.З. Оценка состояния природных ресурсов Восточного Донбасса // Инженерный вестник Дона. – 2012. – Вып. 3. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/997> (дата обращения 11.10.2017).
11. Агапов А.Е. Эколого-экономический мониторинг ликвидации последствий закрытия особо убыточных угольных шахт (разрез) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 5. – С. 15–31.
12. Bieda B. Stochastic Analysis in Production Process and Ecology under Uncertainty. – Berlin, New York: Springer, 2012. – 189 p.
13. Молев М.Д., Масленников С.А. Техногенные риски населения больших городов: монография. – Шахты: ИСОиП (филиал) ДГТУ, 2016. – 118 с.
14. Scientific and methodological principles of the analysis and prediction of hydrogeological conditions of mine abandonment / Y.A. Norvatov, I.B. Petrova, D.I. Kotlov, D.I. Savelyev // International mining conference. – Vietnam, 2010. – P. 597–600.
15. Kvrner J., Snilsberg P. Groundwater hydrology of boreal peatlands above a bedrock tunnel–drainage impacts and surface water groundwater interactions // J. Hydrol. – 2011. – № 403. – P. 278–291. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411002460> (дата обращения: 27.10.2017).
16. Jing L. A review of techniques advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2003. – № 40. – P. 283–353.
17. Wang Li, Zhang Xiu Feng. Correlation of ground surface subsidence characteristics and mining disasters under super-thick overlying strata // Journal of China Coal Society. – 2009. – V. 34. – № 8. – P. 1048–1051.
18. Повышение полноты использования недр путем глубокой утилизации отходов обогащения угля / В.И. Голик, В.И. Комащенко, С.Г. Страданченко, С.А. Масленников // Горный журнал. – 2012. – № 9. – С. 91–95.
19. Golik V.I., Razorenov Y.I., Polukhin O.N. Metal extraction from ore beneficiation codos by means of lixiviation in a disintegrator // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – V. 10. – № 17. – P. 38105–38109.
20. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production // Waste Management. – 2017. – V. 61. – P. 40–57.
21. Молев М.Д., Страданченко С.Г. Использование синергетических возможностей геофизических методов при прогнозировании результатов техногенных воздействий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 3. – С. 306–313.
22. Anderson M.P., Woessner W.W. In Applied Groundwater Modeling. – San Diego: Academic Press, 2015. – 564 p.
23. Yu Q., Wang Y.X., Ma R. Monitoring and Modeling the Effects of Groundwater Flow on Arsenic Transport in Datong Basin // Journal of Earth Science. – 2014. – № 25 (2). – P. 386–396.
24. О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2012 году. URL: <http://www.eecca-water.net/file/ecodon.pdf>. (дата обращения 18.10.2017).
25. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятности и математической статистике. – М.: Юрайт, 2011. – 231 с.

Поступила 08.02.2018 г.

Информация об авторах

Молев М.Д., доктор технических наук, профессор кафедры строительства и техносферной безопасности Института сферы обслуживания и предпринимательства (филиала) Донского государственного технического университета.

Масленников С.А., кандидат технических наук, заведующий кафедрой строительства и техносферной безопасности Института сферы обслуживания и предпринимательства (филиала) Донского государственного технического университета.

Занина И.А., кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и техносферной безопасности Института сферы обслуживания и предпринимательства (филиала) Донского государственного технического университета.

Илиев А.Г., кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и техносферной безопасности Института сферы обслуживания и предпринимательства (филиала) Донского государственного технического университета.

UDC 622.3:504.05:628.5

ASSESSMENT OF COAL MINES LIQUIDATION IMPACT ON ECOLOGICAL SITUATION IN THE RUSSIAN DONBASS

Mikhail D. Molev¹,
2playrnd14716@aaanet.ru

Stanislav A. Maslennikov¹,
maslennikovsa@mail.ru

Irina A. Zanina¹,
zaninabzd@yandex.ru

Aleksey G. Iliev¹,
iliev-aleksejj@rambler.ru

¹ Institute of Service Sector and Entrepreneurship (branch) Don State Technical University,
147, Shevchenko street, Shakhty, 346500, Russia.

The relevance of the research is caused by the necessity of carrying out of scientifically grounded technical accompaniment of works on liquidation of unviable coal mines in the Russian Donbass (Rostov region) to minimize negative impact on the environment and people of the region.

The aim of the research is to justify and develop a set of methods for assessment of negative impact of technogenic factors on regional environmental system, accompanying liquidation at the unpromising coal mines.

Objects of researches are coal-bearing rock massif, underground and surface waters in the region, the atmosphere, the waste rock dump and piles.

Methods: integrated system analysis, synthesis of alternatives, methods of mathematical statistics and probability, mathematical modeling, optimization methods and operations research, verification of results.

Results. The authors have developed the methodology to assess the liquidation impact on the environment of the Russian Donbass and proposed scientific-methodical approaches to solving the problem. The main factors that determine the scale and types of negative effects accompanying the organizational and technical processes of unviable coal mines were identified. In particular, it was found that the nature and spatial temporal parameters of technogenic impacts depend on the dynamics of the rise of mine water. A complex of private physical and mathematical models required to describe industrial processes was formed. A systematic approach to experimental studies of coal-rock mass in the territory of the liquidated mines allowed as well setting the integrated spatial-temporal characteristics of the dynamics of flooding of mined-out space. The technique can be recommended for being used to substantiate the liquidation of technical measures in mining and geological conditions of all coal-mining areas of Russia, since it is based on the fundamental points of the physico-mathematical theory, geology and ecology, while the regularities of the dynamics of industrial processes have a universal character. It is important to specify that the environmental and economic efficiency of this development is confirmed by the practice at the closure of the coal mines in the Rostov region.

Key words:

Environmental safety, elimination of mines, negative impact factors, evaluation methodology, system analysis, dynamics of flooding.

The investigation results were obtained within the initiative scientific project on the state task no № 7.9213.2017/БЧ (7.9213.2017/8.9).

REFERENCES

1. Stradanchenko S.G., Pleshko M. S., Armeyskov V.N. O neobkhodimosti provedeniya kompleksnogo monitoringa podzemnykh ob'ektov na razlichnykh stadiyakh zhiznennogo tsikla [The need for comprehensive monitoring of underground facilities at different stages of the life cycle]. *Inzhenerny vestnik Dona*, 2013, no. 4. Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1994 (accessed 30 September 2017).
2. Norvatov Yu.A., Saveliev D.I., Yashin A.V. Hydrogeological provision of mining operations in development of coal deposits by underground mining. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2014, no. 8, pp. 23–28. In Rus.
3. Belodedov A.A., Golik V.I., Zaalishvili V.B., Khasheva Z.M., Shulgaty L.P. Restructuring results of Donbass coal mining enterprises. *The Social Sciences*, 2016, vol. 11, no. 16. pp. 4035–4039.
4. Molev M.D., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Theoretical and experimental substantiation of construction regional security monitoring systems technospheric. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2015 September, no. 16, pp. 6787–6792.
5. Golik V., Komashenko V., Morkun V. The economic efficiency of ore fields development technology combination. *Metallurgical and Mining Industry*, 2016, no. 4, pp. 111–115.
6. Harris J.M., Roach B. *Environmental and Natural Resource Economics. A Contemporary Approach*. New York; Armonk, M.E. Sharpe Inc., 2013. pp. 246–256.
7. Hibbs B.J., Sharp J.M. Hydrogeological impact of the urbanization. *Environmental and engineering geoscience*, 2012, no. 18 (1), pp. 3–24.
8. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Belodedov A.A., Logachev A.V. Ekonomicheskii usherb ot restrukturalizatsii gornykh predpriyatiy Donbassa [Economic losses from restructuring Donbass mining enterprises]. *Sotsialno-ekonomicheskie problemy razvitiya yuzhnogo makroregiona. Sbornik nauchnykh trudov*. Krasnodar, 2017. pp. 37–45.

9. Golik V.I., Khasheva Z.M., Shulgatyi L.P. Economical efficiency of utilization of allied mining enterprises waste. *Journal of the Social Sciences*, 2015, vol. 10, no. 6, pp. 750–754.
10. Lisutina L.A., Ganicheva L.Z. Otsenka sostoyaniya prirodnnykh resursov Vostochnogo Donbassa [Assessment of natural resources of the Eastern Donbass]. *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2012, Iss. 3. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/997> (accessed 18 October 2017).
11. Agapov A.E. Ecological and economic monitoring the aftermath of the closure of particularly unprofitable coal mines (mines). *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2008, no. 5, pp. 15–31. In Rus.
12. Bieda B. *Stochastic Analysis in Production Process and Ecology Under Uncertainty*. Berlin, New York, Springer, 2012. 189 p.
13. Molev M.D., Maslennikov S.A. *Tekhnogennyye riski naseleniya bolshikh gorodov: monografiya* [Technological risks the population of the big cities: monograph]. Shahty, ISOiP (filial) DGTU Publ., 2016. 118 p.
14. Norvatov Y.A., Petrova I.B., Kotlov D.I., Saveliev D.I. Scientific and methodological principles of the analysis and prediction of hydrogeological conditions of mine abandonment. *International mining conference*. Vietnam, 2010. pp. 597–600.
15. Kvrner J., Snilsberg P. Groundwater hydrology of boreal peatlands above a bedrock tunnel–drainage impacts and surface water groundwater interactions. *J. Hydrol.*, 2011, no. 403, pp. 278–291. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411002460> (accessed 27 October 2017).
16. Jing L. A review of techniques advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, no. 40, pp. 283–353.
17. Wang Li, Zhang Xiu-feng. Correlation of ground surface subsidence characteristics and mining disasters under super-thick overlying strata. *Journal of China Coal Society*, 2009, vol. 34, no. 8, pp. 1048–1051.
18. Golik V.I., Komashenko V.I., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Povyshenie polnoty ispolzovaniya nedr putem glubokoy utilizatsii otkhodov obogashcheniya uglia [Increase in completeness of using subsoil by deep disposal of waste coal]. *Gornyy zhurnal*, 2012, no. 9, pp. 91–95.
19. Golik V.I., Razorenov Y.I., Polukhin O.N. Metal extraction from ore beneficiation codas by means of lixiviation in a disintegrator. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 17, pp. 38105–38109.
20. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production. *Waste Management*, 2017, vol. 61, pp. 40–57.
21. Molev M.D., Stradanchenko S.G. Use of synergetic possibilities of geophysical methods in predicting the results of anthropogenic impacts. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2016, no. 3, pp. 306–313. In Rus.
22. Anderson M.P., Woessner W.W. *In applied groundwater modeling*. San Diego, Academic Press, 2015. 564 p.
23. Yu Q., Wang Y.X., Ma R. Monitoring and Modeling the Effects of Groundwater Flow on Arsenic Transport in Datong Basin. *Journal of Earth Science*, 2014, no. 25 (2), pp. 386–396.
24. *O sostoyanii okruzhayushchey sredy i prirodnnykh resursov Rostovskoy oblasti v 2012 godu* [On the state of the environment and natural resources of the Rostov region in 2012]. Available at: <http://www.eecca-water.net/file/ecodon.pdf>. (accessed 18 October 2017).
25. Gmurman V.E. *Rukovodstvo k resheniyu zadach po teorii veroyatnosti i matematicheskoy statistike* [A guide to decision the tasks of the theory of probability and mathematical statistics]. Moscow, Yurayt Publ., 2011. 231 p.

Received: 8 February 2018.

Information about the authors

Mikhail D. Molev, Dr. Sc., professor, Institute of Service Sector and Entrepreneurship (branch) Don State Technical University.

Stanislav A. Maslennikov, Cand. Sc., head of the department, Institute of Service Sector and Entrepreneurship (branch) Don State Technical University.

Irina A. Zanina, Cand. Sc., associate professor, Institute of Service Sector and Entrepreneurship (branch) Don State Technical University.

Aleksey G. Iliev, Cand. Sc., associate professor, Institute of Service Sector and Entrepreneurship (branch) Don State Technical University.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректura 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 29.08.2018. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 18,26. Уч.-изд. л. 16,52.
Заказ xxx-18. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ