



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

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

ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Том 332, № 1, 2021

Издательство
Томского политехнического университета
2021

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА.
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРесурсов**

Редакционная коллегия

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. 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)
Старostenko B.I., д-р физ.-мат. наук (Украина)
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Уленеков 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)
Алексеенко С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)
Руи Д., PhD (Португалия)
Зиатдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)
Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия)
Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия)
Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия)
Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия)
Антиленко 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)
Зюзев А.М., д-р техн. наук (Россия)
Третьяк А.Я., д-р техн. наук (Россия)
Арбузов С.И., д-р геол.-минерал. Наук (Россия)
Ковалев В.З., д-р техн. наук (Россия)
Романенко С.В., д-р хим. наук (Россия)
Кирьянова Л.Г., 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, 2021

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



TOMSK
POLYTECHNIC
UNIVERSITY

ISSN (print) – 2500_1019
ISSN (on_line) – 2413_1830

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

Volume 332, № 1, 2021

Tomsk Polytechnic University Publishing House
2021

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

Editorial Board

Semiletov I.P., editor in chief, 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)
Belozerov V.B., Dr. Sc. (Russia)
Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)
Silkin V.M., PhD (Spain)
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)
Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)
Teipel U., Dsc (Germany)
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)
Ilyin A.P., Dr. Sc. (Russia)
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)
Alekseenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)
Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia)
Rui D., PhD (Portugal)
Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (South Korea)
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)
Poilov V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Lotov V.A., Dr. Sc. (Russia)
Sofronov V.L., Dr. Sc. (Russia)
Bouznik V.M., Dr. Sc. (Russia)
Zakharov Yu.A., Dr. Sc. (Russia)
Antipenko V.R., Dr. Sc. (Russia)
Golik V.I., Dr. Sc. (Russia)
Abutalipova E.M., Dr. Sc. (Russia)
Polishchuk V.I., Dr. Sc. (Russia)
Khamitov R.N., Dr. Sc. (Russia)
Zyuzev A.M., Dr. Sc. (Russia)
Tretyak A.Ya., Dr. Sc. (Russia)
Arbusov S.I., Dr. Sc. (Russia)
Kovalev V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Romanenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Kiryanova L.G., Cand. Sc. (Russia)
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)

AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

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

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Модифицированные полиэтиленполиамином и эпоксидной смолой цеолиты для извлечения ионов свинца из сточных вод Камбарова Э.А., Гавриленко М.А., Бектенов Н.А.	7	Zeolites modified with polyethylene polyamine and epoxy resin to extract lead ions from wastewater Kambarova E.A., Gavrilenko M.A., Bektenov N.A.
Монтмориллонит как перспективный композитный минерал для создания современных удобрений пролонгированного действия Рудмин М.А., Рева И.В., Якич Т.Ю., Соктев Б.Р., Буяков А.С., Табакаев Р.Б., Ибраева К.	14	Montmorillonite as a prospective composite mineral for the creation of modern slow-release fertilizers Rudmin M.A., Reva I.V., Yakich T.Yu., Soktov B.R., Buyakov A.S., Tabakaev R.B., Ibraeva K.
Использование вероятностных моделей нефтегазоносности в целях ранжирования перспективных структур, находящихся в пределах Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей Галкин В.И., Мелкишев О.А., Варушкин С.В.	23	Use of probabilistic models of oil and gas potential for ranking the perspective structures located within pool outline of the Verkhnekamsky deposit of potassium and magnesium salts Galkin V.I., Melkishev O.A., Varushkin S.V.
Разработка конструкции опоры для подземного крепления трубопровода в зонах распространения островной и прерывистой мерзлоты Шамилов Х.Ш., Султанмагомедов Т.С., Султанмагомедов С.М.	31	Design of the support for underground pipeline fastening in conditions of insular and discontinuous permafrost zones Shamilov Kh.Sh., Sultanmagomedov T.S., Sultanmagomedov S.M.
Метод регионального прогноза нефтегазоносности территорий алгоритмами машинного обучения на примере Тюменской свиты Западной Сибири Ивлев Д.А.	41	Method for regional forecast of oil and gas potential territories by machine learning algorithms on the example of the Tyumen formation of Western Siberia Ilev D.A.
Технология магнитной обработки воды против солеотложения: теория и практика Томилин А.К., Беспалов В.И., Беспалов В.В.	54	Water magnetic processing technology against salt deposition: theory and practice Tomilin A.K., Bespalov V.I., Bespalov V.V.
Элементы-примеси в углях месторождения Фандюшкансое поле (Беринговский каменноугольный бассейн, Чукотка) Скиба Д.А., Кузеванова Е.В., Шишов Е.П.	64	Trace elements in the Fandyushkinskoe pole coal deposit (Bering coal basin, Chukotka) Skiba D.A., Kuzevanova E.V., Shishov E.P.
Бром в листьях тополя урбанизированных территорий: природные и антропогенные источники поступления Юсупов Д.В., Рихванов Л.П., Барановская Н.В., Робертус Ю.В., Радомская В.И., Павлова Л.М., Дорохова Л.А., Судыко А.Ф.	76	Bromine in the poplar leaves of urban areas: natural and anthropogenic sources of scattering Yusupov D.V., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Robertus Yu.V., Radomska V.I., Pavlova L.M., Dorokhova L.A., Sudyko A.F.
Оценка теплового состояния электродвигателей переменного тока компрессорных станций магистральных газопроводов Зюзев А.М., Крюков О.В., Метельков В.П., Михальченко С.Г.	88	Estimation of thermal state of AC electric motors of trunk gas pipelines compressor stations Ziuzev A.M., Kryukov O.V., Metelkov V.P., Mikhalkchenko S.G.
Районирование участков строительства прудов-отстойников Эльгинского каменноугольного месторождения в Якутии Строкова Л.А.	97	Zoning of construction sites of the settling ponds of the Elga coal field in Yakutia Strokova L.A.
Обобщенная модель двухкатушечной синхронной электромагнитной машины для технологических систем виброударного действия Нейман Л.А., Нейман В.Ю.	107	Generalized model of a two-coil synchronous electromagnetic machine for vibratory impact technological systems Neyman L.A., Neyman V.Yu.
Роль системы «вода–порода» в процессах формирования состава природных вод Севастопольской городской агломерации Хващевская А.А., Новиков Д.А., Копылова Ю.Г., Сметанина И.В., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф.	118	The role of the «water–rock» system in formation of natural water composition of the Sevastopol city Khvaschhevskaya A.A., Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Smetanina I.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F.
Исследование влияния параметров системы «свая–грунт» на динамические атрибуты акустического сигнала с использованием численного моделирования Чуркин А.А., Капустин В.В., Лозовский И.Н., Жостков Р.А.	129	Study of influence of «pile–soil» system parameters on the acoustic signal dynamic attributes using numerical modelling Churkin A.A., Kapustin V.V., Lozovsky I.N., Zhostkov R.A.
Исследование форм миграции металлов в реках, подверженных влиянию шахтных вод Кизеловского угольного бассейна Фетисова Н.Ф.	141	Study of forms of metals migration in rivers affected by acid mine drainage of the Kizel coal basin Fetisova N.F.
Routes of laying gas supply system pipeline Medvedeva O.N., Penenko V.D.	153	Маршруты прокладки трубопроводных систем газоснабжения Медведева О.Н., Пененко В.Д.

Тяжелые металлы в городских почвах: оценка содержания и экологического риска Жарикова Е.А.	164	Assessment of heavy metals content and environmental risk in urban soils Zharikova E.A.
Фотоэлектростанции с электрохимическим и тепловым накоплением энергии в Ираке Лукутин Б.В., Аль-Мажди Каррап Хамид	174	Photovoltaic power plants with electrochemical and thermal energy storage in Iraq Lukutin B.V., Karrar Hameed Kadhim
Геохимические процессы накопления тяжелых металлов в ландшафтах Южного Урала Шабанов М.В., Стрекулов Г.Б.	184	Geochemical processes of accumulation of heavy metals in the landscapes of the Southern Urals Shabanov M.V., Strekulev G.B.
Оценка состава атмосферных осадков территории Финляндии и Карелии методами многомерного анализа Феоктистов В.М., Лери М.М.	193	Assessment of atmospheric precipitation composition in the territory of Finland and Karelia Republic using multivariate analysis methods Feoktistov V.M., Leri M.M.
Определение параметров схемы замещения погружного электродвигателя на основании данных испытаний Шубин С.С., Ямалиев В.У., Глазырин А.С., Буньков Д.С., Кладиев С.Н., Раков И.В., Боловин Е.В., Ковалев В.З., Хамитов Р.Н.	204	Estimation of submersible induction motor equivalent circuit parameters based on test data Shubin S.S., Yamaliev V.U., Glazyrin A.S., Bunkov D.S., Kladiev S.N., Rakov I.V., Bolovin E.V., Kovalev V.Z., Khamitov R.N.

УДК 544.7

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ПОЛИЭТИЛЕНПОЛИАМИНОМ И ЭПОКСИДНОЙ СМОЛОЙ ЦЕОЛИТЫ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИОНОВ СВИНЦА ИЗ СТОЧНЫХ ВОД

Камбарова Эльмира Абдувалиевна¹,
ilmira080884@mail.ru

Гавриленко Михаил Алексеевич²,
dce@mail.ru

Бектенов Несипхан Абжапарович³,
bekten_1954@mail.ru

¹ Таразский Государственный университет им. М.Х. Даули, Казахстан, 080000, г. Тараз, ул. Толе би, 60.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина 30.

³ Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Казахстан, 050000, г. Алматы, пр. Достык, 13.

Актуальность. Создание эффективных и недорогих сорбентов широкого профиля, одним из актуальных направлений которого является дизайн сорбентов для очистки вод различного назначения, постоянно востребовано в науке и производстве. Новые ионообменные сорбенты позволяют решать сразу две связанные задачи: очистка технической воды предприятий и регулирование содержания токсикантов в окружающей среде. Модификация ионообменников приводит к улучшению сорбционных и кинетических характеристик, особенно перспективны природные высокопроницаемые сетчатые полизелектролиты с большой скоростью поглощения ионов крупных размеров. Модификация этих минералов поверхностным слоем сополимеров с эпоксидными группами, полученными при отверждении смеси полиэтиленполиамина и эпоксидной смолы, позволяет получить новые дешевые сорбционные материалы для очистки воды от тяжелых металлов, преимущественно катионов свинца Pb^{2+} . Исследование обусловлено необходимостью очистки сточных вод металлургических предприятий от катионов Pb^{2+} , которые относятся к токсичным веществам, проявляющим мутагенные, канцерогенные свойства, кроме того, встроенные в биогенные формы ионы обладают свойством локально накапливаться в природных объектах, тем самым являясь сильным экотоксикантом.

Цель: определить сорбционные свойства природного цеолита и его модифицированной формы по отношению к иону Pb^{2+} и оптимизировать условия сорбции.

Объекты: Шанхайский природный цеолит и его модифицированная полизиленполиамином (ПЭПА) и эпоксидной смолой (ЭД-20) формы.

Методы: спектрофотометрия.

Результаты. Получены модифицированные полизиленполиамином и эпоксидной смолой сорбенты на основе Шанхайского природного цеолита. Установлены оптимальные условия pH сорбции ионов Pb^{2+} в статических условиях. При использовании модифицированного природного цеолита в диапазоне pH 7–9 извлечение ионов свинца происходит на 90 % по сравнению с исходным цеолитом. Модифицированный природный цеолит может быть использован в качестве сорбционного материала для очистки промышленных и сточных вод.

Ключевые слова:

Шанхайский природный цеолит, сорбция, катион Pb^{2+} , полизиленполиамин, эпоксидная смола.

Введение

Ионы свинца являются стойкими экотоксикантами с низкой скоростью удаления из экосистем и организма человека. Значительная биоаккумуляция привела к включению ионов свинца Pb^{2+} в контрольные списки Евросоюза согласно директиве ЕС 2013/39 [1, 2] по регламенту контроля на содержание ионов тяжелых металлов в объектах окружающей среды. Концентрация Pb^{2+} в водах рек может колебаться от 0,1 до 100 мкг/л, причем среднее значение обычно не превышает 10 мкг/л. В непроточных водоемах это значение ниже и составляет 4,5 мкг/л [3]. Допустимое содержание Pb^{2+} в питьевой воде находится в диапазоне 1–60 мкг/л в зависимости от региона, причем в Европе и России не превышает 20 мкг/л [4].

С учетом объемов потребляемой воды, физико-химическая адсорбция является наиболее привлекательной методикой очистки, что обусловлено широ-

ким ассортиментом разработанных сорбентов, низким энергопотреблением и высокой эффективностью [5, 6]. Обычные очистные сооружения эффективны в отношении органических веществ, однако удаление ионов тяжелых металлов не всегда происходит полностью, что делает необходимыми доочистку и контроль качества воды. Синтетические ионообменные материалы являются эффективными сорбентами для Pb^{2+} и других тяжелых металлов, причем наиболее распространенными становятся модифицированные ионообменники [7]. Разработанные и распространенные коммерческие сорбенты обеспечивают высокие скорости удаления, но их высокая стоимость является недостатком в крупнотоннажных системах. Таким образом, поиск альтернативы в виде недорогих природных сорбентов с минимальным модифицированием поверхности доступными реагентами является насущной необходимостью [8]. Исследования проде-

монстрировали эффективность использования для этой цели активированного угля, углеродных нанотрубок, природных и синтетических цеолитов [9, 10]. Разработка казахстанских природных месторождений цеолитов предоставляет новые природные материалы как для интенсивного развития фундаментальных исследований сорбентов, так и для практического применения. Исследование химического и фазового состава цеолитовых туфов Тайжургенского и Шанхайского месторождений показало возможность практического использования казахстанских цеолитов [11]. Установлено, что такие цеолиты с высоким содержанием кремнезема являются эффективными адсорбентами для очистки загрязненной воды [12]. Например, для удаления ионов тяжелых металлов из воды рекомендован мезапористый цеолитный сорбент фожазит, поверхность которого обработана щелочью [13].

Другой цеолит, модифицированный смесью окисленных полиэтилена и полипропилена, использовали для удаления ионов Pb^{2+} и Cu^{2+} из воды [14]. Исследован процесс очистки воды от Ni^{2+} , Co^{2+} , Pb^{2+} и Cu^{2+} природным цеолитом Ягодинского месторождения Камчатской области в диапазоне концентраций в воде 0,5–3,5 мг-экв/л. Установлено, что модификация поверхности серной кислотой приводит к активации функциональных групп и увеличению его эффективности [15]. Такие результаты свидетельствуют о том, что модифицированные природные цеолиты являются перспективными недорогими материалами для очистки воды от тяжелых металлов [16].

Аналитические методы определения ионов Pb^{2+} включают в себя использование пламенной и электротермической атомно-абсорбционной спектрометрии, атомно-абсорбционной спектрометрии с графитовой печью (GFAAS), атомной индуктивно-связанной плазмой эмиссионной спектрометрии (ICP-AES) и спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) [17–21]. Эти методы имеют достаточную чувствительность, однако некоторые из них очень дороги и недоступны для обычной аналитической лаборатории. Низкие концентрации катионов свинца могут быть обнаружены методом флуоресцентной спектрометрии [22] с высокой степенью точности и повторяемости, в короткое время анализа [23]. Для большинства методов низкий уровень токсичного присутствия металла не соответствует инструментальной чувствительности, что требует использования предварительного концентрирования на сорбентах. Наиболее эффективным по соотношению чувствительности аналитических характеристик и трудоемкости использования является спектрофотометрический метод [24–27]. Увеличить чувствительность данного вида анализа можно за счет добавления селективного органического реагента, который переводит определяемый ион в хромогенное соединение [28].

Объектом настоящего исследования является оценка изменения сорбционных свойств Шанхайского природного цеолита и его модифицированных полиэтиленполиамином (ПЭПА) и эпоксидной смолой (ЭД-20) форм по отношению к Pb^{2+} из-за таких

факторов, как pH среда, концентрация иона в растворе и время контакта.

Экспериментальная часть

Модификация цеолита

Шанхайский цеолит получен из месторождения Республики Казахстан, Алматинская область, Кербулакский район, г. Сары-Озек. Перед модификацией предварительно минерал измельчали до диаметра зерен 0,4 мм. Для повышения извлекающей способности и селективности природного Шанхайского цеолита сорбент модифицировали полиэтиленполиамином (ПЭПА, Россия, ТУ 2413-357-00203447-9920) и эпоксидной смолой (ЭД-20, Россия, ГОСТ 10587-84). К 100 г полученного цеолитного порошка добавляли ЭД-20 массой 30 г до полного покрытия поверхности, затем небольшими порциями добавляли 30 г ПЭПА и перемешивали в течение 10 мин. Полученную массу выгружали в фарфоровые чашки и отверждали в сушильном шкафу в течение 10 ч при 120 °C. Затем массу вынимали и охлаждали при комнатной температуре в течение 10 ч. Образцы полученного модифицированного цеолита обрабатывали 5 % раствором HCl для регенерации хлоридной формы, затем путем отмычки водой доводили до нейтральной pH и обрабатывали 5 % раствором NaOH. Полученный модифицированный цеолит сушили до постоянного веса в муфельной печи при 120 °C. Анионообменную емкость продукта (СОЕ, мг-экв/г) определяли в статических условиях по 0,1 Н раствору HCl [29].

Реактивы, растворы, материалы

Спектрофотометрическое определение Pb^{2+} в растворе после сорбции связано с образованием комплексного соединения, которое можно охарактеризовать взаимодействием ионов Pb^{2+} с сульфасазеном. Данное комплексное соединение окрашено в желто-оранжевый цвет [30]. В работе использованы растворы 10 мг/л $Pb(NO_3)_2$, 0,05 М $Na_2B_4O_7$, 0,1М HNO_3 , 0,1М NaOH. Растворы исходных солей готовили по точной навеске, растворы меньших концентраций – последовательным разбавлением исходных растворов непосредственно перед использованием. Растворы 0,05% сульфасазена готовили растворением в 0,05 моль/л $Na_2B_4O_7$. Для всех растворов использована бидистилированная вода.

Статическую сорбционную емкость сорбента (A) рассчитывали по формуле:

$$A(Pb^{2+}) = \frac{(C_{\text{исх}} - C_{\text{равн}})}{m} \cdot V,$$

где $A(Pb^{2+})$ – емкость сорбента, мг/г; $C_{\text{исх}}$ и $C_{\text{равн}}$ – исходная и равновесная (остаточная) концентрации ионов металлов в растворе соответственно, мг/л; V – объем раствора, л; m – масса сорбента, г.

Степень извлечения ионов металлов ($E, \%$) рассчитывали по формуле:

$$E = \frac{(C_{\text{исх}} - C_{\text{равн}})}{C_0} \cdot 100 \%,$$

где $C_{\text{исх}}$ – исходная концентрация иона металла в растворе, мг/л; $C_{\text{равн}}$ – равновесная (остаточная) концентрация иона металла в растворе, мг/л.

Аппаратура и приборы

Спектрофотометрические измерения проводили на спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu, Япония). Оптическую плотность измеряли при длине волн 530 нм в кюветах толщиной слоя 1 см. Для перемешивания использовали мультироторатор MultiBio RS-24 (BioSan, Латвия).

Результаты и их обсуждение

Изучена сорбция ионов Pb^{2+} цеолитом и его модифицированными ПЭПА и ЭД-20 формами в интервале pH от 1,68 до 12,45. Количественное определение ионов свинца в водных растворах проводили по предварительно построенному градуированному графику (рис. 1). Исследование показало, что максимальная сорбционная емкость (рис. 2) модифицированной формы (МФ) в данных условиях по Pb^{2+} составляет 0,5 мг/г, для природного цеолита (ПЦ) 0,25 мг/г при pH 6,86, в этих условиях сорбция МФ выше, чем на ПЦ, на 50 %. При pH 9,18 сорбция на МФ выше на 90 %. Изучение влияния pH на величину сорбции ионов Pb^{2+} из водных растворов на ПЦ и его МФ в зависимости от pH среды показало, что оптимальной кислотностью среды для сорбции свинца является интервал pH 6,86–9,18. Выше этого интервала наблюдаются образование гидроксильных комплексов ионов свинца, ниже интервала использования сульфарсазена приводят к появлению комплексов нестабильного состава.

A

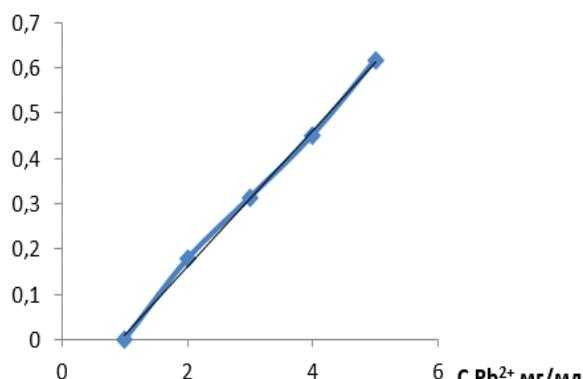


Рис. 1. Градуировочная зависимость для определения Pb^{2+} сульфарсазеном в водном растворе

Fig. 1. Calibration dependence for Pb^{2+} determination by sulfarsazene in aqueous solution

Продолжительность контакта сорбента с раствором Pb^{2+} влияет на степень извлечения (рис. 3). С увеличением длительности контакта величина сорбции повышается, затем после 90 мин становится постоянной.

По результатам модификации природного цеолита с ПЭПА и ЭД-20 доказано повышение сорбционной емкости к ионам Pb^{2+} , что проявляется в изменении изотермы сорбции (рис. 4).

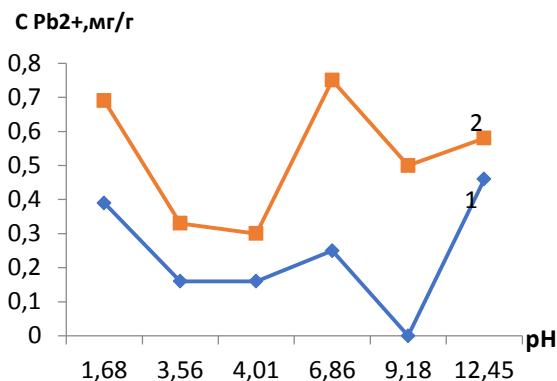


Рис. 2. Сравнительная характеристика сорбции Pb^{2+} природного цеолита (1) и его модифицированной формы (2) в зависимости от pH среды

Fig. 2. Comparative characteristics of Pb^{2+} sorption of natural zeolite (1) and its modified form (2) depending on medium pH

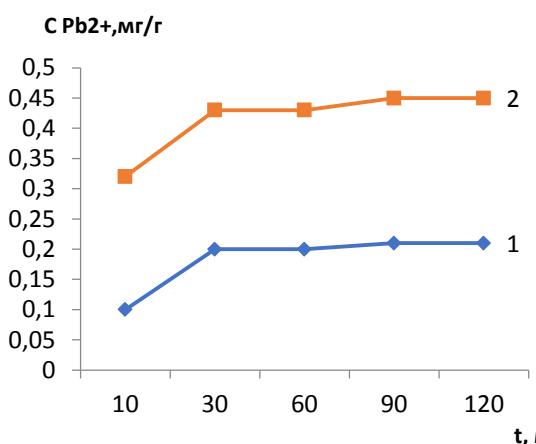


Рис. 3. Сравнительная характеристика сорбции Pb^{2+} природного цеолита (1) и его модифицированной формы (2) при нейтральной среде в зависимости от времени контакта

Fig. 3. Comparative characteristics of Pb^{2+} sorption of natural zeolite (1) and its modified form (2) in a neutral medium depending on the contact time

Сорбционная ёмкость для Pb^{2+} значительно выше по сравнению с ПЦ. Количество сорбированного Pb^{2+} повышается с ростом концентрации исходного раствора. При концентрации Pb^{2+} в исходном растворе менее 0,01 моль·л⁻¹ достигнута практически полная сорбция Pb^{2+} . Изотерма сорбции ПЦ имеет L-образную форму. Для изотерм класса L характерны равномерное заполнение поверхности и отсутствие конкуренции со стороны растворителя. Также возможен процесс переориентации ассоциатов комплексов свинца относительно поверхности сорбента.

Изотерма сорбции МФ имеет S-образную форму с вогнутым начальным участком. При возрастании концентрации сорбата в растворе увеличивается сорбционная ёмкость сорбента, что связано с изменением ориентации адсорбированных ионов Pb^{2+} относительно поверхности сорбента или с быстрым переходом к полимолекулярной адсорбции. Далее следует

точка перегиба и появляется второе плато, что придает таким изотермам характерный S-образный вид. Причина заключается в сильном взаимодействии между адсорбированными катионами Pb^{2+} при одновременном ослаблении их взаимодействия с поверх-

ностью сорбента, в этом случае адсорбированные катионы Pb^{2+} стремятся расположиться на поверхности в виде скоплений. Экспериментальные данные и параметры изотерм Ленгмюра для сорбции Pb^{2+} с образцами ПЦ и МФ представлены в таблице.

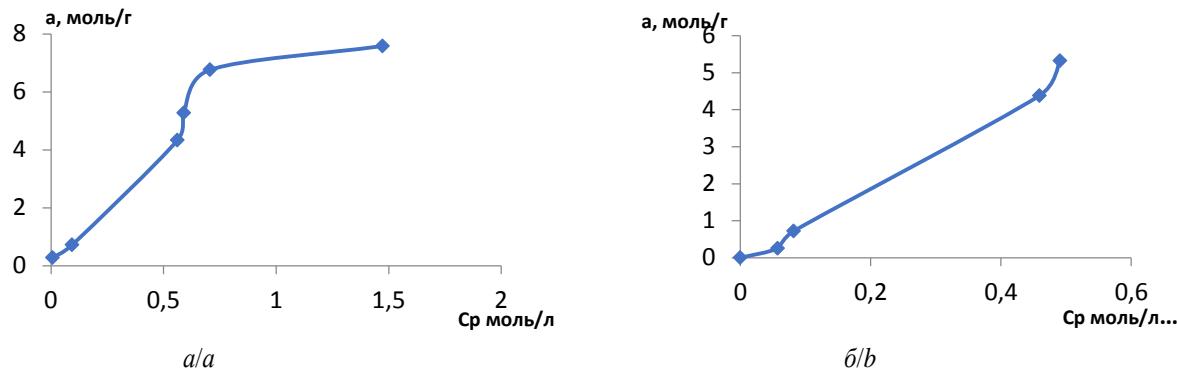


Рис. 4. Изотерма природного цеолита (а) и его модифицированной формы (б)

Fig. 4. Isotherm of natural zeolite (a) and its modified form (b)

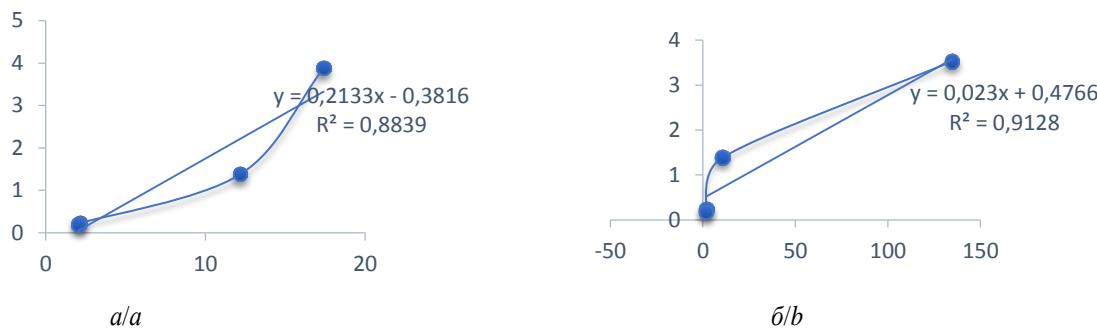


Рис. 5. Параметры изотерм Ленгмюра для сорбции Pb^{2+} с образцами модифицированной формы (а) и природного цеолита (б)

Fig. 5. Parameters of the Langmuir isotherms for Pb^{2+} sorption with samples of modified form (a) and nature zeolite (b)

Таблица. Экспериментальные данные сорбции Pb^{2+} с образцами природного цеолита и его модифицированной формы и результаты их обработки

Table. Experimental data on Pb^{2+} sorption with natural zeolite and its modified form samples and the results of their processing

Модифицированная форма/Modified form	C , моль/л C , mol/l	C_s , моль/л C_s , mol/l	a , моль/г a , mol/g	Уравнение Ленгмюра The Langmuir equation	
				$1/C_s$	$1/a$
	0,05	0,06	0,26	17,41	3,88
	0,10	0,08	0,72	12,19	1,38
	0,25	0,46	4,38	2,18	0,23
	0,50	0,49	5,32	2,04	0,19
	0,75	0,50	6,87	2,01	0,15
	1,00	0,22	8,21	4,45	0,12
Природный цеолит/Natural zeolite			Уравнение Ленгмюра The Langmuir equation		
			$1/C_s$	$1/a$	
	0,05	0,01	0,28	134,6	3,54
	0,10	0,09	0,72	10,67	1,40
	0,25	0,56	4,33	1,78	0,23
	0,5	0,59	5,27	1,70	0,19
	0,75	0,71	6,76	1,41	0,15
	1,00	1,47	7,58	0,68	0,13

Графические и расчетные данные показывают возрастание сорбционной емкости модифицированного цеолита, что связано с увеличением количества функциональных групп на поверхности сорбента.

Заключение

Получен сорбент на основе Шанхайского природного цеолита и его модифицированных полиэтиленполиамином (ПЭПА) и эпоксидной смолой (ЭД-20) форм. Установлена оптимальная pH от 7 до 9 для очистки воды от ионов свинца. В указанном диапазоне pH при использовании модифицированного природного цеолита происходит извлечение ионов свинца на 90 %. Таким образом, для достижения полноты извлечения необходимо в два раза меньше модифицированного сорбента в нейтральной среде и в пять раз меньше в слабощелочной среде. Время сорбции не превышает 90 мин. Модифицированный природный цеолит может быть эффективно использован в качестве сорбционного материала для очистки сточных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tuzen M., Soylak M., Parlar K. Cadmium and lead contamination in tap water samples from Tokat, Turkey // Bull. Environ. Contam. Toxicol. – 2005. – V. 75 (2). – P. 284–289.
2. Опасен ли свинец в воде? / И.Н. Андрусишина, И.А. Голуб, З.В. Малецкий, И.П. Лубянова // Вода и водоочистные технологии. Научно-технические вести. – 2016. – № 2. – С. 40–50.
3. ГОСТ 24902-81. Вода хозяйствственно-питьевого назначения. Общие требования к полевым методам анализа. – М.: Стандартинформ, 1999. – 114 с.
4. WHO guidelines for drinking water quality. V. 2. 2nd ed. – Geneva: World Health Organization, 1996. – 973 p.
5. Liang P., Sang H. Determination of trace lead in biological and water samples with dispersive liquid–liquid microextraction preconcentration // Analytical Biochemistry. – 2008. – V. 380. – P. 21–25.
6. Исследование фазового и химического состава природных цеолитов и катализаторов на их основе / К.А. Жубанов, Р.М. Бабусенко, В.Ф. Тимофеева, К.Н. Солохина // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия химии и технологии. – 2000. – № 5. – С. 158–162.
7. Water purification from heavy metals with ionites / N.A. Bektenov, I.G. Tsoty, E.A. Kambarova, L.K. Ybyrayymzhanova // The scientific heritage. – 2019. – V. 1. – № 38. – P. 30–34.
8. Zaiku X., Qingling C., Chengfang Z. Influence of citric acid treatment on the surface acid properties of zeolite beta 111 // Physical Chemistry. – 2000. – V. 104 B. – № 13. – P. 2853–2859.
9. Состав и термоустойчивость цеолитодержащего туфа Шанхайского месторождения / К.А. Жубанов, Р.М. Бабусенко, В.Ф. Тимофеева, Н.Н. Солохина // Вестник Казахского национального университета имени аль-Фараби. Серия химия – 2004. – № 3. – С. 75–78.
10. Курбаналиева Г.В., Кудереева Л.А., Конусбаев С.Р. Влияние кислотной активации на физико-химические свойства природных цеолитов // Вестник Казахского национального университета имени аль-Фараби. Серия химия. – 2004. – Т. 34. – № 2. – С. 52–56.
11. Ергожин Е.Е., Акимбаева А.М. Органоминеральные сорбенты и полифункциональные системы на основе природного алюмосиликатного и угольно-минерального сырья. – Алматы: Изд-во ТОО «Print-S», 2007. – 373 с.
12. High-silica zeolites for adsorption of organic micro-pollutants in water treatment / Nan Jiang, Ran Shang, S.G.J. Heijman, C. Luuk // A review Water Research. – 2018. – V. 144. – P. 145–161.
13. Sulaiman K.O., Sajid M., Alhooshani K. Application of porous membrane bag enclosed alkaline treated Y-Zeolite for removal of heavy metal ions from water // Microchemical Journal. – 2020. – V. 152. – P. 124–135.
14. Molecular dynamics simulation of water purification using zeolite MFI nanosheets / S. Rassoulinejad-Mousavi, J. Azamat, A. Khataee, Y. Zhang // Separation and Purification Technology. – 2020. – V. 234. – 116080.
15. Belova T.P. Adsorption of heavy metal ions (Cu^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} and Fe^{2+}) from aqueous solutions by natural zeolite // Heliyon. – 2019. – V. 5. – 02320.
16. Development of HZSM-12 zeolite for catalytic degradation of high-density polyethylene / A.O.S. Silva, M.J.B. Souza, A.M.G. Pedrosa, A.C.F. Coriolano, A.S. Araujo // Microporous and Mesoporous Materials. – 2017. – V. 244. – P. 1–6.
17. Experimental study of catalytic pyrolysis of polyethylene and polypropylene over USY zeolite and separation to gasoline and diesel-like fuels / C. Kassargy, S. Awad, G. Burnens, K. Kahine // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2017. – V. 127. – P. 31–37.
18. Intensification of supercritical water oxidation (ScWO) process for landfill leachate treatment through ion exchange with zeolite / A.P. Jambers Scandelai, J.P. Zottesso, V. Jegatheesan, L. Cardozo-Filho, C. Tavares // Waste Management. – 2020. – V. 101. – P. 259–267.
19. Sorption of Pb(II) from aqueous solutions by acid-modified clinoptilolite-rich tuffs with different Si/Al ratios / M. Abatal, A.V. Quiroz Córdova, M.T. Olgún, A.R. Vázquez-Olmos, J. Vargas, F. Anguebes-Franzeschi, G. Giacoman-Vallejos // Applied sciences. – 2019. – V. 9. – P. 2415–2432.
20. Manzoori J.L., Amjadi M., Abulhassan J. Ultra-trace determination of lead in water and food samples by using ionic liquid-based single drop microextraction-electrothermal atomic absorption spectrometry // Analytical chemistry. – 2009. – Acta 644. – P. 48–52.
21. Simultaneous pre-concentration procedure for the determination of cadmium and lead in drinking water employing sequential multi-element flame atomic absorption spectrometry / L.A. Portugal, H.S. Ferreira, W.N.L. Santos dos, S.L.C. Ferreira // Microchemical. – 2007. – J. 87. – P. 77–80.
22. Biasino J., Domínguez J.R., Alvarado J. Hydrogen peroxide in basic media for whole blood sample dissolution for determination of its lead content by electrothermal atomization atomic absorption spectrometry // Talanta. – 2007. – V. 73 (5). – P. 962–964.
23. Comparison between the calibration and the standard addition methods in determining dissolved lead in Borobudur's control tanks water by Flame Atomic Absorption Spectrophotometry (F-AAS) / I. Sulistyaningrum, M.P. Gitutami, R.B. Istiningrum, I.M. Siregar // Procedia Chemistry. – 2015. – V. 17. – P. 70–74.
24. Zhou Q., Zhao N., Xie G. Determination of lead in environmental waters with dispersive liquid–liquid microextraction prior to atomic fluorescence spectrometry // Journal of Hazardous Materials. – 2011. – V. 89 (1–2). – P. 48–53.
25. Automated dispersive liquid–liquid microextraction coupled to high performance liquid chromatography – cold vapour atomic fluorescence spectroscopy for the determination of mercury species in natural water samples / Yao-Min Liu, Feng-Ping Zhang, Bao-Yu Jiao, Jin-Yu Rao, Geng Leng // Journal of Chromatography A. – 2017. – V. 1493. – P. 1–9.
26. Radhakrishnan K., Panneerselvam P., Sivanesan S. Turn-on fluorescence sensor based detection of heavy metal ion using carbon dots graphitic-carbon nitride nanocomposite probe // Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 389. – 2019. – 112204 K.
27. Sequential determination of lead and cobalt in tap water and foods samples by fluorescence / M.C. Talio, M. Alesso, M. Acosta, M.G. Acosta, L.P. Fernández // Talanta. – 2014. – V. 127 – P. 244–249.
28. Tarighat M.A. Orthogonal projection approach and continuous wavelet transform-feed forward neural networks for simultaneous spectrophotometric determination of some heavy metals in diet samples // Food Chemistry. – 2016. – V. 192. – P. 548–556.
29. ГОСТ 20255.1-89. Иониты. Метод определения статической обменной ёмкости. – М.: Стандартинформ, 2002. – 5 с.
30. Rosenstein C., Hirsch S. Chemical analysis of plating solutions // Metal Finishing. – 2002. – V. 100. – P. 509–554.

Поступила 18.11.2020 г.

Информация об авторах

Камбарова Э.А., аспирант отделения химической инженерии, Таразский Государственный университет им. М.Х. Даулети.

Гавриленко М.А., доктор химических наук, профессор отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Бектенов Н.А., доктор химических наук, профессор Казахского национального педагогического университета имени Абая.

UDC 544.7

ZEOLITES MODIFIED WITH POLYETHYLENE POLYAMINE AND EPOXY RESIN TO EXTRACT LEAD IONS FROM WASTEWATER

Elmira A. Kambarova¹,
ilmira080884@mail.ru

Mikhail A. Gavrilenko²,
dce@mail.ru

Nesipkhan A. Bektenov³,
bekten_1954@mail.ru

¹ Taraz State University named after M.Kh. Duality,
60, Tole bi street, Taraz, 080000, Kazakhstan.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

³ Kazakh National Pedagogical University named after Abay,
13, Dostyk avenue, Almaty, 050000, Kazakhstan.

The relevance. Development of effective and inexpensive sorbents of a wide profile is an urgent problem. In this regard, it is necessary to use new modified ion exchangers applied for wastewater treatment and control over the content of various substances in the environment. In order to increase sorption characteristics, modification is performed. Modification of sorbents with improved sorption and kinetic characteristics has great prospects, such as highly permeable cross-linked polyelectrolytes with a high absorption rate of large ions, valuable physicochemical properties, cheap natural minerals modified with polyethylene polyamine and epoxy resins in order to produce reactive copolymers with epoxy groups, capable of participating in curing reactions in the presence of acid compounds and basics. The research is caused by the need for wastewater treatment of metallurgical enterprises from Pb²⁺ ions. Lead compounds are toxic substances that exhibit mutagenic, carcinogenic properties; in addition, Pb²⁺ ions embedded in biogenic forms have the property of locally accumulating in natural objects, thereby being a strong ecotoxicant.

The main aim of the research is to determine the sorption properties of natural zeolite and its modified form in relation to the Pb²⁺ ion and to optimize the sorption conditions.

Objects: Shanghai natural zeolite and its modified polyethylenepolyamine and epoxy resin form.

Methods: spectrophotometry.

Results. Sorbents modified with polyethylene polyamine and epoxy resin based on Shanghai natural zeolite have been obtained. The optimal conditions for the pH sorption of Pb²⁺ ions under static conditions were established. When a modified natural zeolite is used in the pH range of 7–9, lead ions are extracted by 90 % in comparison with the original zeolite. Modified natural zeolite can be used as a sorption material for industrial and waste water treatment.

Keywords:

Shanghai natural zeolite, sorption, Pb²⁺ cation, polyethylenepolyamine, epoxy resin.

REFERENCES

1. Tuzen M., Soylak M., Parlar K. Cadmium and lead contamination in tap water samples from Tokat, Turkey. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 2005, vol. 75(2), pp. 284–289.
2. Andrusishina I.N., Golub I.A., Maletskiy Z.V., Lubyanova I.P. Opaseni li svinets v vode? [Is lead in water dangerous?]. *Voda i vodoochistnye tekhnologii. Nauchno-tehnicheskie vesti*, 2016, no. 2, pp. 40–50.
3. GOST 24902-81. *Voda khozyaystvenno-pityevogo naznacheniya. Obshchie trebovaniya k polevym metodam analiza* [State Standard 24902-81. Drinking water. General requirements for field analysis methods]. Moscow, Standardinform Publ., 1999. 114 p.
4. WHO guidelines for drinking water quality. Vol. 2. 2nd ed. Geneva, World Health Organization, 1996. 973 p.
5. Liang P., Sang H. Determination of trace lead in biological and water samples with dispersive liquid–liquid microextraction preconcentration. *Anal. Biochem.*, 2008, vol. 380, pp. 21–25.
6. Zhurbanov K.A., Babusenko P.M., Timofeyeva V.F., Solokhina K.N. Issledovanie fazovogo i khimicheskogo sostava prirodnykh tseolitov i katalizatorov na ikh osnove [Study of the phase and chemical composition of natural zeolites and catalysts based on them]. *Izvestiya Natsionalnoy akademii nauk Respubliki Kazakhstan. Seriya khimii i tekhnologii*, 2000, no. 5, pp. 158–162.
7. Bektenov N.A., Tsoy I.G., Kambarova E.A., Ybyrayymzhanova L.K. Water purification from heavy metals with ionites. *The scientific heritage*, 2019, vol. 38, pp. 30–34.
8. Zaiku X., Qingling C., Chengfang Z. Influence of citric acid treatment on the surface acid properties of zeolite beta 111. *Physical Chemistry*, 2000, vol. 104, no. 13, pp. 2853–2859.
9. Zhurbanov K.A., Babusenko P.M., Timofeyeva V.F., Solokhina N.N. Sostav i termoustoychivost tseolitsoderzhashchego tufa Shankhanayskogo mestorozhdeniya [Composition and thermal stability of the zeolite-containing tuff of the Shankhanai deposit]. *Vestnik Kazakhskogo natsionalnogo universiteta imeni al-Farabi. Seriya khimiya*, 2004, no. 3, pp. 75–78.
10. Kurbangaliyeva G.V., Kudereyeva L.A., Konusbayev S.R. Vliyanie kislotnoy aktivatsii na fiziko-khimicheskie svoystva prirodnykh tseolitov [The effect of acid activation on the physicochemical properties of natural zeolites]. *Vestnik Kazakhskogo natsionalnogo universiteta imeni al-Farabi. Seriya khimiya*, 2004, vol. 34, pp. 52–56.
11. Yergozhin E.E., Akimbayeva A.M. *Organomineralnye sorbenty i polifunktionalnye sistemy na osnove prirodnogo alyumosilikatnogo i ugolno-mineralnogo syrya* [Organomineral sorbents and polyfunctional systems based on natural aluminosilicate and coal-mineral raw materials.]. Almaty, TOO «Print-S» Publ. House, 2007. 373 p.

12. Nan Jiang, Ran Shang, Heijman S.G.J., Luuk C. High-silica zeolites for adsorption of organic micro-pollutants in water treatment. *A review Water Research*, 2018, vol. 144, pp. 145–161.
13. Sulaiman K.O., Sajid M., Alhooshani K. Application of porous membrane bag enclosed alkaline treated Y-Zeolite for removal of heavy metal ions from water. *Microchemical Journal*, 2020, vol. 152, pp. 124–141.
14. Rassoulinejad-Mousavi S., Azamat J., Khataee A., Zhang Y. Molecular dynamics simulation of water purification using zeolite MFI nanosheets. *Separation and Purification Technology*, 2020, vol. 234, 116080.
15. Belova T.P. Adsorption of heavy metal ions (Cu^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} and Fe^{2+}) from aqueous solutions by natural zeolite. *Heliyon*, 2019, vol. 5, 02320.
16. Silva A.O.S., Souza M.J.B., Pedrosa A.M.G., Coriolano A.C.F., Araujo A.S. Development of HZSM-12 zeolite for catalytic degradation of high-density polyethylene. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2017, vol. 244, pp. 1–6.
17. Kassargy C., Awad S., Burnens G., Kahine K. Experimental study of catalytic pyrolysis of polyethylene and polypropylene over USY zeolite and separation to gasoline and diesel-like fuels. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2017, vol. 127, pp. 31–37.
18. Jambors Scandellai A.P., Zottesso J.P., Jegatheesan V., Cardozo-Filho L., Tavares C. Intensification of supercritical water oxidation (ScWO) process for landfill leachate treatment through ion exchange with zeolite. *Waste Management*, 2020, vol. 101, pp. 259–267.
19. Abatal M., Córdova Quiroz A.V., Olguín M.T., Vázquez-Olmos A.R., Vargas J., Anguebes-Franseschi F., Giacoman-Vallejos G. Sorption of Pb(II) from aqueous solutions by acid-modified clinoptilolite-rich tuffs with different Si/Al ratios. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, pp. 2415–2432.
20. Manzoori J.L., Amjadi M., Abulhassan J. Ultra-trace determination of lead in water and food samples by using ionic liquid-based single drop microextraction – electrothermal atomic absorption spectrometry. *Analytica Chimica*, 2009, Acta 644, pp. 48–52.
21. Portugal L.A., Ferreira H.S., Dos Santos W.N.L., Ferreira S.L.C. Simultaneous pre-concentration procedure for the determination of cadmium and lead in drinking water employing sequential multi-element flame atomic absorption spectrometry. *Microchem*, 2007, vol. 87, pp. 77–80.
22. Biasino J., Domínguez J.R., Alvarado J. Hydrogen peroxide in basic media for whole blood sample dissolution for determination of its lead content by electrothermal atomization atomic absorption spectrometry. *Talanta*, 2007, vol. 73 (5), pp. 962–964.
23. Sulistyaningrum I., Gitutami M.P., Istiningrum R.B., Siregar I.M. Comparison between the calibration and the standard addition methods in determining dissolved lead in Borobudur control tanks water by Flame Atomic Absorption Spectrophotometry (F-AAS). *Procedia Chemistry*, 2015, vol. 17, pp. 70–74.
24. Zhou Q., Zhao N., Xie G. Determination of lead in environmental waters with dispersive liquid–liquid microextraction prior to atomic fluorescence spectrometry. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, vol. 89 (1–2), pp. 48–53.
25. Yao-Min Liu, Feng-Ping Zhang, Bao-Yu Jiao, Jin-Yu Rao, GengLeng. Automated dispersive liquid-liquid microextraction coupled to high performance liquid chromatography – cold vapour atomic fluorescence spectroscopy for the determination of mercury species in natural water samples. *Journal of Chromatography A*, 2017, vol. 1493, pp. 1–9.
26. Radhakrishnan K., Panneerselvam P., Sivanesan S. Turn-on fluorescence sensor based detection of heavy metal ion using carbon dots graphitic-carbon nitride nanocomposite probe. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 389, 2019, 112204 K.
27. Talio M.C., Alesso M., Acosta M., Acosta M.G., Fernández L.P. Sequential determination of lead and cobalt in tap water and foods samples by fluorescence. *Talanta*, 2014, vol. 127, pp. 244–249.
28. Tarighat M. Orthogonal projection approach and continuous wavelet transform-feed forward neural networks for simultaneous spectrophotometric determination of some heavy metals in diet samples. *Food Chemistry*, 2016, vol. 192, pp. 548–556.
29. GOST 20255.1-89. *Ionity. Metod opredeleniy astaticheskoy obmennoy emkosti* [State Standard 20255.1-89. Ionites. Method for determining the static exchange capacity]. Moscow, Standartinform Publ., 2002. 5 p.
30. Rosenstein C., Hirsch S. Chemical analysis of plating solutions. *Metal Finishing*, 2002, vol. 100, pp. 509–554.

Received: 18 November 2020.

Information about the authors

Elmira A. Kambarova, doctoral student, Taraz State University named after M.Kh. Duality.

Mikhail A. Gavrilenko, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Nesipkhan A. Bektenov, Dr. Sc., professor, Kazakh National Pedagogical University named after Abay.

УДК 549.02:54.052:553.611.6

МОНТМОРИЛЛОНИТ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ КОМПОЗИТНЫЙ МИНЕРАЛ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ УДОБРЕНИЙ ПРОЛОГИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ

Рудмин Максим Андреевич¹,
rudminma@tpu.ru

Рева Игорь Витальевич¹,
igor_1993@mail.ru

Якич Тамара Юрьевна¹,
cherkasovatu@tpu.ru

Соктоев Булат Ринчинович¹,
bulatsoktoev@tpu.ru

Буяков Алекс Сергеевич^{1,2},
alesbuyakov@gmail.com

Табакаев Роман Борисович¹,
TabakaevRB@tpu.ru

Ибраева Канипа¹,
kti1@tpu.ru

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

² Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4.

Актуальность исследования. Решение экологических проблем в аграрном секторе возможно за счёт использования новых удобрений пролонгированного и контролируемого действия. В данной статье приводятся варианты использования монтмориллонита в качестве составного компонента современных азотных удобрений с контролируемыми свойствами и результаты изучения минеральных трансформаций в процессе механохимической активации при различных параметрах.

Основная цель работы заключалась в оценке механизмов активации монтмориллонита как ингибитора азотсодержащих композитных продуктов для создания удобрений пролонгированного действия.

Методы: механохимическая активация в планетарной и кольцевой мельницах, рентгенодифракционный анализ, сканирующая электронная микроскопия, инфракрасная спектроскопия, дифференциальный термический анализ.

Выходы. Доля интеркалированной мочевины в монтмориллоните (для смесей M1N1) изменяется в пределах 22,3...23,2 % при активации в планетарной мельнице в течении 3, 8 или 11 минут. Максимальная степень интеркаляции 23,2 % была достигнута при активации в течении 3 минут. После 11-минутной операции около 40...50 % агрегированных глинистых частиц покрываются внешней оболочкой избыточной мочевины толщиной до 2,5 мкм. Доля интеркалированной мочевины в монтмориллоните изменяется с 23,2 до 21,6 % по мере увеличения времени активации с 30 до 120 минут в кольцевой мельнице. По мере увеличения времени активации образуются микрокристаллы мочевины на поверхности минеральных частиц. Минеральные продукты, полученные методом активации в планетарной или кольцевой мельницах, могут использоваться как удобрения пролонгированного действия с несколькими полезными функциями. Композиты, синтезированные при 11-минутной или 120-минутной работе планетарной или кольцевой мельниц, соответственно, характеризуются двумя типами азота. Изначально удобрения будут высвобождать нутриенты с высокой скоростью из внешней пленки, состоящей из мочевины, после чего будет расходоваться обменный азот из межслоевого пространства монтмориллонита, тем самым обеспечивая пролонгированное питание растений.

Ключевые слова:

Монтмориллонит, глинистые минералы, минеральные удобрения, механохимическая активация, азотные удобрения.

Введение

Благодаря повышению уровня использования удобрений и пестицидов, а также развитию новых культур и технологий за последние 50 лет объемы мирового сельскохозяйственного производства увеличились более чем в два раза [1]. Глобальное применение азотных удобрений выросло с 32 млн т в 1970 г. до примерно 111,6 млн т в 2016 г. (данные International Fertilizer Association (IFA) на ноябрь 2016 г.), и ожидается, что к 2050 г. оно составит около 130...150 млн т в год [2]. Внесение различных форм азота с уменьшением эффективности его усвоения способствует загрязнению окружающей среды, что отражается в ухудшении качества воды, эвтрофикации прибрежных морских экосистем, развитии фотохимического смога и повышении концентрации закиси азота в атмосфере как парникового газа [3, 4]. Китайское агрономическое хозяйство как потребитель около 30 % азотных удоб-

рений от их общемировой доли одно из первых испытало экологический урон от бесконтрольного использования удобрений [5–9], что следует учитывать всем странам, с развивающимся сельскохозяйственным сектором и главным образом России.

Традиционные удобрения (например, мочевина) имеют низкую термостойкость, высокую растворимость и малый молекулярный вес. При внесении в почву нутриенты таких удобрений имеют тенденцию мигрировать в воздух и воду в результате улетучивания, стока и выщелачивания. N₂O, образующийся в процессе нитрификации–денитрификации, является важным парниковым газом, и его влияние на потепление климата в 298 раз выше, чем у CO₂. Кроме того, N₂O способен нанести ущерб озоновому слою. В системах сельскохозяйственного культивирования постоянное увеличение количества применяемых химических удобрений приводит к тому, что выбросы N₂O

и CO₂ становятся крупнейшими источниками парниковых газов [9, 10]. Чрезмерное внесение традиционных азотных удобрений приводит к низкому коэффициенту их использования (на уровне 30...40 % [9]), что не только приводит к завышенному использованию экономических ресурсов и увеличивает производственные затраты, но также снижает качество воздуха, почвы и воды [11].

Ключевая проблема низкого показателя эффективности связана с дисбалансом между питательными веществами, высвобождаемыми из традиционных удобрений, и поглощением этих нутриентов корнями растений, что приводит к потере и выбросу химических веществ (в том числе N₂O). Решение этой проблемы возможно за счёт использования комплексных удобрений «нового поколения», к которым относятся удобрения пролонгированного и контролируемого действия, так называемые «slow-release fertilizers – SRF» или «controlled-release fertilizers – CRF», соответственно [1, 2, 9, 12–20]. Основная функция удобрений «адресного» действия заключается в постепенной отдаче нутриентов растениям с необходимой скоростью для уменьшения избытка этих компонентов в почвах [21–23]. Создание таких удобрений основано на подборе веществ выполняющих роль «контейнера» и «заполнителя», и механизмов их синтеза/активирования.

Сегодня в качестве основных составных компонентов таких удобрений изучаются полимеры [16, 24, 25], композиты из синтетических и природных веществ [26–29] и глинистые минералы (филосиликаты): монтмориллонит [30–33], а также каолинит [34–36], пылагорскит [23, 28], хризотил [17], глауконит [37, 38]. При этом глинистые минералы имеют отдельный практический интерес, поскольку являются более дешевым материалом относительно синтетических продуктов.

В настоящей работе приводится исследование механизмов активации ценных свойств монтмориллонита для создания удобрений пролонгированного действия. Цель исследования – оценка перспектив монтмориллонита как ингибитора азотных соединений при двух вариантах механохимической активации из сухих смесей на основе анализа последующих минеральных трансформаций. В качестве объекта выбран монтмориллонит как глинистый минерал, имеющий широкое распространение в пределах осадочных месторождений сибирских регионов, что позволяет рассматривать его как экономически доступное сырье для местного использования.

1. Материал и методика исследования

Для проведения механохимических испытаний использовались образцы монтмориллонитовой глины из славгородской свиты Бакчарского месторождения железа (Томская область). Глинистые породы славгородской свиты залегают как промежуточные слои между горизонтами железной руды в пределах месторождения на глубинах 205...240 м [39]. При будущей открытой эксплуатации месторождения эти толщи будут вскрытыми породами и будут складироваться в горных отвалах. При этом вышележащие осадочные породы также представляют перспективы для использования в сель-

ском хозяйстве [40–43]. Содержание монтмориллонита (или монтмориллонит-бейделлита с формулой Na_{0,03}Ca_{0,08}(Al_{1,45}Mg_{0,26}Fe_{0,09})_{1,8}Si_{3,78}Al_{0,22}O₁₀(OH)₂nH₂O) в исследуемой пробе составляло 89,5 %.

Минералогические и структурные характеристики глинистого минерала определялись с использованием рентгенодифракционного анализа (РДА). Морфология глинистых частиц и характеристика их микроструктуры были изучены при помощи сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Структурные особенности оценивались с использованием дифференциального термического анализа (ДТА) и ИК-спектрометрии (ИК).

Рентгенодифракционный анализ (РДА) производился на рентгеновском дифрактометре Bruker D2 Phaser с CuK излучением. Истерты до размера менее 10 мкм препараты сканировались в интервале углов 20° 3...70° с шагом 0,02°, скоростью сканирования 2 с/точка, при параметрах измерения 40 кВ и 40 мА. СЭМ проводилась с использованием микроскопа TESCAN VEGA 3 SBU, оснащенного приставкой для рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа (ЭДС) OXFORD X-Max 50 с Si/Li кристаллическим детектором. Ускоряющее напряжение для СЭМ съемки и анализа было 20 кВ с интенсивностью тока зонда в пределах 4...12,2 нА. Термогравиметрический (ТГА) и дифференциальный термический (ДТА) анализы проводились с помощью термоанализатора STA 449 F5 Jupiter для модельного расчёта доли интеркалированного азота и изучения термической деструкции минерала. Анализ выполнялся при следующих параметрах: интервал температур 25...1000 °C, скорость нагрева 10 К/мин. Количество интеркалированной мочевины в монтмориллоните рассчитывалось как потеря массы в диапазоне 300 (290)...580 °C. ИК-спектроскопия выполнялась с помощью ИК-Фурье спектрометра Shimadzu IR Prestige-21 в режиме поглощения, интервале частот 400...4000 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹.

Опыты по механохимической активации смесей на основе монтмориллонита и мочевины в соотношении (минерал-мочевина) 1:1 (или 50:50 %) выполнялись двумя способами в планетарной или кольцевой мельницах. В итоге последующие опыты проводились по следующей схеме. Изначально были подготовлены сухие смеси из монтмориллонита и мочевины в соотношении 1:1 (10 г монтмориллонита (монтмориллонитового концентрата) и 10 г мочевины). В итоге шесть смесей на основе монтмориллонита были активированы в различных вариантах времени (три для каждого способа) в двух мельницах. В результате два варианта активации было изучено. Один из них выполнялся в кольцевой мельнице (ROCKLABS Standard Ring Mill) с частотой вращения 700 об/мин и массовым соотношением порошков и мелюющих тел 1:5. Три смеси монтмориллонита и мочевины (каждая весом 20 г), полученные после 30, 60 или 120 минут активации в кольцевой мельнице, обозначались как M1N1-rm30, M1N1-rm60, M1N1-rm120, соответственно. Активация тех же исходных смесей проводилась отдельно в планетарной мельнице в течении 3, 8 или 11 минут операционной

работы с получением композитов M1N1-pm3, M1N1-pm8, M1N1-pm11, соответственно. Активацию порошковых смесей проводили в планетарной мельнице АГО-2 с частотой вращения 1820 об/мин и соотношением порошков к мелющим телам 1:5.

2. Результаты

Минералогическая и морфологическая характеристика композитов на основе монтмориллонита и мочевины

По данным РДА (рис. 1) монтмориллонит (монтмориллонит-бейделлит) в активированных композитах (M1N1) показывает характерные дифракционные отражения при 16,9–17,4; 4,5; 4,3 и 3,4 Å. Мочевина – при 4,7; 4,0; 3,6; 3,1; 2,8; 2,5; 2,4; 2,2; 1,8 и 1,7 Å. Интенсивность отражения при 4,0 Å связана с абсорбированной мочевиной и изменяется с увеличением времени активации. Первый базальный рефлекс сдвигается с 16,9 до 17,4 Å при увеличении времени активации с 30 до 120 мин в кольцевой мельнице (рис. 1). Аналогичный сдвиг наблюдается с 17,0 до 17,3 Å по мере увеличения времени работы планетарной мельницы с 3 до 11 мин.

По данным СЭМ для композитов характерно изменение морфоструктуры при разной продолжительности работы мельниц (рис. 2). Композит S1N1-pm11 характеризуется сплошным покрытием из мочевины, фор-

мирующим «микрокапсулы» по активированным микрочешуйкам монтмориллонита. На СЭМ-снимках монтмориллонит представлен чешуйчатыми ультрамикроагрегатами, в то время как мочевина – микрокристаллитами или тонкой пленкой. Пленка мочевины в композите S1N1-pm3 имеет неправильные и «кровавые» очертания с неровной поверхностью (рис. 2, а). Толщина пленки изменяется от 50 до 200 нм. Композит S1N1-pm8 имеет тонкое покрытие толщиной 400...800 нм из мочевины на поверхности частиц монтмориллонита (рис. 2, б). Покрытие того же состава в композите S1N1-pm11 утолщается до 1...2,5 мкм и становится сплошным. Композит S1N1-pm11 состоит из сферических микроагрегатов размером от 1 до 10 мкм с прослойками монтмориллонита с абсорбированным азотом в «ядерной» части и внешним азотным покрытием (рис. 2, в). Такие формы условно обозначаются как микрокапсулы с двумя формами азота: (1) интеркалированным в монтмориллонит и (2) адсорбированным на поверхности активированных глинистых ультрамикроагрегатов. Доля адсорбированной мочевины во всех композитах, синтезированных в планетарной мельнице, составляет 7...11 вес. % по данным ЭДС анализа поверхности частиц.

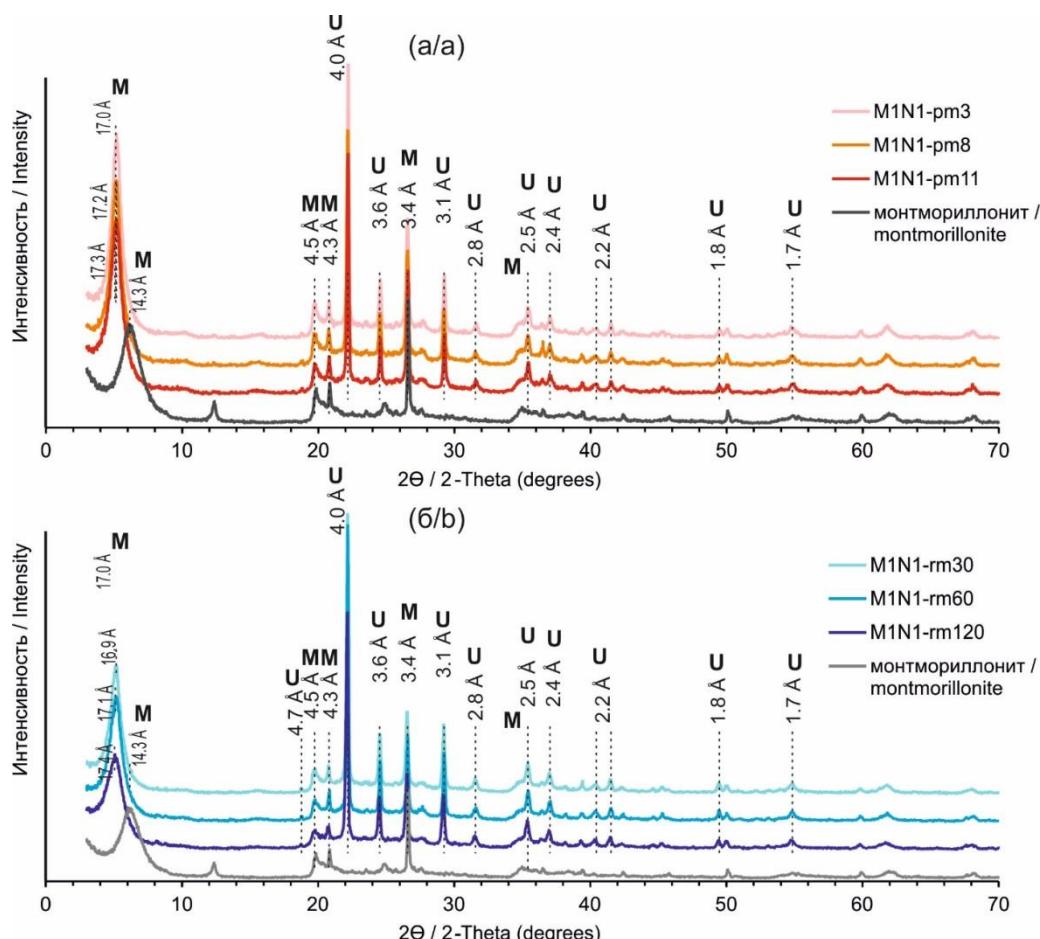


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы композитов на основе смесей монтмориллонита (M) и мочевины (U) с соотношением 1:1, приготовленных в планетарной (а) или кольцевой (б) мельницах при разном времени активации

Fig. 1. XRD patterns of composites based on montmorillonite (M) and urea (U) mixtures in ratio 1:1 prepared using planetary (a) or ring (b) mills for different grinding times

Монтмориллонит имеет чешуйчатую структуру в композите S1N1-rm30, а мочевина образует локальные пленки на активированном минерале (рис. 2, *г*). В композите S1N1-rm60 (рис. 2, *д*) монтмориллонит имеет пластинчатый вид. Микрокристаллиты мочевины образуют прерывистые скопления (локальные пленки) на некоторых микроагрегатах (рис. 2, *г*). В композите S1N1-rm120 (рис. 2, *е*) монтмориллонит и мочевина показывают максимальное внедрение микрокристаллитов. В композите S1N1-rm120 образуются микроагрегаты с минералом и асборбированным азотом в «ядре» и внешним прерывистым покрытием из микрокристаллитов мочевины (карбамида).

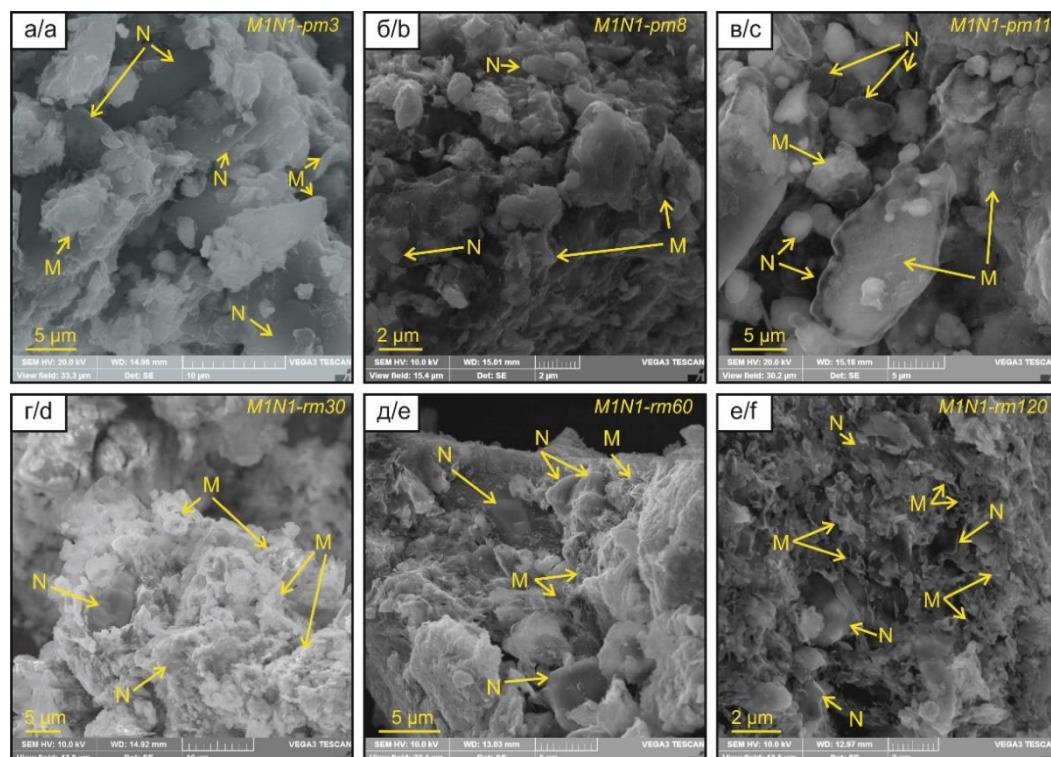


Рис. 2. Репрезентативные СЭМ-изображения композитов, приготовленных путем активации монтмориллонит (M) и мочевины (N) в соотношении 1:1 в планетарной (*а*–*г*) и кольцевой (*д*–*е*) мельницах

Fig. 2. Representative SEM images of composites prepared by activation of montmorillonite (M) and urea (N) in planetary (*a*–*c*) and ring (*d*–*f*) mills

Структурная характеристика композитов на основе монтмориллонита и мочевины

Композиты M1N1-pm3/8/11 и S1N1-rm30/60/120 демонстрируют пики ИК-поглощения NH₂ и CO при 720 и 790 cm⁻¹, соответственно (рис. 3). Композиты M1N1-pm3/8 и M1N1-rm30/60/120 показывают колебания растяжения Si-O при 1050 cm⁻¹, что отражает структуру монтмориллонита. Пик NH₂ при 1155 cm⁻¹ наиболее интенсивен для композитов M1N1-pm11 и M1N1-rm120. Асимметричные деформации CN при 1463 cm⁻¹ характерны для всех композитов, синтезированных из смесей монтмориллонита и карбамида в планетарной или кольцевой мельницах. Те же композиты показывают пик NH₂ при 1595...1608 cm⁻¹ и пик NH при 1681...1708 cm⁻¹. Эти два пика имеют слабые флюктуации и смещаются в направлении повышен-

Пленка мочевины постепенно утолщается с увеличением продолжительности работы мельниц при каждом способе получения композитов. Однако равномерное покрытие (микрокапсула) из мочевины образуется в единственном опыте 11-минутной активации в планетарной мельнице. При этом синтезе в планетарной мельнице внешнее азотное покрытие более выдержанное, имеет повышенную толщину (до 2,5 мкм) и капсулирует (покрывает) около 40...50 % минеральных частиц композита. Однако даже при 120-минутной активации в кольцевой мельнице это покрытие имеет «крываный» (прерывистый) характер, меньшую толщину (не более 500 нм) относительно S1N1pm8/11 и развивается по 20...30 % минеральных частиц композита.

структурных частот для M1N1-pm3/8 за счет интеркаляции азота. Пик NH₂ смещается от 3468 cm⁻¹ (M1N1-pm3) до 3500 cm⁻¹ (M1N1-pm8). Пик NH смещается в сторону меньших частот от 3344 до 3329 cm⁻¹ для M1N1-pm11. Все композиты на основе монтмориллонита показывают пик 3620 cm⁻¹, который связан с колебаниями Al-OH-Al минерала (рис. 3).

Термогравиметрические (ТГ) кривые активированных композитов отражают пять этапов потери веса (рис. 4): 0...135 °C, 135...240 °C, 240...365 °C, 365...580 °C, 580...1000 °C. Композиты показывают потерю массы на 0,7...1,2 и 24,9...25,8 % в диапазонах 20...135 °C и 135...240 °C, соответственно (рис. 4). Это относится к удалению свободной воды и разложению адсорбированной (неинтеркалированной) мочевины [18, 44]. Третий этап потери массы

240...365 °C характеризует удаление абсорбированной и интеркалированной мочевины [45, 46] из композитов M1N1. В этом случае абсорбированная мочевина удаляется на 3,5...5,2 % на субэтапе от 240 до 290...300 °C, интеркалированный азот – 13,3...18,6 % на субэтапе 300...365 °C. Четвертый этап потери веса в интервале температур 365...580 °C относится к вы свобождению инкапсулированной мочевины [8] и характеризуется значениями 10,1...11,6 и 8,1...9,9 % для композитов M1N1-pm и M1N1-rm, соответственно. В результате доля интеркалированной мочевины составляет 22,3...23,2 % для M1N1-pm (рис. 4, a) и

21,6...23,2 % для M1N1-rm (рис. 4, б). Пятая стадия потери массы в интервале температур 580...1000 °C относится к дегидроксилации монтмориллонита [47], что характерно на 2,1...2,7 и 0,7...1,3 % для композитов, синтезированных в планетарной или кольцевой мельницах, соответственно. Конечный остаток вещества после 540...620 °C (45,8...47,6 %) соответствует исходному пропорциональному содержанию минералов (около 50 %). Максимальная интеркаляция мочевины в монтмориллонит происходила при времени активации 3 и 60 мин для планетарной и кольцевой мельниц, соответственно.

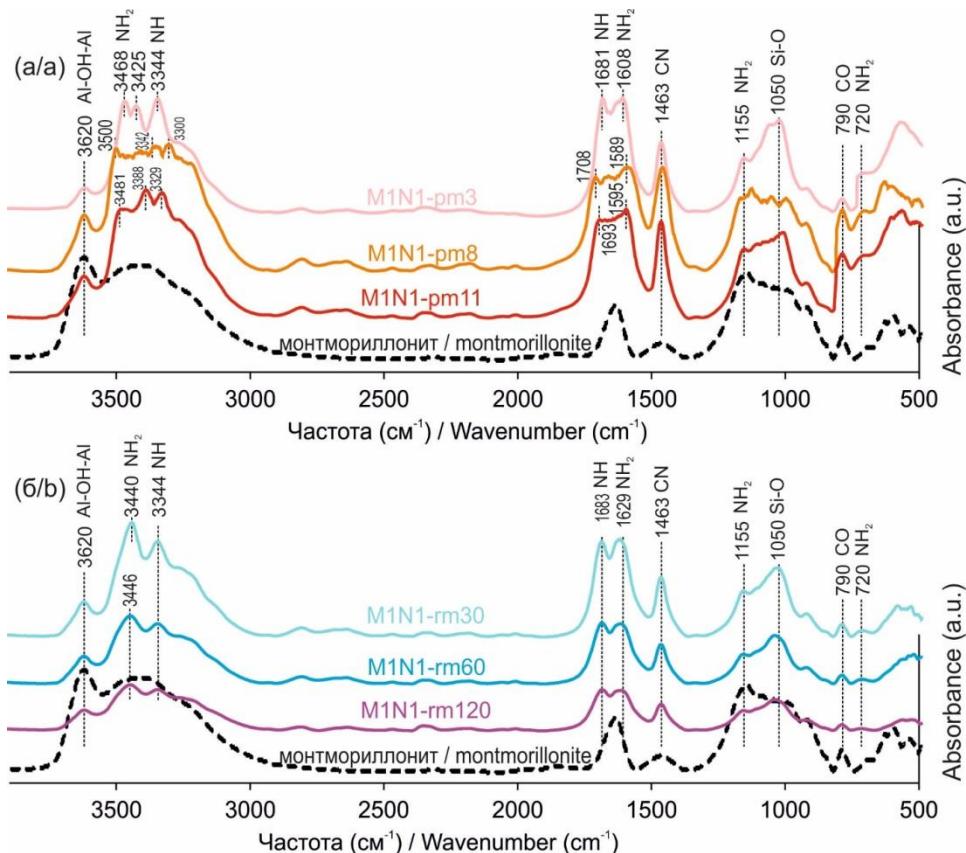


Рис. 3. ИК-Фурье спектры композитов монтмориллонит-мочевина (M1N1) с интерпретацией, синтезированных в планетарной (а) и кольцевой мельницах (б)

Fig. 3. FTIR spectra of montmorillonite-urea composite with interpretation prepared in (a) planetary and (b) ring mills

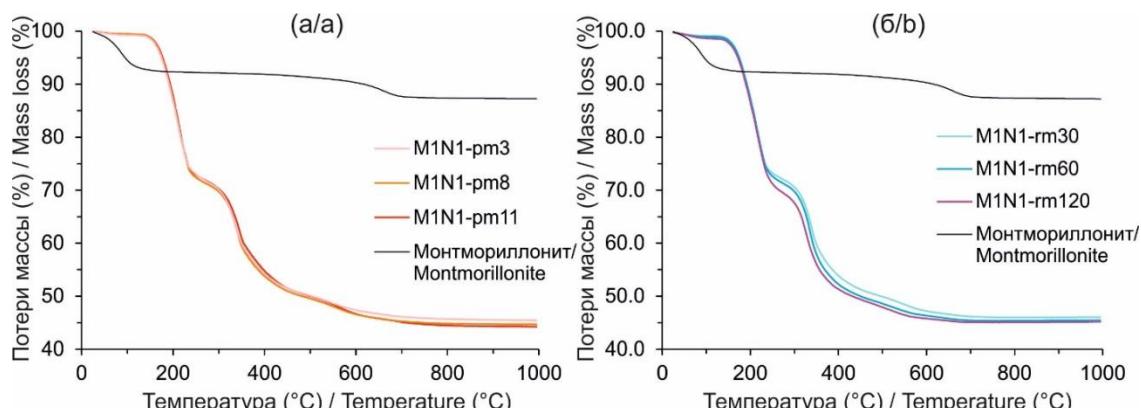


Рис. 4. ТГ-кривые композитов на основе монтмориллонита и мочевины, приготовленные при планетарном (а) и кольцевом (б) измельчении с различным операционным временем

Fig. 4. TG patterns of montmorillonite-urea mixtures prepared in (a) planetary and (b) ring milling at different times

3. Обсуждение результатов

Степень внедрения мочевины в монтмориллонит в смесях с изначальным соотношением 50:50 изменяется в зависимости от активации в планетарной или кольцевой мельницах. Относительно ранних авторских опытов с синтезом композитов на основе смесей смектит-мочевина в соотношении 40:60 [37], описанная выше активация отличается меньшим временем работы планетарной мельницы, составом и изначальной долей минерала.

По мере увеличения времени активации в планетарной или кольцевой мельницах уменьшается интенсивность базального отражения на порошковых рентгеновских дифрактограммах при 4.0 \AA (рис. 1), за счёт незначительного уменьшения содержания адсорбированной мочевины. Сдвиг базального отражения (001) к меньшим углам (более высокие межплоскостные величины) в полученных композитах указывает на интеркаляцию мочевины в межслоевое пространство монтмориллонитовых пакетов с первых этапов активации. Первичный сдвиг базального отражения (001) указывает на присутствие воды и замещение сольватируемых катионов мочевиной в межслоевой структуре минерала. Отсутствие значительной потери веса на термогравиметрических кривых при диапазоне температур, характеризующих удаление сольватирующей воды из монтмориллонита, подтверждает эту интерпретацию. Отличительной чертой полученных результатов от результатов, полученных в предыдущих работах [37, 38] является полифункциональность синтезированных композитов из смесей при соотношении мочевины и монтмориллонита 1:1 за счет образования из избыточной мочевины отдельных покрытий на интеркалированной части глинистого минерала.

Интенсивность пика ИК-поглощения NH_2 при 1155 cm^{-1} увеличивается по мере повышения времени активации, что связано с адсорбированным азотом на хлопьях (ультрамикроагрегаты) монтмориллонита (рис. 2). Растворение NH_2 на уровне $3468\ldots3500 \text{ cm}^{-1}$ становится менее частым по мере увеличения времени синтеза в планетарной или кольцевой мельницах, что свидетельствует о более высокой степени «связывания» молекул азота. Незначительные сдвиги пиков NH_2 и NH с увеличением времени работы планетарной мельницы соответствуют постепенному инкапсулированию в межслоевое пространство монтмориллонита.

В этом исследовании авторы были сфокусированы на разработке современных удобрений с «адресным» высвобождением нутриентов (CRF или SRF) с помощью оптимальных в экономическом отношении механохимических методов, таких как активация в планетарной или кольцевой мельницах. Первоначальный эксперимент по активации проводился со смесью глауконита и мочевины в соотношении 3:1 [38]. В этой работе использовался монтмориллонит как экономически доступный минерал в качестве ингибитора, отличительные соотношение глинистого минерала и мочевины и время активации. С одной стороны, при-

готовление композитов в кольцевой мельнице является наиболее дешевым методом, с другой – синтез в планетарной мельнице проводится на порядок быстрее и, следовательно, может существенно компенсировать трудозатраты в случае промышленной разработки.

До 23,2 % азота интеркалируются в межслоевое пространство монтмориллонита. Около 20 % азота адсорбируется на поверхности минеральных частиц, и около 5 % абсорбируется в микропоровое пространство глинистых ультрамикроагрегатов. Минерологические, морфологические и структурные характеристики композитов позволяют заключить, что высвобождение азота из синтезированных удобрений будет происходить с разной скоростью. На начальной стадии после внесения удобрений будет расходоваться внешняя азотная микропленка или микропокрытие, после чего питательным веществом будет выступать интеркалированная и абсорбированная часть нутриента (N). Проведенные исследования показывают, что композиты, полученные путем механической активации смеси мочевины и монтмориллонита, подходят для испытаний в качестве экологически безопасных, многофункциональных и комплексных минеральных удобрений пролонгированного действия (SRF).

В итоге механохимическая активация смесей монтмориллонит-мочевина в соотношении 1:1 позволила выявить систематическое изменение внутренней структуры минералов, интеркаляцию азота с начала активации, формирование азотного покрытия по мере увеличения времени работы мельниц. Приготовленный композит при 11-минутном синтезе в планетарной мельнице (M1N1-pm11) представляют собой глинистый минерал с интеркалированным азотом в ядре и внешней микрокапсулой из азотной оболочки. Внешняя азотная оболочка лучше формируется по мере увеличения времени активации в планетарной мельнице относительно кольцевой. Активированные композиты обладают потенциалом для их использования как SRF с несколькими полезными функциями. Особенно это относится к композитам M1N1-pm11 и M1N1-rm120. Эти композиты с двумя типами азота изначально будут высвобождать питательные вещества с высокой скоростью за счёт внешней азотистой пленки. А впоследствии отдавать питательные вещества из интеркалированной структуры с пролонгированной или контролируемой скоростью.

Выходы

Основные выводы активации порошковых смесей на основе монтмориллонита и мочевины в соотношении 1:1 по различным операционным вариантам заключаются в следующем.

Доля интеркалированной мочевины в монтмориллоните (для смесей M1N1) незначительно изменяется в пределах 22,3…23,2 % при активации в планетарной мельнице в течении 3, 8 или 11 минут. Максимальная степень интеркаляции 23,2 % была достигнута при активации в течении 3 минут. Однако, после 11-минутной операции около 40…50 % агрегирован-

ных частиц покрываются внешней оболочкой избыточной мочевины толщиной до 2,5 мкм.

Доля интеркалированной мочевины в монтмориллоните незначительно изменяется с 23,2 до 21,6 % по мере увеличения времени активации с 30 до 120 минут в кольцевой мельнице. Доля адсорбированного азота на поверхности минеральных частиц составляет около 20 %, доля абсорбированного азота в микропоровое пространство – около 5 %. По мере увеличения времени активации образуются микрокристаллиты мочевины на поверхности минеральных частиц.

Минеральные продукты, полученные методом активации в планетарной или кольцевой мельницах, об-

ладают потенциалом для их использования как удобрений пролонгированного действия (SRF) с несколькими полезными функциями. Композиты, синтезированные при 11-минутной или 120-минутной работе планетарной или кольцевой мельниц, соответственно, характеризуются двумя типами азота. Изначально удобрения будут высвобождать питательные вещества с высокой скоростью за счёт внешней пленки или покрытия из мочевины, после чего – питательные вещества из интеркалированной структуры с пролонгированным действием.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-213.2020.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Tilman D., Cassman K.G., Matson P.A., Naylor R., Polasky S. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 2002, vol. 418 (6898), pp. 671–677.
2. Matson P.A., Parton W.J., Power A.G., Swift M.J. Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science*, 1997, vol. 277 (5325), pp. 504–509.
3. Vitousek P.M., Naylor R., Crews T., David M.B., Drinkwater L.E., Holland E., Johnes P.J., Katzenberger J., Martinelli L.A., Matson P.A. Nutrient imbalances in agricultural development. *Science*, 2009, vol. 324 (5934), pp. 1519–1520.
4. Pereira E.I., da Cruz C.C.T., Solomon A., Le A., Cavigelli M.A., Ribeiro C. Novel slow-release nanocomposite nitrogen fertilizers: the impact of polymers on nanocomposite properties and function. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, vol. 54 (14), pp. 3717–3725.
5. Ju X.-T., Xing G.-X., Chen X.-P., Zhang S.-L., Zhang L.-J., Liu X.-J., Cui Z.-L., Yin B., Christie P., Zhu Z.-L. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, vol. 106 (9), pp. 3041–3046.
6. Zhang Z.S., Chen J., Liu T.Q., Cao C.G., Li C.F. Effects of nitrogen fertilizer sources and tillage practices on greenhouse gas emissions in paddy fields of central China. *Atmospheric Environment*, 2016, vol. 144, pp. 274–281.
7. Akiyama H., Yan X., Yagi K. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis. *Global Change Biology*, 2010, vol. 16 (6), pp. 1837–1846.
8. Pereira E.I., Nogueira A.R., Cruz C.C.T., Guimarães G.G.F., Foschini M.M., Bernardi A.C.C., Ribeiro C. Controlled urea release employing nanocomposites increases the efficiency of nitrogen use by forage. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, vol. 5 (11), pp. 9993–10001.
9. Xiao Y., Peng F., Zhang Y., Wang J., Zhuge Y., Zhang S., Gao H. Effect of bag-controlled release fertilizer on nitrogen loss, greenhouse gas emissions, and nitrogen applied amount in peach production. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 234, pp. 258–274.
10. IPCC. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2014. 1454 p.
11. Goulding K., Jarvis S., Whitmore A. Optimizing nutrient management for farm systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, vol. 363 (1491), pp. 667–680.
12. Al-Rawajfeh A.E., AlShamaileh E.M., Albaihat M.R. Clean and efficient synthesis using mechanochemistry: Preparation of kaolinite–KH₂PO₄ and kaolinite–(NH₄)₂HPO₄ complexes as slow released fertilizer. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2019, vol. 73, pp. 336–343.
13. Hermida L., Agustian J. Slow release urea fertilizer synthesized through recrystallization of urea incorporating natural bentonite using various binders. *Environmental Technology & Innovation*, 2019, vol. 13, pp. 113–121.
14. Chen L., Chen X.L., Zhou C.H., Yang H.M., Ji S.F., Tong D.S., Zhong Z.K., Yu W.H., Chu M.Q. Environmental-friendly montmorillonite-biochar composites: Facile production and tunable adsorption-release of ammonium and phosphate. *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 156, pp. 648–659.
15. Sha Z., Lv T., Staal M., Ma X., Wen Z., Li Q., Pasda G., Misselbrook T., Liu X. Effect of combining urea fertilizer with P and K fertilizers on the efficacy of urease inhibitors under different storage conditions. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, vol. 20 (4), pp. 2130–2140.
16. Boyandin A.N., Kazantseva E.A., Varygina D.E., Volova T.G. Constructing slow-release formulations of ammonium nitrate fertilizer based on degradable poly(3-hydroxybutyrate). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, vol. 65 (32), pp. 6745–6752.
17. Borges R., Baika L.M., Grassi M.T., Wypych F. Mechanochemical conversion of chrysotile/K₂HPO₄ mixtures into potential sustainable and environmentally friendly slow-release fertilizers. *Journal of Environmental Management*, 2018, vol. 206, pp. 962–970.
18. Chi Y., Zhang G., Xiang Y., Cai D., Wu Z. Fabrication of reusable temperature-controlled-released fertilizer using a palygorskite-based magnetic nanocomposite. *Applied Clay Science*, 2018, vol. 161, pp. 194–202.
19. Trenkel M.E. *Controlled-Release and Stabilized Fertilizers in Agriculture*. Paris, France, International Fertilizer Industry Association, 1997. 151 p.
20. Golbashy M., Sabahi H., Allahdadi I., Nazokdast H., Hosseini M. Synthesis of highly intercalated urea-clay nanocomposite via domestic montmorillonite as eco-friendly slow-release fertilizer. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2017, vol. 63 (1), pp. 84–95.
21. Teodorescu M., Lungu A., Stanescu P.O., Neamtu C. Preparation and properties of novel slow-release npk agrochemical formulations based on poly(acrylic acid) hydrogels and liquid fertilizers. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, vol. 48 (14), pp. 6527–6534.
22. Liang R., Liu M., Wu L. Controlled release NPK compound fertilizer with the function of water retention. *Reactive and Functional Polymers*, 2007, vol. 67 (9), pp. 769–779.
23. Liang R., Liu M. Preparation and properties of coated nitrogen fertilizer with slow release and water retention. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2006, vol. 45 (25), pp. 8610–8616.
24. Liu J., Yang Y., Gao B., Li Y.C., Xie J. Bio-based elastic polyurethane for controlled-release urea fertilizer: Fabrication, properties, swelling and nitrogen release characteristics. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 209, pp. 528–537.
25. Weian Z., Wei L., Yue'e F. Synthesis and properties of a novel hydrogel nanocomposites. *Materials Letters*, 2005, vol. 59 (23), pp. 2876–2880.
26. Sharma G.C. Controlled-release fertilizers and horticultural applications. *Scientia Horticulturae*, 1979, vol. 11 (2), pp. 107–129.
27. Wu J., Wei Y., Lin J., Lin S. Study on starch-graft-acrylamide/mineral powder superabsorbent composite. *Polymer*, 2003, vol. 44 (21), pp. 6513–6520.
28. Ni B., Liu M., Lü S., Xie L., Wang Y. Environmentally friendly slow-release nitrogen fertilizer. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, vol. 59 (18), pp. 10169–10175.

29. Cui Y., Xiang Y., Xu Y., Wei J., Zhang Z., Li L., Li J. Poly-acrylic acid grafted natural rubber for multi-coated slow release compound fertilizer: Preparation, properties and slow-release characteristics. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, vol. 146, pp. 540–548.
30. Borges R., Prevot V., Forano C., Wypych F. Design and kinetic study of sustainable potential slow-release fertilizer obtained by mechanochemical activation of clay minerals and potassium monohydrogen phosphate. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, vol. 56 (3), pp. 708–716.
31. Rashidzadeh A., Olad A. Slow-released NPK fertilizer encapsulated by NaAlg-g-poly(AA-co-AAm)/MMT superabsorbent nanocomposite. *Carbohydrate Polymers*, 2014, vol. 114, pp. 269–278.
32. Fatimah I., Yudha S.P., Rubiyanto D., Widodo I.D. Methenamine-smectite clay as slow release fertiliser: Physicochemical and kinetics study. *Chemical Engineering Transactions*, 2017, vol. 56 (2016), pp. 1639–1644.
33. Wang Z., Chen J., Mao S., Han Y., Chen F., Zhang L., Li Y., Li C. Comparison of greenhouse gas emissions of chemical fertilizer types in China's crop production. *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 141, pp. 1267–1274.
34. Borges R., Brunatto S.F., Leitão A.A., De Carvalho G.S.G., Wypych F. Solid-state mechanochemical activation of clay minerals and soluble phosphate mixtures to obtain slow-release fertilizers. *Clay Minerals*, 2015, vol. 50 (02), pp. 153–162.
35. Lei Z., Cagnetta G., Li X., Qu J., Li Z., Zhang Q., Huang J. Enhanced adsorption of potassium nitrate with potassium cation on H_3PO_4 modified kaolinite and nitrate anion into Mg-Al layered double hydroxide. *Applied Clay Science*, 2018, vol. 154, pp. 10–16.
36. Hussien R.A., Donia A.M., Atia A.A., El-Sedfy O.F., El-Hamid A.R.A., Rashad R.T. Studying some hydro-physical properties of two soils amended with kaolinite-modified cross-linked poly-acrylamides. *CATENA*, 2012, vol. 92, pp. 172–178.
37. Rudmin M., Banerjee S., Yakich T., Tabakaev R., Ibraeva K., Buyakov A., Soktoev B., Ruban A. Formulation of a slow-release fertilizer by mechanical activation of smectite/glaucite and urea mixtures. *Applied Clay Science*, 2020, vol. 196, pp. 105775.
38. Rudmin M., Abdullayev E., Ruban A., Buyakov A., Soktoev B. Mechanochemical preparation of slow release fertilizer based on glaucite–urea complexes. *Minerals*, 2019, vol. 9 (507), pp. 1–10.
39. Rudmin M., Mazurov A., Banerjee S. Origin of ooidal ironstones in relation to warming events: Cretaceous-Eocene Bakchar deposit, south-east Western Siberia. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, vol. 100, pp. 309–325.
40. Rudmin M., Banerjee S., Makarov B., Mazurov A., Ruban A., Oskina Y., Tolkachev O., Buyakov A., Shalbybin M. An investigation of plant growth by the addition of glaucitic fertilizer. *Applied Clay Science*, 2019, vol. 180, pp. 1–8.
41. Rudmin M., Reva I., Gunko A., Mazurov A., Abramova R. Structural-chemical features and morphology of glaucites in sedimentary iron ore of Bakchar prospect (Western Siberia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27 (012026), pp. 1–6.
42. Rudmin M., Banerjee S., Mazurov A., Makarov B., Martemyanov D. Economic potential of glaucitic rocks in Bakchar deposit (S-E Western Siberia) for alternate potash fertilizer. *Applied Clay Science*, 2017, vol. 150, pp. 225–233.
43. Rudmin M., Banerjee S., Makarov B. Evaluation of the effects of the application of glaucitic fertilizer on oat development: a two-year field-based investigation. *Agronomy*, 2020, vol. 10 (872), pp. 1–12.
44. Schaber P.M., Colson J., Higgins S., Thielen D., Anspach B., Brauer J. Thermal decomposition (pyrolysis) of urea in an open reaction vessel. *Thermochimica Acta*, 2004, vol. 424 (1–2), pp. 131–142.
45. Kristóf J., Frost R.L., Horváth E., Kocsis L., Inczédy J. Thermoanalytical investigations on intercalated kaolinites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1998, vol. 53 (2), pp. 467–475.
46. Makó É., Kristóf J., Horváth E., Vágvölgyi V. Kaolinite-urea complexes obtained by mechanochemical and aqueous suspension techniques – a comparative study. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009, vol. 330 (2), pp. 367–373.
47. Emmerich K., Madsen F.T., Kahr G. Dehydroxylation behavior of heat-treated and steam-treated homoionic cis-vacant montmorillonites. *Clays and Clay Minerals*, 1999, vol. 47 (5), pp. 591–604.

Поступила 29.09.2020 г.

Received: 29 September 2020.

Информация об авторах

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

Рева И.В., аспирант Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Якич Т.Ю., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Соктоев Б.Р., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Буяков А.С., ассистент Инженерной школы новых производственных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета; младший научный сотрудник Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.

Табакаев Р.Б., кандидат технических наук, научный сотрудник научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ибраева К., аспирант научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 549.02:54.052:553.611.6

MONTMORILLONITE AS A PROSPECTIVE COMPOSITE MINERAL FOR THE CREATION OF MODERN SLOW-RELEASE FERTILIZERS

Maxim A. Rudmin¹,
rudminma@tpu.ru

Igor V. Reva¹,
igor_1993@mail.ru

Tamara Yu. Yakich¹,
cherkasovatu@tpu.ru

Bulat R. Soktoev¹,
bulatsoktoev@tpu.ru

Ales S. Buyakov^{1,2},
alesbuyakov@gmail.com

Roman B. Tabakaev¹,
tabakaevRB@tpu.ru

Kanipa Ibraeva¹,
kti1@tpu.ru

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

² Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch Russian Academy of Sciences,
2/4, Akademicheskii avenue, Tomsk, 634055, Russia.

The relevance of the research. The solution of environmental problems in the agricultural sector is possible through the use of new slow-released or controlled release fertilizers. This article presents options for using montmorillonite as a component of modern nitrogen fertilizers with controlled properties and the results of studying mineral transformations in the mechanochemical activation at various parameters.

The main aim of the work was to evaluate activation mechanisms of the montmorillonite as an inhibitor of nitrogen composites for creating slow-release fertilizers.

The methods: mechanochemical activation by planetary and ring mills, X-ray diffraction, scanning electron microscopy, infrared spectroscopy, differential thermal analysis.

Results. The proportion of intercalated urea in montmorillonite (for M1N1 mixtures) is slightly changed within 22,3...23,2 % for the planetary mill activation for 3, 8 or 11 minutes. The maximum intercalation degree of 23,2 % was achieved in the activation for 3 minutes. However, about 40...50 % of the aggregated particles are covered with an outer shell of excess urea up to 2,5 μm in the thick after an 11-minute operation for the planetary mill. The proportion of intercalated urea in montmorillonite is slightly changed from 23,2 to 21,6 % for the activation time increases from 30 to 120 minutes in a ring mill. While the activation time was increased, urea microcrystallites were formed on the surface of mineral particles. Mineral products synthesized by planetary or ring mill activation have the potential to be used as slow-release fertilizers with several beneficial functions. Composites synthesized with 11-minute or 120-minute planetary or ring mills, respectively, are characterized by two types of nitrogen. Fertilizers will initially release nutrients at a high rate from the outer urea film. After that, exchangeable nitrogen will be released from the interlayer space of montmorillonite, thereby providing prolonged nutrition of the plants.

Key words:

Montmorillonite, clay minerals, mineral fertilizers, mechanochemical activation, nitrogen fertilizers.

This study was supported by the grant from the President of the Russian Federation to support young Russian scientists, project number MK-213.2020.5.

Information about the authors

Maxim A. Rudmin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Igor V. Reva, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

Tamara Yu. Yakich, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

Ales S. Buyakov, assistant professor, National Research Tomsk Polytechnic University; junior researcher Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch Russian Academy of Sciences.

Roman B. Tabakaev, Cand. Sc., researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

Kanipa Ibraeva, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.812.1; 553.632; 553.98

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ В ЦЕЛЯХ РАНЖИРОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СТРУКТУР, НАХОДЯЩИХСЯ В ПРЕДЕЛАХ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ

Галкин Владислав Игнатьевич¹,
vgalkin@pstu.ru

Мелкишев Олег Александрович¹,
melkishev@pstu.ru

Варушкин Станислав Владимирович^{2,1},
geologist-07@mail.ru

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

² ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»,
Россия, 614990, г. Пермь, ул. Ленина, 62.

Актуальность работы. За последние годы в Пермском крае произошли существенные изменения территориального распределения запасов и ресурсов углеводородов. В настоящее время на территории платформенной части Пермского края открыты и разведаны все крупные и средние месторождения нефти и газа, тогда как в пределах Соликамского нефтегазоносного района Волго-Уральской нефтегазоносной провинции возможность открытия таких месторождений реально существует, особенно на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Выбор объектов и определение очередности их ввода в поисково-оценочное бурение играют важное значение для успешности проведения геологоразведочных работ.

Цель: определить первоочередные объекты для постановки поисково-оценочного бурения на основе статистических моделей прогноза нефтегазоносности.

Объекты: выявленные и подготовленные нефтегазоперспективные структуры Соликамского нефтегазоносного района Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, находящиеся в контуре Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей.

Методы: построение многомерных моделей методом пошагового регрессионного анализа.

Результаты. Для комплексного проведения ранжирования всех имеющихся структур, находящихся на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей, был рассчитан комплексный зонально-локальный критерий нефтегазоносности – Рнкомп. Проведена оценка влияния морфологических ($R_{\text{морм}}$), миграционных ($R_{\text{мм}}$), геохимических ($R_{\text{гех}}$) параметров и критерия по данным газопроявлений ($R_{\text{гпр}}$) на комплексный показатель Рнкомп. Из анализа построенных моделей следует, что критерии $R_{\text{морм}}$, $R_{\text{гех}}$ являются более универсальными, тогда как $R_{\text{мм}}$, $R_{\text{гпр}}$ проявляются только для выборок, которые включают структуры с наибольшими значениями комплексного показателя Рнкомп. Установлены наиболее перспективные структуры с точки зрения первоочередности ввода в поисково-оценочное бурение.

Ключевые слова:

Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей, Соликамский нефтегазоносный район, Волго-Уральская нефтегазоносная провинция, пошаговый регрессионный анализ, условная комплексная вероятность, поисково-оценочное бурение, геологоразведочные работы.

Оценка нефтеносности территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС) является достаточно сложной, так как в верхней части разреза располагается уникальное месторождение, что затрудняет здесь проведение поискового бурения [1–5]. Поэтому для оценки нефтеносности предлагается использовать дополнительные критерии, связанные с наличием этой толщи. Дополнительно к морфологическим, геохимическим и миграционным критериям авторы данной статьи предлагают использовать газоносность самой соленосной толщи. Поэтому для оценки нефтегазоносности структур были использованы четыре группы показателей, разработанные специально для территории ВКМКС.

Геологический разрез рассматриваемой территории представлен отложениями вендского комплекса, девонской, каменноугольной, пермской систем и четвертичными отложениями (рис. 1).

Особенности и математический аппарат разработки геолого-математических моделей для решения геологических задач приведены в работах как отечественных, так и зарубежных авторов [6–26].

Первая группа оценивает нефтеносность по морфологическим показателям. В работах [27, 28] установлено, что помимо зональных характеристик, на оценку нефтегазоносности в значительной степени влияют морфологические характеристики локальных структур. Рассматривались значения амплитуд (A), площадей (S) и интенсивности (A/\sqrt{S}) по основным отражающим горизонтам структур. В результате по показателям данной группы был разработан комплексный критерий – $R_{\text{морм}}$. Средние значения многомерного вероятностного критерия $R_{\text{морм}}$ для нефтяных структур равен 0,708 д. ед., для пустых – 0,188 д. ед. Статистические характеристики критерия являются информативными: t-критерий Стьюдента составляет 6,98 при $p=0,000$.

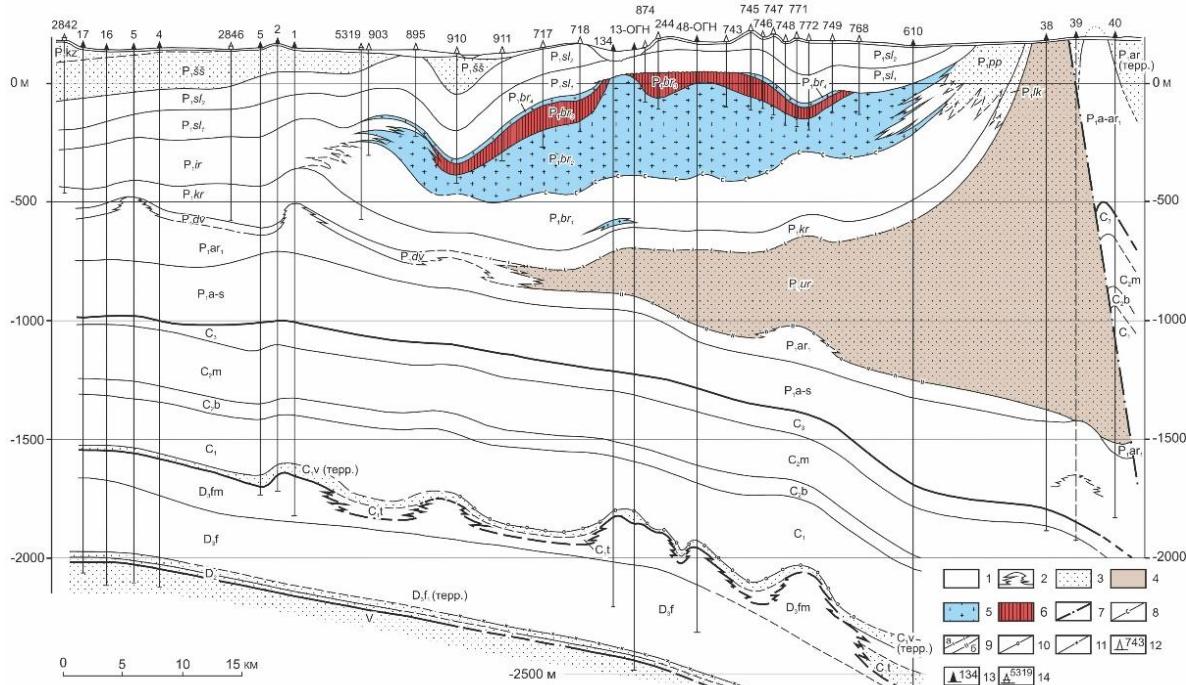


Рис. 1. Схематический геологический разрез Соликамской впадины [1]

Fig. 1. Schematic geological section of the Solikamsk depression [1]

По геохимическим показателям разработаны критерии – Рукв_{rx} и Ркм [29, 30]. Для построения геохимических моделей использованы показатели содержания рассеянного органического вещества (РОВ), содержания органического углерода в РОВ ($C_{опр}$), концентраций петролейных, хлороформенных и спиртобензольных битумоидов ($B_{пз}$, $B_{хл}$, $B_{сб}$ и $B_{хл}/B_{сб}$) и битумоидный коэффициент (β) по основным нефтематеринским толщам в разрезе Соликамской депрессии. Среднее значение критерия Рукв_{rx} для нефтяных структур равно 0,614 д. ед., для пустых – 0,283 д. ед. Статистические характеристики критерия являются информативными: t-критерий Стьюдента составляет 4,20 при $p=0,000$.

Миграционный критерий Ркм [29, 30] основан на разделении классов по трем характеристикам: минимальное расстояние от центров с повышенными значениями Рукв_{rx} до центра локальных структур ($L_{\text{гео}}$), расстояния от структур до ближайших разломов ($L_{\text{разл}}$) и показателя дальности субвертикальной миграции углеводородов ($L_{\text{мигр}}$). Среднее значение критерия Ркм для нефтяных структур равно 0,592 д. ед., для пустых – 0,452 д. ед. Статистические характеристики критерия являются информативными: t-критерий Стьюдента составляет 3,73 при $p=0,000$.

По геохимическим показателям разработан критерий Рукв_{rx} [29, 30]. Дополнительно к этим критериям разработан показатель, который оценивает процессы субвертикальной миграции углеводородов из нижерасположенных залежей нефти и газа, которые были зарегистрированы в виде газопроявлений в соленосной толще ВКМКС – Р_{хМНХ} [31]. В качестве источников информации выступали данные о газопроявлениях, зафиксированных при бурении солеразведочных скважин в соленосной толще ВКМКС, которые при-

ведены в архивных данных и отчетах о поисково-оценочных работах. Эти данные были обобщены и использованы для построения вероятностно-статистической модели прогноза нефтегазоносности. В состав зонального комплексного критерия вошли группы вероятностей мощности пластов ($R_{\text{H}}(Z_m)$, $\text{RES}_{R_{\text{H}}(Z_m), \text{дин}}$), абсолютных отметок ($R_{\text{H}}(Z_h)$) и химического состава солей ($R_{\text{H}}(Z_x)$). Среднее значение критерия $R_{\text{H}_{\text{МНХ}}}$ для нефтяных структур равно 0,526 д. ед., для пустых – 0,422 д. ед. Статистические характеристики критерия являются информативными: t-критерий Стьюдента составляет 5,40 при $p=0,000$. По значениям $R_{\text{H}_{\text{МНХ}}}$, при использовании данных по всем изучаемым скважинам, построена схема изменения распределения $R_{\text{H}_{\text{МНХ}}}$ по площади исследований (рис. 2).

Вне площади разрабатываемых месторождений наибольшими значениями комплексного критерия нефтегазоносности R_{HMX} характеризуются участки, расположенные севернее от месторождения им. Сухарева и западнее от Логовского месторождения. Максимальные значения R_{HMX} в этих районах равны 0,75 д. ед. (скв. № 623) и 0,69 д. ед. (скв. № 662) соответственно. На остальной территории выделяется ряд локальных аномалий, где $R_{\text{HMX}} > 0,60$ д. ед.: в южной части – к северу и западу от месторождения им. Архангельского, в центральной части – в непосредственной близости к Новологовской, Клестовской, Стрелецкой структурам и в районе Боровицкого про-гиба ВКМКС вне границ Березниковского палеоплато, в северной части – к югу от Озерного месторождения.

В табл. 1 представлены средневзвешенные по площади значения вероятностных характеристик Рук_{морф}, Рук_{гх}, Ркм, Р_{МНХ} по перспективным структурам в рамках изучаемого района.

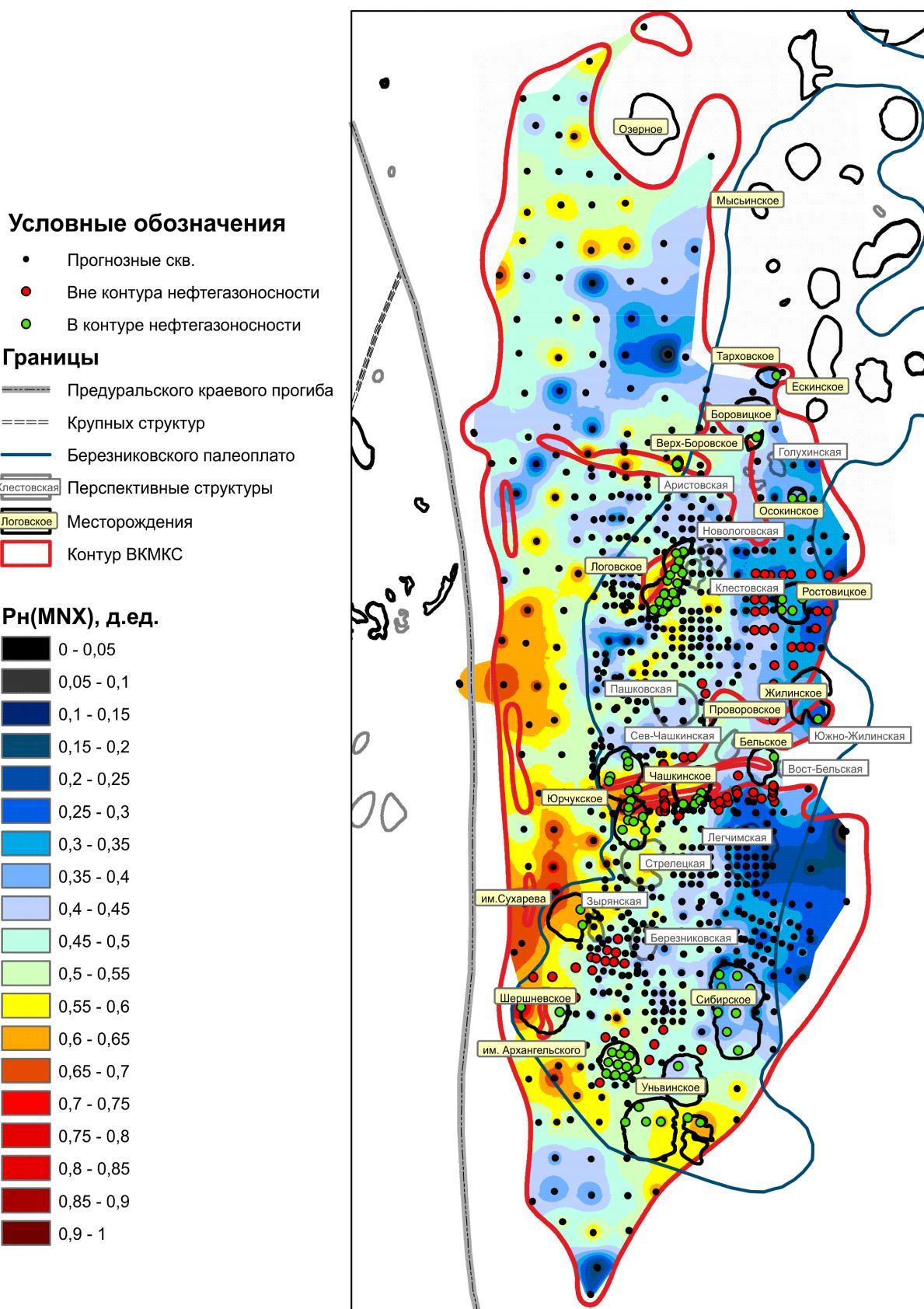


Рис. 2. Прогноз нефтегазоносности территории ВКМКС по критерию Pn_{MNX} [31]

Fig. 2. Forecast of oil and gas content of the Verkhnekamsky deposit of potassium and magnesium salts (VFPMS) according to the Pn_{MNX} criterion [31]

Таблица 1. Вероятностные характеристики перспективных структур ВКМКС

Table 1. Probabilistic characteristics of perspective structures of the VFPMS

Название структуры Structure name	Rук _в _{морф} Pук _в _{морф}	Rук _в _{rx} Pук _в _{gh}	Pкм Pkm	P _h _{MNX} P _h _{MNX}
	д. ед./unit fraction			
Аристовская Aristovskaya	0,11	0,35	0,67	0,42
Голухинская Golukhinskaya	0,43	0,30	0,65	0,38
Клестовская Klestovskaya	0,05	0,92	0,61	0,50
Новологовская Novologovskaya	0,32	0,80	0,63	0,42
Березниковская Bereznikovskaya	0,59	0,81	0,73	0,44
Восточно-Бельская Vostochno-Belskaya	0,17	0,98	0,74	0,44
Стрелецкая Streletskaia	0,68	0,75	0,73	0,58
Северо-Чашкинская Severo-Chashkinskaya	0,51	0,93	0,68	0,45
Пашковская Pashkovskaya	0,96	0,70	0,48	0,46
Южно-Жилинская Yuzhno-Zhilinskaya	0,83	0,94	0,66	0,37
Легчимская Legchimskaya	0,99	0,93	0,80	0,27
Зыряновская Zyryanovskaya	0,99	0,89	0,73	0,57

Применение методики вычисления условной комплексной вероятности по всем представленным группам показателей позволит более разносторонне выполнить оценку нефтеносности локальных структур. Для этого предлагается использовать следующую формулу расчета комплексного зонально-локального критерия нефтегазоносности:

$$P_{h\text{комп}} = \frac{\text{Рук}_{\text{в}}\text{мопф} \times \text{Рук}_{\text{в}}\text{rx} \times \text{Ркм} \times P_{h\text{MNX}}}{[\text{Рук}_{\text{в}}\text{мопф} \times \text{Рук}_{\text{в}}\text{rx} \times \text{Ркм} \times P_{h\text{MNX}} + (1 - \text{Рук}_{\text{в}}\text{мопф}) \times (1 - \text{Рук}_{\text{в}}\text{rx}) \times (1 - \text{Ркм}) \times (1 - P_{h\text{MNX}})]}$$

По предлагаемой формуле рассчитаны значения критерия $P_{h\text{комп}}$ для всех выявленных и подготовленных структур, расположенных в контуре ВКМКС, которые составляют (д. ед.):

1. Аристовская – 0,0891;
2. Голухинская – 0,2690;
3. Клестовская – 0,4863;
4. Новологовская – 0,6989;
5. Березниковская – 0,9287;
6. Восточно-Бельская – 0,9573;
7. Стрелецкая – 0,9597;
8. Северо-Чашкинская – 0,960;
9. Пашковская – 0,9778;
10. Южно-Жилинская – 0,9887;
11. Легчимская – 0,9995;
12. Зыряновская – 0,9997.

Для оценки вклада в значения $P_{h\text{комп}}$ различных сочетаний вероятностных критериев $\text{Рук}_{\text{в}}\text{мопф}$, $\text{Рук}_{\text{в}}\text{rx}$, Ркм , $P_{h\text{MNX}}$ сформируем изучаемую выборку по критерию $P_{h\text{комп}}$ от максимального ($P_{h\text{комп}}=0,9997$ д. ед.) до минимального ($P_{h\text{комп}}=0,0891$ д. ед.) значений.

Оценку влияния критерии $\text{Рук}_{\text{в}}\text{мопф}$, $\text{Рук}_{\text{в}}\text{rx}$, Ркм , $P_{h\text{MNX}}$ на $P_{h\text{комп}}$ выполним с помощью построения многомерных моделей, при этом строить их будем с помощью пошагового регрессионного анализа. Первая модель будет построена по трем структурам с максимальными значениями $P_{h\text{комп}}$ (табл. 1). Следующая модель будет построена при $n=4$ и так далее до $n=12$. Таким образом, были построены 10 уравнений регрессии, вид которых приведен в табл. 2.

Таблица 2. Многомерные уравнения регрессии для анализа формирования значений $P_{h\text{комп}}$

Table 2. Multivariable regression equations for analysis of the formation of $P_{h\text{комп}}$ values

Интервал построения моделей по $P_{h\text{комп}}$, д. ед. Interval of model building according to $P_{h\text{комп}}$, unit fraction	Номера структур, по которым построены модели Numbers of structures included in the model	Свободный член Intercept term	Угловой коэффициент/Slope term				R
			Рук _в _{морф} Pук _в _{морф}	Рук _в _{rx} Pук _в _{gh}	Pкм Pkm	P _h _{MNX} P _h _{MNX}	
0,989–0,999	10-12	0,937	0,067	-0,004	–	0,019	0,999
0,978–0,999	9-12	0,921	0,011	–	0,078	0,019	0,999
0,960–0,999	8-12	0,818	0,089	0,104	-0,008	0,013	0,999
0,959–0,999	7-12	0,822	0,087	0,095	–	0,013	0,999
0,957–0,999	6-12	0,845	0,065	0,097	–	–	0,967
0,929–0,999	5-12	0,800	0,077	0,135	–	–	0,875
0,699–0,999	4-12	0,454	0,209	0,403	–	–	0,710
0,486–0,999	3-12	0,317	0,715	–	0,538	–	0,790
0,269–0,999	2-12	-0,111	0,437	0,849	–	–	0,886
0,089–0,999	1-12	-0,216	0,471	0,945	–	–	0,935

Анализ построенных моделей показывает, что критерий $\text{Рук}_{\text{в}}\text{морф}$ использовался при построении всех 10 моделей, критерии $\text{Рук}_{\text{в}}\text{rx}$, $P_{h\text{MNX}}$, Ркм соответственно при построении 8, 4 и 3 моделей. Это свидетельствует о том, что критерии $\text{Рук}_{\text{в}}\text{морф}$, $\text{Рук}_{\text{в}}\text{rx}$ являются более универсальными, тогда как Ркм , $P_{h\text{MNX}}$ характеризуют особенность их проявления только для тех структур, которые имеют наибольшие значение $P_{h\text{комп}}$. Вероятно, проявление этих особенностей может более надежно оценить нефтеносность этих структур.

Наблюдается обратная линейная зависимость между значениями $P_{h\text{комп}}$ и $\text{Рук}_{\text{в}}\text{морф}$, $\text{Рук}_{\text{в}}\text{rx}$. Данный факт объясняется тем, что при увеличении значений по критерию $P_{h\text{комп}}$ в выборку входят высокоамплитудные структуры, при этом значения $\text{Рук}_{\text{в}}\text{морф}$ вносят меньший вклад. По причине расположения наиболее перспективных структур выборки 5-12 в центральной геохимической аномалии наблюдается снижение значений по геохимическому критерию $\text{Рук}_{\text{в}}\text{rx}$.

Следует отметить, что показатель R_{HMX} рекомендуется использовать при построении моделей, которые характеризуются максимальными значениями по комплексному критерию. Вклад в регрессию для R_{HMX} положителен, таким образом, чем больше значение

комплексного критерия по данным газопроявлений, тем выше общая вероятность нефтегазоносности.

Изменение значений коэффициента корреляции R от R_{HCOMP} приведено на рис. 3.

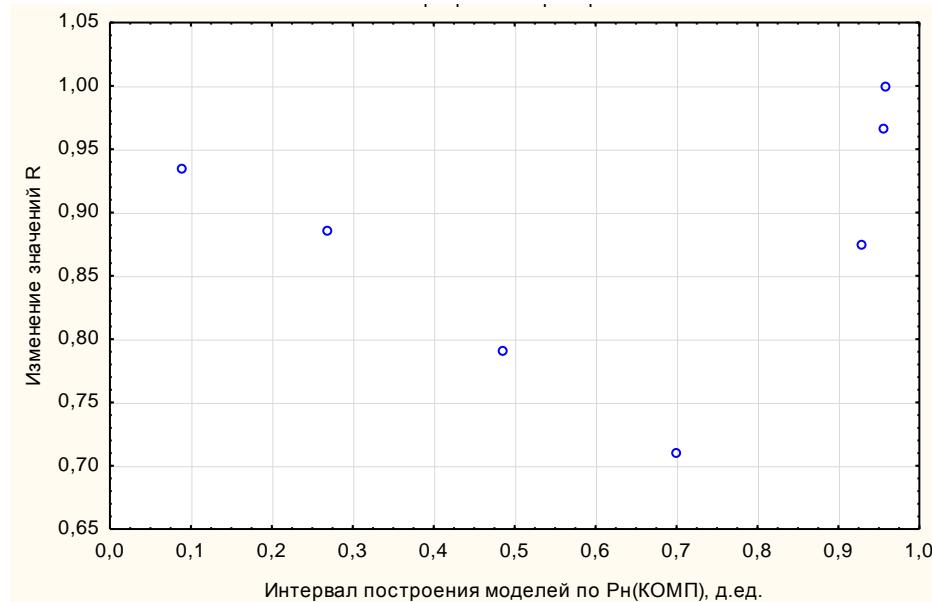


Рис. 3. Изменение коэффициента R от R_{HCOMP}

Fig. 3. Change in the coefficient R from P_{HCOMP}

Отсюда видно, что в пределах графика выделяются два вида соотношений между R и R_{HCOMP} . При значениях $R_{\text{HCOMP}} > 0,7$ д. ед. наблюдается уменьшение значений R от 0,9997 до 0,709 д. ед., далее происходит повышение значений при уменьшении R_{HCOMP} . Данное обстоятельство можно объяснить тем, что при $R_{\text{HCOMP}} > 0,7$ д. ед. наблюдается формирование значений за счет всех разработанных критериев, тогда как при $R_{\text{HCOMP}} < 0,7$ д. ед. влияние Ркм, R_{HMX} не наблюдается. Поэтому для прогнозных оценок для выделения первоочередных объектов поисков УВ целесообразно использовать те модели, в которых присутствуют все разработанные критерии. Таким условиям удовлетворяет только одна модель, которая построена в диапазоне 0,999–0,960 д. ед.

Заключение

Предложенная методика прогноза нефтегазоносности позволяет на базе морфологических, геохимических, миграционных критериев и вероятностной модели нефтегазоносности по данным газопроявлений соленосной толщи отранжировать перспективные объекты по перспективности для последующей постановки детальных ГРР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей. – Пермь: Изд-во ГИ УрО РАН, 2013. – 429 с.
2. Варушкин С.В., Козлова И.А. Возможность проведения поисково-оценочных работ на объектах, расположенных под толщей калийно-магниевых солей Верхнекамского месторождения // Вестник Пермского национального исследовательского

Предложена формула расчета комплексного зонально-локального критерия нефтегазоносности R_{HCOMP} . Проведена оценка вклада в значения комплексного критерия нефтегазоносности R_{HCOMP} в разных сочетаниях вероятностных критериев Рукв_{морф}, Рукв_{rx}, Ркм, R_{HMX} с построением многомерных моделей по 10 моделям. Из анализа построенных моделей следует, что критерии Рукв_{rx}, Рукв_{морф} являются более универсальными, тогда как Ркм, R_{HMX} проявляются только для выборок с наиболее перспективными структурами.

Благодаря расчету комплексного зонально-локального критерия нефтегазоносности R_{HCOMP} по группам показателей, разработанным специально для территории ВКМС, и построения многомерных моделей установлено, что наиболее перспективными с точки зрения первоочередности постановки поисково-оценочного бурения являются Зыряновская, Легчимская, Южно-Жилинская, Пашковская и Северо-Чашкинская структуры.

Применение результатов работы позволит снизить геологические риски при выборе объектов для проектирования ГРР и тем самым повысить успешность поисковых работ на рассматриваемом участке недр.

- политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – Т. 11. – № 3. – С. 8–15.
3. Андрейко С.С., Иванов О.В., Литвиновская Н.А. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений из почвы при проходке подготовительных выработок в подработанном массиве соляных пород. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – 158 с.

4. Андрейко С.С., Иванов О.В., Нестеров Е.А. Борьба с газодинамическими явлениями при разработке Верхнекамского и Старобинского месторождений калийных солей // Научные исследования и инновации. – 2010. – Т. 3. – № 4. – С. 34–37.
5. Прогнозирование выбросоопасных зон пластов при разведке и разработке Верхнекамского месторождения калийных солей / С.С. Андрейко, О.В. Иванов, А.В. Харинцев, А.Н. Чистяков // Горный журнал. – 2008. – № 10. – С. 34–36.
6. Шайхутдинов А.Н. Разработка вероятностных моделей для прогноза нефтегазоносности верхнеюрских отложений (на примере территории деятельности ТПП «Когалымнефтеказ») // Вестник Пермского научно-исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 11. – С. 11–28.
7. Мартюшев Д.А., Зайцев Р.А. Влияние петрофизических параметров рифогенных карбонатных коллекторов нефтяных месторождений турнейско-фаменских отложений Верхнего Прикамья на продуктивность добывающих скважин // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 11. – С. 77–85. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2350.
8. Кошкин К.А. Разработка вероятностно-статистических моделей для оценки перспектив нефтегазоносности пластов Тл2-б и Бб Пожвинского участка // Вестник Пермского научно-исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 17. – № 1. – С. 4–16. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.1.1.
9. Растрогуев М.Е. Использование дискриминантного анализа для интерпретации данных газового каротажа на примере Павловского нефтяного месторождения // Вестник Пермского научно-исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2019. – Т. 19. – № 1. – С. 39–55. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.1.4.
10. Фадеев А.П. Разработка методики оценки влияния закачки воды в пласт на добычу нефти на примере турнейских отложений Сосновского газонефтяного месторождения // Вестник Пермского научно-исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 18. – № 2. – С. 157–177. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.4.6.
11. Давыденко А.Ю. Вероятностно-статистические методы в геолого-геофизических приложениях. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. – 31 с.
12. Дэвис Дж.С. Статистический анализ данных в геологии / пер. с англ. – М.: Недра, 1990. – Кн. 1. – 319 с.
13. Михалевич И.М. Применение математических методов при анализе геологической информации (с использованием компьютерных технологий: Statistica). – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2006. – 115 с.
14. Поротов Г.С. Математические методы моделирования в геологии. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), 2006. – 223 с.
15. Чинн Р.Ф. Статистические методы в геологии / пер. с англ. – М.: Изд-во «Мир», 1986. – 189 с.
16. Armstrong M. Basic linear geostatistics. – Berlin: Springer, 1998. – 155 p.
17. Bartels C.P.A., Ketellapper R.H. Exploratory and explanatory statistical analysis of spatial data. – Boston: Martinus Nijhoff Publishing, 1979. – 268 p.
18. Goodwin N. Bridging the gap between deterministic and probabilistic uncertainty quantification using advanced proxy based methods. SPE Reservoir Simulation Symposium. – Houston, Richardson Publ., 2015. – P. 1796–1868.
19. Darling T. Well logging and formation evaluation. – Eastbourne: Gardners Books, 2010. – 336 p.
20. Tran D.T., Gabbouj M., Iosifidis A. Multilinear class-specific discriminant analysis // Pattern Recognition Letters. – 2017. – V. 100. – P. 131–136. DOI: 10.1016/j.patrec.2017.10.027.
21. Horne R.N. Modern well test analysis: a computer aided approach. 2nd ed. – Palo Alto: PetrowayInc, 2006. – 257 p.
22. Houze O., Viturat D., Fjaere O.S. Dynamic data analysis. – Paris: Kappa Engineering, 2008. – 694 p.
23. Maurya S.P., Singh N.P., Singh K.H. Geostatistical inversion. Seismic inversion methods: a practical approach. – Cham: Springer International Publ., 2020. – 216 p.
24. Montgomery D.C., Peck E.A. Introduction to liner regression analysis. – New York: John Wiley & Sons, 1982. – 504 p.
25. Van Golf-Racht T.D. Fundamentals of fractured reservoir engineering. – Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier scientific publishing company, 1982. – 709 p.
26. Yarus J.M. Stochastic modeling and geostatistics. – Tulsa, Oklahoma: AAPG, 1994. – 231 p.
27. К методике оценки перспектив нефтегазоносности Соликамской депрессии по характеристикам локальных структур / В.И. Галкин, И.А. Козлова, А.В. Растворов, И.В. Ванцева, С.Н. Кривошеков, В.Л. Воеводкин // Нефтепромысловое дело. – 2010. – № 7. – С. 12–17.
28. Галкин В.И., Растворов А.В., Галкин С.В. Вероятностно-статистическая оценка нефтегазоносности локальных структур. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2001. – 277 с.
29. О масштабах миграции углеводородов в пределах Соликамской депрессии Предуральского прогиба и возможностях ее использования для прогноза нефтегазоносности. К методике оценки перспектив нефтегазоносности Соликамской депрессии по характеристикам локальных структур / В.Л. Воеводкин, В.И. Галкин, И.А. Козлова, С.Н. Кривошеков, А.С. Козлов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2010. – № 12. – С. 6–12.
30. Галкин В.И., Кривошеков С.Н. Разработка вероятностно-статистических моделей нефтегазоносности в условиях экологически напряженной территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2010. – № 11. – С. 52–53.
31. Разработка статистической модели прогноза нефтегазоносности по газовыделениям в толще Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / В.И. Галкин, О.А. Мелкишев, С.В. Варушкин, С.С. Андрейко, Т.А. Лялина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2020. – Т. 20. – № 1. – С. 4–13. DOI: 10.15593/2224-9923/2020.1.1

Поступила 13.06.2020 г.

Информация об авторах

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

Мелкишев О.А., кандидат технических наук, профессор, доцент кафедры геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Варушкин С.В., ведущий геолог ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»; аспирант кафедры геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 550.812.1; 553.632; 553.98

USE OF PROBABILISTIC MODELS OF OIL AND GAS POTENTIAL FOR RANKING THE PERSPECTIVE STRUCTURES LOCATED WITHIN POOL OUTLINE OF THE VERKHNEKAMSKY DEPOSIT OF POTASSIUM AND MAGNESIUM SALTS

Vladislav I. Galkin¹,

vgalkin@pstu.ru

Oleg A. Melkishev¹,

melkishev@pstu.ru

Stanislav V. Varushkin^{2,1},

geologist-07@mail.ru

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

² LLC «LUKOIL-PERM»,
62, Lenin street, Perm, 614990, Russia.

The relevance of the research. In recent years, there have been significant changes in the territorial distribution of oil and gas reserves and resources in Perm region. At present, all large and medium-sized oil and gas deposits have been explored in the territory of the platform part of Perm region. At the same time within the Solikamsk petroleum district of the Volga-Ural petroleum province the possibility of opening such deposits actually exists, especially in pool outline of the Verkhnekamsky field of potassium and magnesium salts. Selection of objects and determination of their order of entry into prospecting and appraisal drilling play an important role for successful geological exploration works.

The main aim of the article is to identify the priority objects for setting up prospecting and appraisal drilling based on statistical models of oil and gas forecasts.

Object: lead and prepared oil and gas structures of the Solikamsk petroleum district of the Volga-Ural petroleum province located in pool outline of the Verkhnekamsky field of potassium and magnesium salts.

Methods: development of multidimensional models by the method of recursive regression analysis.

Results. For a comprehensive ranking of all available structures located on the territory of the Verkhnekamsky field of potassium and magnesium salts, a complex zonal-local criterion of oil and gas content – $R_{N\text{KOMP}}$ – was calculated. The impact of morphological ($P_{U\text{Kv,mor}}$), migration (P_{Km}), geochemical ($P_{U\text{Kv,gh}}$) parameters and gas events data criterion (P_{NMN}) on the integrated $R_{N\text{KOMP}}$ indicator was evaluated. From the analysis of the constructed models, it follows that the criteria of $P_{U\text{Kv,mor}}$, $P_{U\text{Kv,gh}}$ are more universal, while P_{Km} , P_{NMN} are manifested only for the choice, which includes the structures with the highest values of the complex indicator $R_{N\text{KOMP}}$. The most perspective objects were selected for input into prospecting and appraisal drilling.

Key words:

The Verkhnekamsky field of potassium and magnesium salts, the Solikamsk petroleum district, the Volga-Ural petroleum province, recursive regression analysis, conditional complex probability, prospecting and appraisal drilling, geological exploration.

REFERENCES

1. Kudryashov A.I. *Verkhnekamskoe mestorozhdenie soley* [The Verkhnekamsky field of salts]. Perm, Mining Institute UB RAS, 2013. 429 p.
2. Varushkin S.V., Kozlova I.A. The ability of conduction of prospecting-evaluation surveys at objects located under a layer of potassium and magnesium salts the Verkhnekamsky deposit. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2012, vol. 11, no. 3, pp. 8–15. In Rus.
3. Andreiko S.S., Ivanov O.V., Litvinovskaya N.A. *Prognozirovaniye i predotvratshchenie gazodinamicheskikh iavlenii iz pochvy pri prokhodke podgotovitelnykh vyrobok v podrabotannom massive solianykh porod* [Forecasting and prevention of the gasdynamic phenomena from the soil at a driving of preparatory developments in the earned additionally massif of salt breeds]. Perm, PNRPU Publ., 2015. 158 p.
4. Andreiko S.S., Ivanov O.V., Nesterov E.A. Fight against the gasdynamic phenomena when developing the Verkhnekamsky and Starobinsky fields of potash salts. *Scientific research and innovation*, 2010, vol. 3, no. 4, pp. 34–37. In Rus.
5. Andreiko S.S., Ivanov O.V., Kharintsev A.V., Chistiakov A.N. *Prognozirovaniye vybrosoopasnykh zon plastov pri razvedke i razrabotke Verkhnekamskogo mestorozhdeniya kaliinykh solei* [Forecasting of the combustion zones of layers at exploration and development of the Verkhnekamsky field of potash salts]. *Mining Journal*, 2008, no. 10, pp. 34–36.
6. Shaikhutdinov A.N. Development of probabilistic models for predicting of oil and gas content for Upper-Jurassic sediments (on the example of the territory of activity of TPP «Kogalymneftegaz»). *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2014, no. 11, pp. 11–28. In Rus.
7. Martyushev D.A., Zaytsev R.A. Influence of oil field reef carbonate reservoir petrophysical parameters of tournaisian-famennian deposits in Upper Kama on well productivity. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 11, pp. 77–85. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2350.
8. Koskin K.A. Development of probabilistic and statistical models for evaluation of oil and gas potential of T12-b and Bb reservoirs of Pozhvirinskij sector. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 4–15. In Rus. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.1.1.
9. Rastorguev M.E. Using discriminant analysis for the interpretation of gas logging data on the example of the Pavlov oil field. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 39–55. In Rus. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.1.4.
10. Fadeev A.P. A procedure for evaluation of the effect of water injection into a reservoir on oil production on example of Tournaisian deposits of the Sosnovskoe gas-oil field. *Perm*

- Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2018, vol. 18, no. 2, pp.157–177. In Rus. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.4.6.
11. Davydenko A.Yu. *Veroyatnostno-statisticheskie metody v geologo-geofizicheskikh prilozheniiakh* [Probabilistic and statistical methods in geologicgeophysical applications]. Irkutsk, IGTU Publ., 2007. 29 p.
 12. Devis J.S. *Statisticheskii analiz dannykh v geologii* [The statistical analysis of data in geology]. Moscow, Nedra Publ., 1990. Book 1, 319 p.
 13. Mikhalevich I.M. *Primenenie matematicheskikh metodov pri analize geologicheskoy informatsii (s ispolzovaniem kompyuternykh tekhnologiy: Statistica)* [Application of mathematical methods in the analysis of geological information (with use of computer technologies: Statistica)]. Irkutsk, IGU Publ., 2006. 115 p.
 14. Porotov G.S. *Matematicheskie metody modelirovaniya v geologii* [Mathematical methods of modeling in geology]. St. Petersburg, St. Petersburg State Mining Institute (Technical University) Publ. House, 2006. 223 p.
 15. Chini R.F. *Staticheskie metody v geologii* [Static methods in geology]. Moscow, Mir Publ., 1986. 189 p.
 16. Armstrong M. *Basic linear geostatistics*. Berlin, Springer, 1998. 155 p.
 17. Bartels C.P.A., Ketellapper R.H. *Exploratory and explanatory statistical analysis of spatial data*. Boston, Martinus Nijhoff Publ., 1979. 268 p.
 18. Goodwin N. Bridging the gap between deterministic and probabilistic uncertainty quantification using advanced proxy based methods. *SPE Reservoir Simulation Symposium 2015*. Houston, Richardson Publ., 2015. pp. 1796–1868.
 19. Darling T. *Well logging and formation evaluation*. Eastbourne, Gardeners Books, 2010. 336 p.
 20. Tran D.T., Gabbouj M., Iosifidis A. Multilinear class-specific discriminant analysis. *Pattern Recognition Letters*, 2017, vol. 100, pp. 131–136. DOI: 10.1016/j.patrec.2017.10.027.
 21. Horne R.N. *Modern well test analysis: a computer aided approach*. Palo Alto, PetrowayInc, 2006. 257 p.
 22. Houze O., Viturat D., Fjaere O.S. *Dynamic data analysis*. Paris, Kappa Engineering, 2008. 694 p.
 23. Maurya S.P., Singh N.P., Singh K.H. *Geostatistical Inversion. Seismic Inversion Methods: A Practical Approach*. Cham, Springer International Publ., 2020. 216 p. DOI: 10.1007/978-3-030-45662-7.
 24. Montgomery D.C., Peck E.A. *Introduction to liner regression analysis*. New York, John Wiley & Sons, 1982. 504 p.
 25. Van Golf-Racht T.D. *Fundamentals of fractured reservoir engineering*. Amsterdam, Oxford, New York, Elsevier scientific publishing company, 1982. 709 p.
 26. Yarus J.M. *Stochastic modeling and geostatistics*. Tulsa, Oklahoma, AAPG, 1994. 231 p.
 27. Galkin V.I., Kozlova I.A., Rastegaev A.V., Vantseva I.V., Krivoshchekov S.N., Voevodkin V.L. K metodike otsenki perspektiv neftegazonosnosti Solikamskoi depressii po kharakteristikam lokalnykh struktur [On the methodology for assessing the prospects of oil and gas potential of the Solikamsk depression according to the characteristics of local structures]. *Oilfield engineering*, 2010, no. 7, pp. 12–17.
 28. Galkin V.I., Rastegaev A.V., Galkin S.V. *Veroyatnostno-statisticheskaya otsenka neftegazonosnosti lokalnykh struktur* [Probabilistic-statistical evaluation of the gas content of local structures]. Ekaterinburg, URO RAN, 2001. 277 p.
 29. Voevodkin V.L., Galkin V.I., Kozlova I.A., Krivoshhekov S.N., Kozlov A.S. O masshtabakh migrantsii uglevodorodov v predelakh Solikamskoy depressii Preduralskogo progiba i vozmozhnostyakh ee ispolzovaniya dlya prognoza neftegazonosnosti. K metodike otsenki perspektiv neftegazonosnosti Solikamskoy depressii po kharakteristikam lokalnykh struktur [The extent of migration of hydrocarbons within the Ural Solikamskaya depression trough and it could be used for the prediction of oil and gas potential. By the methods of assessment of petroleum potential Solikamskaya depression characteristics of local structures]. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2010, no. 12, pp. 6–12.
 30. Galkin V.I., Krivoshhekov S.N. Razrabotka veroyatnostno-statisticheskikh modeley neftegazonosnosti v usloviyah ekologicheskii napryazhennoy territorii Verkhnekamskogo mestorozhdeniya kalyino-magniyevykh soley [Development of probability-statistical models of oil-gas content forecast in the conditions of ecologically intense territory of the Verkhnekamsky deposit of potassium salts]. *Environmental protection in oil and gas complex*, 2010, no. 11, pp. 52–53.
 31. Galkin V.I., Melkishev O.A., Varushkin S.V., Andreiko S.S., Lialina T.A. Development of the statistical model to forecast oil and gas potential according to gas content in the Verkhnekamskoe deposit of potassium and magnesium salts. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 4–13. In Rus. DOI: 10.15593/2224-9923/2020.1.1.

Received: 13 June 2020.

Information about the authors

Vladislav I. Galkin, Dr. Sc., professor, head of the Oil and Gas Geology Department, Perm National Research Polytechnic University.

Oleg A. Melkishev, Cand. Sc., associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

Stanislav V. Varushkin, lead geologist, LLC «LUKOIL-PERM»; post-graduate student, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 622.692.4.07

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ОПОРЫ ДЛЯ ПОДЗЕМНОГО КРЕПЛЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА В ЗОНАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОСТРОВНОЙ И ПРЕРЫВИСТОЙ МЕРЗЛОТЫ

Шамилов Хирамагомед Шехмагомедович¹,
khiramagomed@mail.ru

Султанмагомедов Тимур Султанмагомедович¹,
tsultanmaga@gmail.com

Султанмагомедов Султанмагомед Магомедтагирович¹,
ftt2010@mail.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки эффективных технологий для обеспечения сохранности проектного положения участков магистрального трубопровода в районах с несплошным характером распространения мерзлоты. Особую актуальность работа имеет с учетом активного освоения северных и арктических нефтегазоносных районов России.

Цель: разработать проектное решение и конструкцию подземных опор для закрепления нетеплоизолированных участков газопровода в сезонно-тающих и многолетнемерзлых грунтах при островном характере мерзлоты.

Объекты: магистральный трубопровод, закрепленный в мерзлых грунтах.

Методы: анализ и систематизация российского и зарубежного опыта теоретических и практических исследований, аналитические расчеты и компьютерное моделирование с применением программного обеспечения ANSYS на основе современных положений строительной механики и теории упругости.

Результаты. Рассмотрены существующие типы опор и подвесок трубопроводов в разрезе их применимости для целей крепления подземных участков нефте- и газопроводов в многолетнемерзлых и сезонно-тающих грунтах, в том числе в местах пересечения островной мерзлоты, ледяных линз и бугров пучения. По результатам выполненного анализа возможных нагрузок и ограничений уже существующих опорных конструкций трубопроводов при рисках всплытия и провисания подземных участков в протаявшей траншее предложена конструкция подземных анкерных опор и сделаны выводы о преимуществах их применения. Для расчета нагрузок и определения требуемых размеров и количества анкеров, сечений тросов растяжек и хомута для крепления трубопровода была разработана конечно-элементная модель, эффективность которой подтверждена аналитическим путем и экспериментально на разработанном испытательном стенде.

Ключевые слова:

Анкерная опора трубопровода, расчеты конструкции, подземный газопровод, островная мерзлота, сезонно-тающие грунты, ледяная линза, бугор пучения, устойчивость.

Введение

Зоны многолетней мерзлоты занимают не менее 60 % общей территории Российской Федерации, что составляет порядка 10 млн км². Общая площадь территории Земли с многолетнемерзлыми грунтами (сплошного, прерывистого и островного распространения) – 35 млн км², что составляет около 23 % участков суши.

Строительство и эксплуатация трубопроводов в районах распространения мерзлых грунтов сопряжены с проблемами, обусловленными климатическими и инженерно-геокриологическими условиями местности, а также степенью техногенного вмешательства в природную среду. Проблемы вызваны температурным влиянием трубопровода на мерзлые породы, что приводит к возникновению и развитию опасных инженерно-геологических процессов: пучение и просадка грунтов, обводнение трассы, образование таликов и пр. Эффект теплового воздействия магистрального газопровода как мощного источника тепла в сочетании с положительной плавучестью в слабонесущих грунтах приводят к потере балластирующей способности последних, увеличению ареала протаивания и, как следствие, к всплытию или просадке незакрепленных участков трубопровода.

Оттаивание мерзлых льдистых пород вокруг подземного магистрального трубопровода приводит к смещению его оси. Если объем оттаявшего грунта имеет значительную величину, это может привести и к просадке поверхности земли. После укладки и засыпки грунтом над трубой образуется маломощный слой сезонно-мерзлых пород. Этот слой оттаивает быстрее сезонно-мерзлых и сезонно-талых окружающих пород, которые не были затронуты строительными работами. По мере таяния снега разгрузка снежных вод происходит именно через талые породы в траншее трубопровода. Если оттаивание маломощных мерзлых пород носит серьезный характер, это чревато повышением уровня грунтовых вод и подтоплением траншеи.

На трассе трубопровода глубина сезонного оттаивания грунта неминуемо повышается. Это связано с увеличением солнечной радиации из-за удаления растительности. Если грунты вблизи трубопровода тают неравномерно, повышается вероятность его перемещений. Если же тают грунты в основании трубопровода, деформации трубопровода могут быть весьма опасны, так как грунты в этом случае могут проседать не только вследствие таяния включений льда, но и из-

за уплотнения оттаявшего грунта под воздействием собственного веса и внешних нагрузок.

Для снижения влияния вышеизложенных опасностей необходимо обратить внимание на следующее:

- магистральный трубопровод является инженерным сооружением большой протяженности и проходит через участки, отличающиеся инженерно-геокриологическими условиями;
- на трассе трубопровода могут протекать различные грунтово-мерзлотные процессы, которые могут негативно проявиться в виде термокарстов, бугров пучения, оттаивания пластовых льдов, наледей и пр.;
- может быть нарушен водно-тепловой баланс района строительства и естественная миграция вод.

Закрепление трубопроводов большого диаметра в многолетнемерзлых грунтах само по себе представляется еще одну инженерную задачу. В зависимости от сезонности и толщи мерзлоты опорные конструкции и участок трубопровода испытывают различные закономеренные нагрузки, что требует проведения тщательных расчетов при выборе количества и шага расположения опор, не только из условия обеспечения несущей способности, но также с учетом напряженно-деформированного состояния закрепляемого участка трубопровода. Выбор типов конструкций используемых опор, их размеров и количества должен отвечать условиям надежности и технико-экономической эффективности.

Анализ существующих технологических решений для закрепления подземного трубопровода в мерзлых грунтах

Первый опыт прокладки магистрального трубопровода в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов относится к Трансаляскинскому нефтепроводу (США). На сегодняшний день уже накопился колоссальный опыт прокладки и эксплуатации линейных объектов в инженерно-геологических условиях, осложненных многолетней мерзлотой, как в России, так и за рубежом. Тем не менее вопросы технико-экономического обоснования метода прокладки для участков трассы в районах распространения островной мерзлоты сохраняют свою актуальность. Эти вопросы стоят особенно остро на стадии предпроектных работ в ходе реализации инвестиционных проектов, в условиях недостатка исходных данных из-за отсутствия результатов инженерных изысканий и данных геомониторинга. Исследования в данном направлении для нашей страны сегодня являются особенно актуальными ввиду активного освоения северных и арктических районов и процессов, которые протекают в многолетнемерзлых грунтах из-за глобального потепления [1–5].

Основные требования по обеспечению устойчивости и эксплуатационной надежности магистральных трубопроводов внесены в нормативные документы по инженерным изысканиям и проектированию [6–9]. Но они не дают исчерпывающих ответов на все проблемные вопросы и требуют многочисленных исход-

ных данных, которые могут быть получены только путем длительного мониторинга или же по результатам анализа эксплуатации других подобных объектов в близких условиях.

В работах [10, 11] представлен анализ рисков эксплуатации и недостатки существующих методов прокладки магистральных трубопроводов в сезонно-тающих и многолетнемерзлых грунтах, а также предложена конструкция свайной опоры для подземного закрепления участков в зонах прерывистой (островной) и сезонно-тающей, в том числе линзовидной, мерзлоты.

В рамках исследования проанализированы существующие типы конструкций для крепления трубопроводов различного назначения, которые в общем случае делятся на опоры и подвески.

Первый вид – шарнирного типа, используется только для надземной прокладки, так как из-за своей сложной конструкции не способны работать в грунте, тем более мерзлом, вторые – подвески, компенсируют только лишь просадки грунта и не работают при выталкивающих нагрузках.

Несмотря на обилие конструкций и многолетний опыт эксплуатации нефте- и газопроводов, проложенных в сложных инженерно-геологических и климатических условиях (преимущественно надземного исполнения) [12–15], вопрос подземного точечного закрепления отдельных участков незначительной протяженности при пересечении ледяных линз и бугров пучения все еще открыт и требует разработки как проектных, так и технических решений [16, 17].

Так, к примеру, конструкция подвесной опоры для магистрального нефтепровода, разработанная ПАО «Транснефть» [18] для осложненных просадками участков прокладки, не может компенсировать нагрузок при всплытии подземного участка в обводненной траншее после оттаивания мерзлых пород.

В теплоэнергетической отрасли существуют более сложные подвесные опоры, отличающиеся наличием пружинного натяжителя подвесной части опоры, который в том числе препятствует всплытию трубы. Однако данная конструкция подразумевает ее полу-подземное расположение так, чтобы пружина-амортизатор находилась на поверхности, что потребует значительного увеличения объемов земельных работ, сильно усложнит процесс проектирования трассы и приведет к удорожанию строительства.

Довольно эффективными в зонах островной мерзлоты для сохранения подземного способа прокладки могут быть решения, разработанные для закрепления участков трубопроводов в слабонесущих грунтах [19]. При этом контейнерные методы, из-за меньшей надежности при изменениях проектного положения и необходимости привоза минерального грунта, в данном случае не рекомендуются к применению, хотя и могут быть использованы при незначительной протяженности трассы и глубине укладки. Лучшим же решением будет применение свайных конструкций из анкерных опор в исполнениях для мерзлого грунта с гибкими растяжками.

В мировой практике в разные годы имели место исследования в области повышения несущей способности мерзлых грунтов при помощи вакуумных устройств, колонн с контролируемым модулем, геосинтетической арматуры, цементирования грунта и укрепляющих волокон. Каждый из упомянутых методов наделен своими преимуществами и при нейтрализации слабых сторон в будущем может найти применение в деле повышения надежности магистральных трубопроводов [20–22].

Новая конструкция опоры для подземного крепления трубопровода

Как уже отмечалось ранее, в рамках проводимых исследований, получен патент для устройства точечного закрепления подземных участков трассы в зонах распространения островной мерзлоты [23]. Предложена конструкция опор на свайном основании, которая представлена на рис. 1.

При установке опор после рытья траншеи бурением механизмом пробуривают скважины для свай, они устанавливаются попарно через определенный промежуток по обе стороны трубопровода таким образом, чтобы конденсатор сезонно-действующего охлаждающего устройства (термостабилизатора) находился выше уровня поверхности земли. Бурона-

бивные сваи забиваются в мерзлые грунты на удалении от прогнозируемого ареала оттаивания, на случай интенсивного теплопритока к сваям предусмотрена подача охлаждающего агента в сезонно-действующее охлаждающее устройство для термостабилизации грунта основания свай. Шаг установки опор и необходимые параметры сваи (длина, диаметр, армирование, производительность термостабилизатора) определяются при помощи расчета в каждом конкретном случае. Затем на трубопровод при помощи грузо-подъемного средства с использованием шпилек монтируется металлический хомут. Хомут выполнен разъемным и состоит из двух половин трубы большего диаметра. Через петли хомута пропускаются два стальных троса, огибая трубопровод снизу и сверху. Концы стального троса пропускают через ушко талрепа в исполнении «вилка–ушко», загибаются в петлю и закрепляются зажимами. Вилка талрепа крепится к проушине закладного элемента, который устанавливается на буронабивную сваю с помощью болтовых соединений. Натяжение стальных тросов и положение трубопровода регулируется талрепами. После монтажа трубопровод и опорную конструкцию засыпают грунтом.

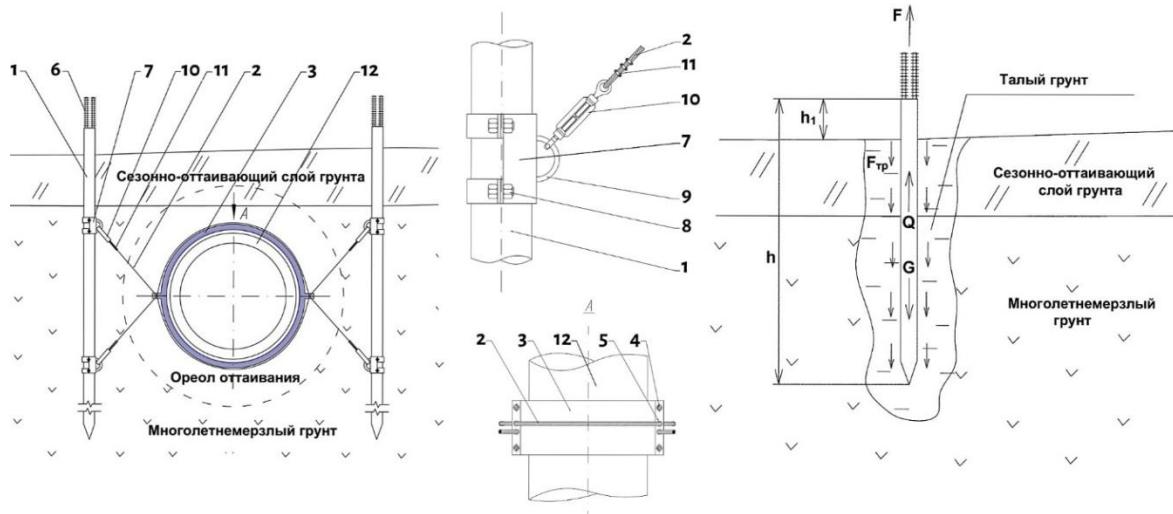


Рис. 1. Подземная анкерная опора для закрепления трубопровода: 1 – буронабивные сваи; 2 – стальные тросы; 3 – хомут; 4 – шпильки; 5 – петли; 6 – термостабилизаторы; 7 – закладной элемент; 8 – болтовое соединение; 9 – проушина; 10 – талреп; 11 – зажим

Fig. 1. Underground anchor support for fixing the pipeline: 1 – bored pile; 2 – steel cables; 3 – clamp; 4 – studs; 5 – collar loops; 6 – thermostabilizers; 7 – mortgage element; 8 – bolt connection; 9 – eye of a mortgage element; 10 – turnbuckle; 11 – clip of a steel cable

В процессе эксплуатации магистрального трубопровода вокруг него появляется ореол оттаивания, но проектное положение сохраняется благодаря тому, что конструкция опоры позволяет противостоять как просадкам грунта, так и всплытию трубопровода в обводненной траншее, а буронабивные сваи уходят глубже ореола оттаивания.

Методика исследования

Для определения необходимых геометрических параметров предложенной конструкции свайных опор

были рассчитаны размеры анкерных устройств (свай) исходя из серийно выпускаемой продукции (значение наружного диаметра от 32 до 377 мм) (рис. 2, слева). При расчете удерживающей способности анкерного устройства в зависимости от длины (рис. 2, справа) приняты следующие исходные данные: высота надземной части сваи $h_1=200$ мм, толщина стенки $\delta=4$ мм и диаметр несущей трубы $D_a=219$ мм. При расчетах принято допущение, что грунт в местах крепления анкерных устройств полностью растаплен, то есть удерживающая способность его минимальна.

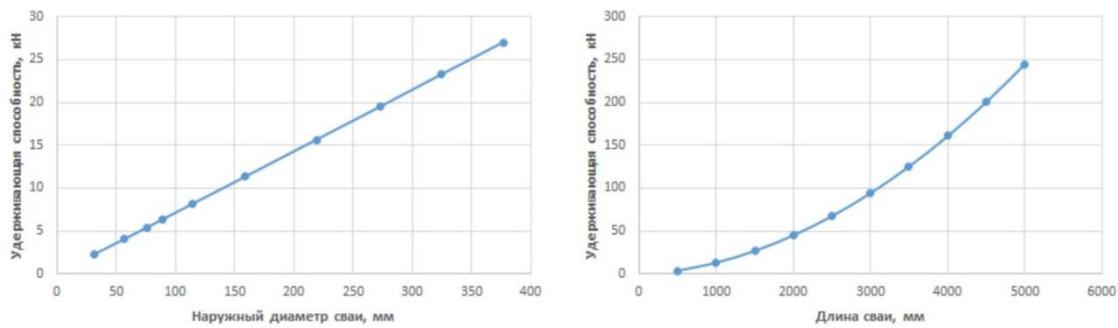


Рис. 2. Результаты расчета требуемых размеров анкерных устройств
 Fig. 2. Calculation results of the required dimensions of the anchor devices

Удерживающая способность сваи составляется действиями двух сил – собственного веса сваи и силы трения о грунт внешней поверхности сваи:

$$F = G + F_{tp} - Q,$$

где G – собственный вес сваи (анкера), Н; F_{tp} – сила трения сухого грунта о поверхности сваи (анкера), Н; Q – подъемная (выталкивающая) сила грунтовых вод, Н.

Рассмотрим каждый из перечисленных силовых факторов, в совокупности определяющих расчётную удерживающую способность (одного анкера).

Собственный вес сваи:

$$G = 0,25 \cdot \pi \cdot (D_h^2 - D_{bh}^2) \cdot h \cdot \gamma_m,$$

где D_h и D_{bh} – внешний и внутренний диаметр сваи, м; h – длина сваи, м; γ_m – величина удельного веса металла стенки, кг/м³.

Силы трения (сцепления грунта) о цилиндрические поверхности анкеров свайного основания вычисляются следующим образом:

$$F_{tp} = S_h \cdot \tau_{akt} = \pi \cdot D_h \cdot (h - h_1) \cdot \tau_{akt},$$

где S_h – площадь наружной поверхности сваи, контактирующей с грунтом, м²; h_1 – высота сваи, выступающая над поверхностью грунта, м; τ_{akt} – касательное напряжение на поверхности сваи, Па, находится по следующей формуле:

$$\tau_{akt} = e_{akt} \cdot t g \varphi = \left[\gamma_{rp} (h - h_1) t g^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + \right. \\ \left. + 2c \cdot t g \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \right] t g \varphi,$$

где φ – расчетное значение угла внутреннего трения сухого грунта, град.; c – коэффициент сцепления грунта; γ_{rp} – значение удельного веса сухого грунта, Н/м³.

Расчетная выталкивающая сила воды (подъемная сила), действующая на один анкер (в основании их может быть несколько), обусловленная архимедовой силой:

$$Q = \pi \cdot g \cdot \frac{D_h^2 - D_{bh}^2}{4} \cdot h \cdot \rho_w,$$

где g – значение ускорения свободного падения, м/с²; ρ_w – плотность грунтовой воды с учетом растворенных солей, кг/м³.

Расчеты показали, что длина анкера, как и следовало ожидать, является определяющей для несущей способности. Количество анкеров для одной опоры принято с двукратным запасом – для обеспечения ее надежности, то есть не менее четырех точек крепления вне зависимости от глубины заглубления, веса трубы и шага опор (потенциально возможной величины пролета).

Компьютерное моделирование

Для максимальных нагрузок (при допустимой величине пролета – шаге расположения опор, принятом в расчетах 100 м), действующих на отклонившийся от проектного положения подземный участок газопровода Ду1200, в программной системе конечно-элементного анализа ANSYS были определены значения продольных напряжений, возникающих в опасном сечении стенки трубы, и эквивалентных нагрузок в сечении хомута (рис. 3, 4, табл. 1).

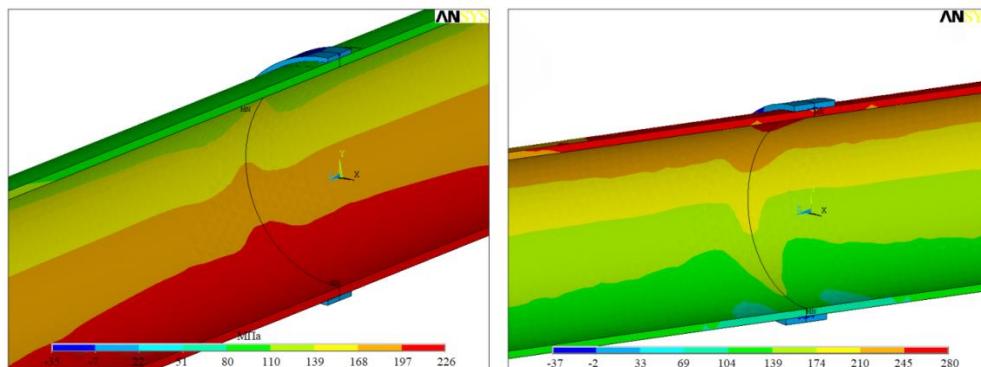


Рис. 3. Распределение продольных напряжений в опасном сечении трубы при вскрытии и провисании подземного газопровода Ду1200

Fig. 3. Longitudinal stresses distribution in the dangerous section of the pipe during the ascent and sagging of the underground gas pipeline DN1200

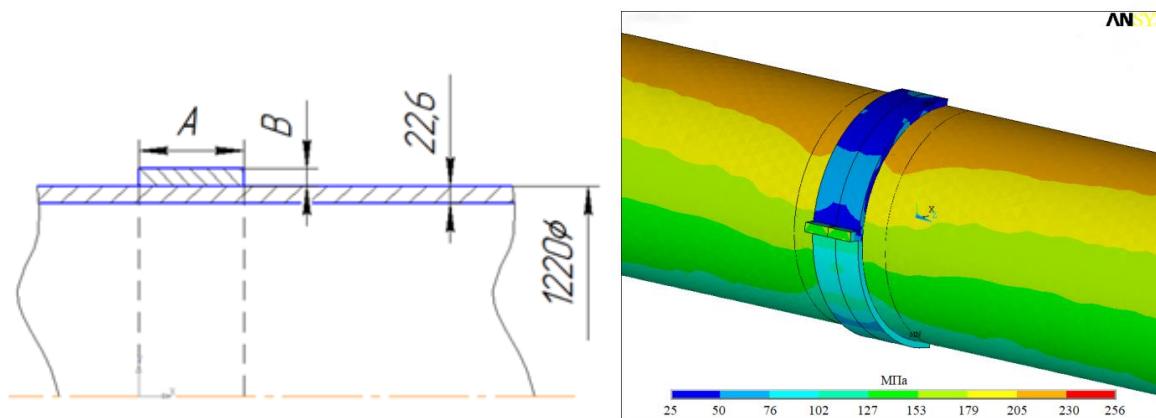


Рис. 4. Эквивалентные напряжения в сечении хомута опоры
Fig. 4. Equivalent stresses in the cross section of the support clamp

Таблица 1. Результаты расчета эквивалентных напряжений в хомуте в зависимости от его размеров

Table 1. Results of calculation of equivalent stresses in the clamp depending on its size

A, м (ширина хомута) A, m (clamp width)	B, м (толщина хомута) B, m (clamp thickness)	S, м ² (площадь сечения хомута) S, m ² (clamp cross-sectional area)	F, кН (действующая сила) F, kN (acting force)	σ _{max} , МПа (расчетные напряжения) σ _{max} , MPa (rated stress)	[σ], МПа (допустимые напряжения) [σ], MPa (permissible stresses)
0,1	0,015	0,0015	184	1730	300
0,3	0,015	0,0045	184	301	300
0,5	0,015	0,0075	184	182	300
0,1	0,025	0,0025	184	480	300
0,3	0,025	0,0075	184	120	300
0,5	0,025	0,0125	184	109	300
0,1	0,035	0,0035	184	225	300
0,3	0,035	0,0105	184	85,2	300
0,5	0,035	0,0175	184	69,8	300

С учетом максимальных нагрузок были определены требуемые геометрические размеры хомута и расчетные диаметры тросов гибких растяжек (рис. 5, табл. 2).

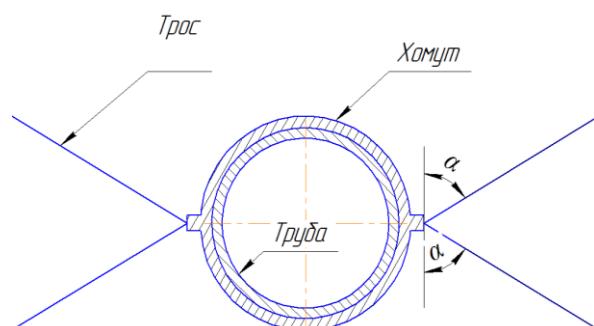


Рис. 5. Расчетная схема для определения требуемого сечения тросов

Fig. 5. Design scheme for determining the required cross-section of the cables

В табл. 2 приведены результаты расчета минимального диаметра троса в зависимости от его марки-

ровочной группы при отклонении газопровода в вертикальной плоскости от проектного положения (схемы на рис. 4, 5).

Таблица 2. Результаты расчета минимального диаметра троса растяжек

Table 2. Results of calculation of the cable extensions minimum diameter

α, градусы α, degrees	F, кН F, kN	Диаметр троса растяжек опоры (мм) в зависимости от его маркировочной группы, МПа			
		1600	1700	1800	2000
0	183,7	17,1	16,6	16,1	15,3
15	190,2	17,4	17,4	16,9	16,4
30	212,1	18,4	18,4	17,8	17,3
45	259,7	20,3	20,3	19,7	19,2
60	367,1	24,2	24,2	23,5	22,8

Проведенные расчеты показали возможность использования в качестве основания подземной опоры двух буронабивных свай (анкеров для мерзлых грунтов). Для исключения возможности появления ореола оттаивания вокруг свай предлагается термостабилизировать грунт путем установки в них сезоннодействующих охлаждающих устройств, полости которых заполнены низкокипящим агентом, с последующим регулярным термомониторингом трассы.

Расчеты прочности сечения хомута для крепления трубы к растяжкам опоры показали следующие минимально необходимые толщины стального листа: для хомута шириной 0,1 м – 35 мм, для 0,3 м – 25 мм и для 0,5 м – 15 мм. Требуемые минимальные диаметры тросов растяжек опоры газопровода Ду1200 составили 22,8–24,2 мм в зависимости от его маркировочной группы.

При доработке предложенной конструкции опоры путем установки двух дополнительных свай аналогичных геометрических размеров, по одной с каждой стороны, тяговые усилия на тросы будут снижены вдвое, также вдвое повысится и несущая способность опоры, что обеспечит закрепление оси трубопровода даже при срыве или растягивании грунтов под одной из свай.

Стоит отметить, что представленные результаты численного исследования получены с учетом принятого допущения об отсутствии взаимодействия трубопровода и грунтового массива в пределах ареала его оттаивания и расположения свай, основанием для которых служила сплошная ледяная линза как наиболее опасный расчетный случай.

Экспериментальная апробация опоры и разработанной цифровой модели закрепленного подземного участка трубопровода

Для проверки работоспособности конструкции и результатов расчета модели в ANSYS была создана экспериментальная установка (рис. 6). Установка моделирует работу в грунте подземной анкерной опоры для закрепления трубопровода. Установка состоит из неподвижной и подвижной рамок, с помощью которых мы можем задавать необходимое значение деформации трубы. Подвижная рама имитирует буронабивные сваи. Значение ее перемещения контролируется нагружающим болтом. Под нагружающим болтом установлен тензодатчик. К подвижной раме с помощью стальных тросов прикреплена муфта, выполняющая роль хомута. Как и в анкерной опоре,

тросы огибают муфту сверху и снизу, проходя через ее проушины. Муфта установлена на трубу меньшего диаметра. Концы трубы жестко прикреплены к неподвижной раме. Для эксперимента выбрана труба 35×1,5 из стали 08Х18Н10 длиной 2 м. Экспериментальная установка моделирует нагрузки и перемещения как при всплытии в обводненной траншее, так и при провисании участка в термокарсте, основной целью стендовых испытаний является подтверждение результатов численных экспериментов, полученных по разработанной модели конечных элементов.

Во время проведения эксперимента, моделируя всплытие трубопровода в обводненной траншее, рамка с моделью свайных опор перемещалась вверх, относительно основной рамы на 0,01 м. Усилие, необходимое для изгиба оси трубы, фиксировалось показаниями с тензодатчиков (рис. 7).

При этом для проверки работоспособности ранее использованной математической модели для расчета конструкции опоры в среде ANSYS сравнивались как результаты прямых аналитических расчетов, так и данные тензометрических измерений с фактическими перемещениями оси трубы, задаваемыми рамкой (табл. 3).

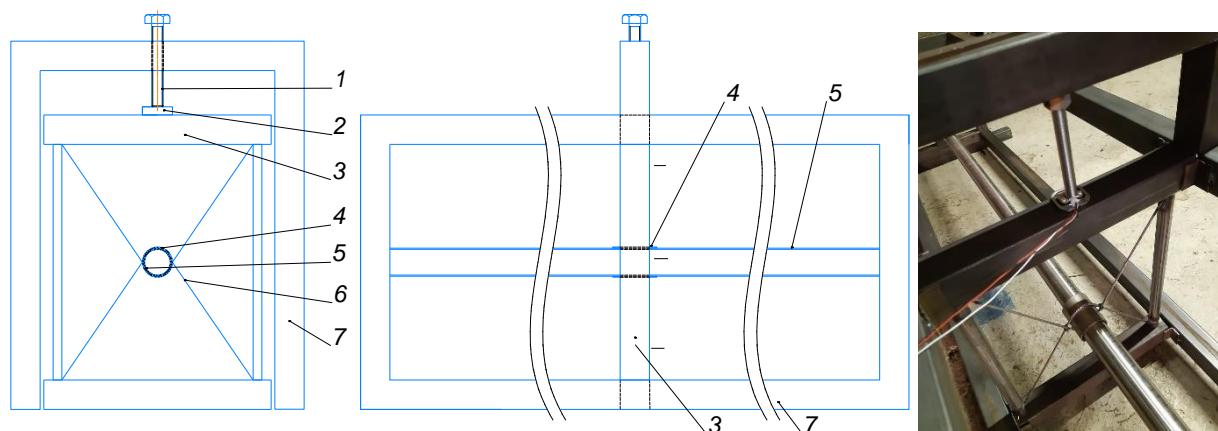


Рис. 6. Общий вид и схема экспериментальной конструкции: 1 – нагружающий болт; 2 – датчик; 3 – подвижная рама; 4 – муфта; 5 – труба; 6 – трос; 7 – основная неподвижная рама

Fig. 6. General view and the experimental design scheme: 1 – loading bolt; 2 – sensor; 3 – movable frame; 4 – coupling; 5 – pipe; 6 – cable; 7 – main fixed frame

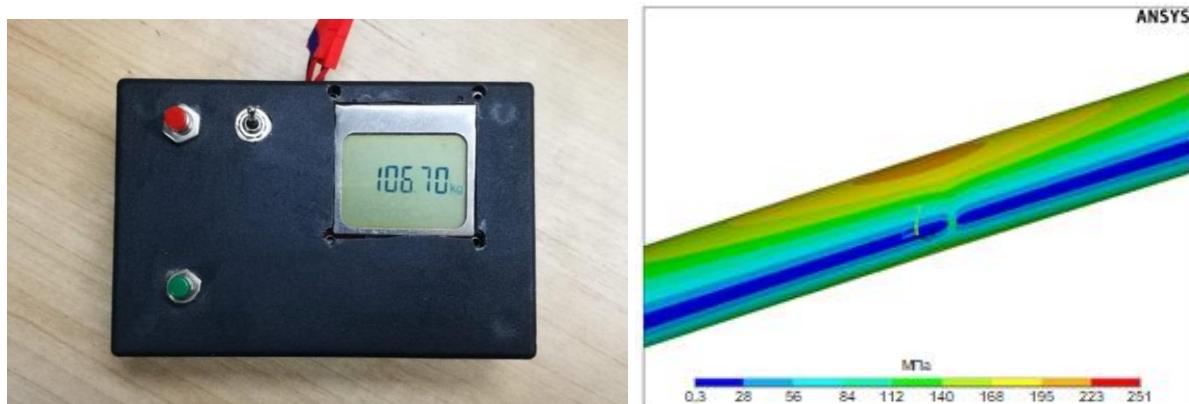


Рис. 7. Сопоставление результатов моделирования и опытных замеров

Fig. 7. Comparison of simulation results and experimental measuring

Таблица 3. Результаты проверки работоспособности расчетной модели

Table 3. Results of checking the correctness of the calculation model

№ опыта Experiment no.	Подъёмная сила, Н Lift force, N	Напряжения, МПа Stress, MPa	Перемещения, мм Displacement, mm
Результаты прямого аналитического расчета (исходные данные – величина подъемной силы при моделировании в ANSYS) Results of analytical calculation (initial data – the magnitude of the lifting force from ANSYS modeling)			
1	1109,54	218	10,5
2	554,77	109	5,25
3	277,385	54,5	2,6
Результаты расчета в конечно-элементной модели ANSYS (исходные данные – заданные фактические перемещения оси трубы) Calculation results in the finite element model ANSYS (initial data – given actual displacements of the pipe axis)			
1	1109,54	215	10
2	554,77	107,5	5
3	277,385	53,75	2,5
Результаты измерений с тензометрических датчиков (исходные данные – заданные фактические перемещения оси трубы) Measurement results with strain gauges (initial data – given actual displacements of the pipe axis)			
1	1045,66 (106,7 кг/кг)	–	10
2	516,006	–	5
3	259,965	–	2,5

Из результатов прямых и обратных поверочных расчетов видно, что надёжность конструкции подземной опоры трубы подтверждается высокой сходимостью модели с аналитическими зависимостями и опытными замерами.

Заключение

Представленные в статье результаты аналитических, численных и экспериментальных исследований позволили установить, что предложенная в [23] конструкция опоры позволяет обеспечить эффективное

подземное закрепление участков трубопровода, а разработанная для ее расчета модель позволяет получить корректные выходные данные. Применение предложенной конструкции опор для закрепления участков газопровода исключает необходимость дорогостоящей надземной прокладки в тех случаях, когда участки мерзлоты носят прерывистый или островной характер, что существенно сокращает стоимость строительно-монтажных работ и последующие затраты на эксплуатацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. An observation based constraint on permafrost loss as a function of global warming / S.E. Chadburn, E. Burke, P. Cox, P. Friedlingstein, G. Hugelius, S. Westermann // Nature Climate Change. – 2017. – V. 7. – Iss. 5. – P. 340–344.
2. Geophysical imaging of permafrost and talik configuration beneath a thermokarst lake / Yanhui You, Qihao Yu, Xicai Pan, Xinbin Wang, Lei Guo // Permafrost and Periglacial Processes. – 2017. – V. 28. – P. 470–476.
3. Lewkowicz A.G., Way R.G. Extremes of summer climate trigger thousands of thermokarst landslides in a high Arctic environment // Nature Communications. – 2019. – V. 10 (1):1329. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09314-7> (дата обращения 17.04.2020).
4. Ford J.D., McDowell G., Jones J. The state of climate change adaptation in the Arctic // Environmental Research Letters. – 2014. – V. 9 (104005). URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/10/104005> (дата обращения 17.04.2020).
5. Van Huissteden J. Thawing permafrost: permafrost carbon in a warming Arctic. – Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020. – 39 p.
6. СП 36.13330.2012 Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85* (с Изменениями № 1, 2). – М: Стандартинформ, 2019. – 46 с.
7. СП 25.13330.2012 Свод правил «СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». М: Стандартинформ, 2019. – 40 с.
8. СП 21.13330.2012 Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.01.09-91 (с Изменением № 1). – М: Стандартинформ, 2017. – 20 с.
9. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. – М: Стандартинформ, 2018. – 7 с.
10. Shamilov Kh.Sh., Sultanmagomedov S.M. Device for providing design position of underground main pipelines in permafrost soil // Oil and geoecology: abstracts of I International School-seminar of Young Scientists and Students. – Baku: OGI, ANAS, 2018. – P. 131–134.
11. Шамилов Х.Ш., Десяткин Д.П. Особенности проектирования трубопроводов в зонах распространения островной мерзлоты // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2019. – № 3. – С. 24–28.
12. Allen L.J. The Trans-Alaska pipeline. V. 2: South to Valdez. – Seattle: Scribe Publishing Co., 1976 – 11 p.
13. Иваницкая Е.В. Опыт мониторинга уникального трансаляскинского нефтепровода // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2011. – № 1 (1). – С. 96–101.
14. Создание и реализация инновационных технологий строительства в проектах развития нефтепроводной структуры Западной Сибири: проекты «Пурпе–Самотлор», «Заполярье–Пурпе» / Ю.В. Лисин, А.Н. Сапсай, В.И. Суриков, В.В. Павлов, А.Е. Сощенко, В.В. Бондаренко // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2013. – № 4 (12). – С. 6–11.
15. Конструктивные решения термостабилизаторов грунтов и оценка их эффективности для обеспечения твердомерзлого состояния грунтов оснований фундаментов при надземной прокладке трубопровода / А.Н. Сапсай, А.Е. Сощенко, Ю.Б. Михеев, Ю.В. Богатенков, В.В. Бондаренко // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2014. – № 1 (13). – С. 36–41.
16. Shamilov Kh.Sh., Gumerov A.K., Sultanmagomedov S.M. Underground fastening of the trunk pipelines in areas of intermittent and insular permafrost // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – V. 459. – P. 032026. DOI: 10.1088/1755-1315/459/3/032026
17. Определение и прогнозирование напряженно-деформированного состояния трубопровода с учетом грунтовых изменений в процессе эксплуатации / А.К. Гумеров, Р.М. Каримов, Р.М. Аскаров, Х.Ш. Шамилов // Наука и техно-

- логии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – № 10 (4). – С. 372–378.
18. Опора подвесная для участков подземной прокладки трубопроводов: пат. Рос. Федерации, № 2601651, заявл. 15.04.2015; опубл. 10.11.2016. Бюл. № 31.
19. О закреплении подземных магистральных трубопроводов на болотах / Д.А. Гулин, Х.Ш. Шамилов, Р.Р. Хасанов, С.М. Султанмагомедов // Нефтегазовое дело. – 2015. – № 3. – С. 330–345.
20. Chai J.C., Hayashi S., Carter J.P. Vacuum consolidation and its combination with embankment loading // Canadian Geotechnical Journal. – 2006. – V. 43 (10). – P. 985–996.
21. Fioravante V. Load transfer from a raft to a pile with an interposed layer // Géotechnique. – 2010. – V. 61 (2). – P. 121–132.
22. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil / C. Tang, B. Shi, W. Gao, F. Chen, Y. Cai // Geotextiles and Geomembranes. – 2007. – V. 25. – № 3. – P. 194–202.
23. Устройство для обеспечения проектного положения подземного трубопровода при прокладке в условиях многолетнемерзлых грунтов: пат. Рос. Федерации, № 2643914, заявл. 01.12.2016; опубл. 06.02.2018. Бюл. № 4.

Поступила 25.11.2020 г.

Информация об авторах

Шамилов Х.Ш., ассистент кафедры гидрогазодинамики трубопроводных систем и гидромашин Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Султанмагомедов Т.С., ассистент кафедры сооружения и ремонта газонефтепроводов и газонефтехранилищ Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Султанмагомедов С.М., доктор технических наук, декан Факультета трубопроводного транспорта Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 622.692.4.07

DESIGN OF THE SUPPORT FOR UNDERGROUND PIPELINE FASTENING IN CONDITIONS OF INSULAR AND DISCONTINUOUS PERMAFROST ZONES

Khiramagomed Sh. Shamilov¹,
khiramagomed@mail.ru

Timur S. Sultanmagomedov¹,
tsultanmaga@gmail.com

Sultanmagomed M. Sultanmagomedov¹,
ftt2010@mail.ru

¹ Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450064, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to develop the effective technologies to ensure the preservation of the design position of the main pipeline sections in the areas with permafrost distribution. The work is of particular relevance, taking into account active development of the northern and Arctic gas and oil regions of Russia.

The main aim of the research is to develop a design solution and the construction of underground supports for fixing non-heat-insulated sections of the pipeline in seasonally thawing and insular permafrost.

Objects: main pipeline fixed in frozen soils.

Results. The paper considers the existing types of supports and suspensions of pipelines in the context of their applicability for the fixing underground sections of oil and gas pipelines in permafrost and seasonally thawing soils, including at the intersection of insular permafrost, ice lenses and pingos. Based on the results of the analysis of the possible loads and limitations of existing supporting structures of pipelines with the risks of erosion and sagging of underground sections in the melted trench, the design of underground anchor supports is proposed and conclusions are made about the advantages of their use. To calculate the loads and determine the required dimensions and number of anchors, cross-sections of stretch ropes and a mounting clamp, a finite-element model was developed. Its effectiveness was confirmed analytically and experimentally on the developed test bench.

Key words:

Pipeline anchor support, structural design, underground pipelining, intermittent permafrost, seasonal thawing soils, ice lenses, stability.

REFERENCES

1. Chadburn S.E., Burke E., Cox P., Friedlingstein P., Hugelius G., Westermann S. An observation based constraint on permafrost loss as a function of global warming. *Nature Climate Change*, 2017, vol. 7, Iss. 5, pp. 340–344.
2. Yanhui You, Qihao Yu, Xicai Pan, Xinbin Wang, Lei Guo. Geophysical imaging of permafrost and talik configuration beneath a thermokarst lake. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2017, vol. 28, pp. 470–476.
3. Lewkowicz A.G., Way R.G. Extremes of summer climate trigger thousands of thermokarst landslides in a high Arctic environment. *Nature Communications*, 2019, vol. 10 (1):1329. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09314-7> (accessed 17 April 2020).
4. Ford J.D., McDowell G., Jones J. The state of climate change adaptation in the Arctic. *Environmental Research Letters*, 2014, vol. 9 (104005). Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/10/104005> (accessed 17 April 2020).
5. Van Huissteden J. *Thawing permafrost: permafrost carbon in a warming Arctic*. Cham, Springer Nature Switzerland AG, 2020. 39 p.
6. SP 36.13330.2012 *Magistralnye truboprovody. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.05.06-85** (s Izmeneniyami No 1, 2) [SP 36.13330.2012 Main pipelines. Updated version of SN&P 2.05.06-85 * (with amendments No. 1, 2)]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 46 p.
7. SP 25.13330.2012 *Svod pravil «SNiP 2.02.04-88. Osnovaniya i fundamenti na vechnomerzlykh gruntakh»* [SP 25.13330.2012 Code of practice «SNiP 2.02.04-88. Foundations on permafrost»]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 40 p.
8. SP 21.13330.2012 *Zdaniya i sooruzheniya na podrabatyvayemykh territoriyakh i prosadochnykh gruntakh. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.09-91* (s Izmeneniem No 1) [SP 21.13330.2012 Buildings and structures in the developed areas and subsidence soils. The updated version of SN&P 2.01.09-91 (with amendment No. 1)]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 20 p.
9. GOST 25100-2011. *Grunty. Klassifikatsiya* [State Standard 25100-2011. Soils. Classification]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 7 p.
10. Shamilov Kh.Sh., Sultanmagomedov S.M. Device for providing design position of underground main pipelines in permafrost soil. *Proc. of I International School-seminar of Young Scientists and Students*. Baku, 2018. pp. 131–134.
11. Shamilov Kh.Sh., Desyatkin D.P. Designing pipelines in zones of intermittent and insular permafrost. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*, 2019, vol. 3, pp. 24–28. In Rus.
12. Allen L.J. *The Trans-Alaska pipeline. Vol 2: South to Valdez*. Seattle, Scribe Publishing Co., 1976. 11 p.
13. Ivanitskaya E.V. The experience of monitoring a unique Trans-Alaskan oil pipeline. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov*, 2011, vol. 1 (1), pp. 96–101. In Rus.
14. Lisin Yu.V., Sapsay A.N., Surikov V.I., Pavlov V.V., Soshchenko A.E., Bondarenko V.V. Creation and implementation of innovative construction technologies in projects for the development of the oil pipeline structure in Western Siberia: Purpe-Samotlor and Polar-Purpe projects. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov*, 2013, vol. 4 (12), pp. 6–11. In Rus.
15. Sapsay A.N., Soshchenko A.E., Mikheev Yu.B., Bogatenkov Yu.V., Bondarenko V.V. Constructive solutions of soil thermal stabilizers and evaluation of their effectiveness to ensure the frozen state of soils of the foundations for above-ground pipeline laying. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov*, 2014, vol. 1 (13), pp. 36–41. In Rus.
16. Shamilov Kh.Sh., Gumerov A.K., Sultanmagomedov S.M. Underground fastening of the trunk pipelines in areas of intermittent and insular permafrost. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 459, pp. 032026. DOI: 10.1088/1755-1315/459/3/032026

17. Gumerov A.K., Karimov R.M., Askarov R.M., Shamilov Kh.Sh. Determination and prediction of the stress-strain state of pipeline, taking into account soil changes during operation. *Science & technologies: oil and oil products*, 2020, vol. 10, no. 4, pp. 372–378.
18. Revel-Muroz P.A., Lisin Yu.V., Soshchenko A., Bronennikov V.A., Bondarenko V.V., Surikov V.I., Mikheyev Yu.B., Shonin K.S. *Opora podvesnaya dlya uchastkov podzemnoy prokladki truboprovodov* [Suspension support for underground pipelines]. Patent RF, no. 2601651, 2016.
19. Gulin D.A., Shamilov Kh.Sh., Khasanov R.R., Sultanmagomedov S.M. About fixing underground trunk pipelines in swamps. *Neftegazovoye delo*, 2015, vol. 3, pp. 330–345. In Rus.
20. Chai J.C., Hayashi S., Carter J.P. Vacuum consolidation and its combination with embankment loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, vol. 43 (10), pp. 985–996.
21. Fioravante V. Load transfer from a raft to a pile with an interposed layer. *Géotechnique*, 2010, vol. 61 (2), pp. 121–132.
22. Tang C., Shi B., Gao W., Chen F., Cai Y. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, vol. 25, no. 3, pp. 194–202.
23. Shamilov Kh.Sh., Sultanmagomedov S.M., Khasanov R.R., Sultanmagomedov T.S., Gulin D.A. *Ustroystvo dlya obespecheniya proektnogo polozeniya podzemnogo truboprovoda pri prokladke v usloviyah mnogoletnemerzlykh grunfov* [A device for ensuring the design position of an underground pipeline when laying in permafrost soils]. Patent RF, no. 2643914, 2018.

Received: 25 November 2020.

Information about the authors

Khiramagomed Sh. Shamilov, assistant, Ufa State Petroleum Technological University.

Timur S. Sultanmagomedov, assistant, Ufa State Petroleum Technological University.

Sultanmagomed M. Sultanmagomedov, Dr. Sc., Dean of the Faculty of Pipeline Engineering, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 550.8.012

МЕТОД РЕГИОНАЛЬНОГО ПРОГНОЗА НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ АЛГОРИТМАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ТЮМЕНСКОЙ СВИТЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Ивлев Дмитрий Александрович,
dm.ivlev@gmail.com

Бристольский университет,
Великобритания, BS8 1SE, Клифтон, Бристоль, Куинс-Роуд, Бикон-Хаус.

Актуальность исследования обусловлена сокращением фонда структурных ловушек и необходимостью расширения ресурсной базы углеводородов за счет повышения эффективности поиска и разведки месторождений в сложнопостроенных залежах нефти и газа.

Цель: на примере прогноза нефтегазоносности территории исследования показать методику прогноза и набор применяемых технологических решений и алгоритмов.

Объект: отложения средней юры (тюменская свита) Западной Сибири в пределах района (700×900 км), включающего в себя части Ямalo-Ненецкого и Ханты-Мансийского административных округов и Томской области.

Методы. С помощью алгоритмов машинного обучения и комплексирования технологического набора методов (геоинформатики, бассейнового моделирования, экспертных оценок) показаны следующие этапы реализации методики прогноза: 1) генерирование признакового пространства изучаемой территории на основе повышения пространственного разрешения структурных построений с применением алгоритмов генеративно-состязательной архитектуры нейронных сетей, где в качестве эталонных участков использованы результаты сейсморазведки 3D; 2) отбор признаков статистическим методом и методами машинного обучения; 3) создание подмножества моделей прогноза на основе градиентного бустинга над решающими деревьями; 4) объединение их в метамодель путем стекового обобщения логистической регрессией.

Результаты. Формализован и апробирован подход к региональному прогнозу. Сделан прогноз вероятности нефтегазоносности тюменской свиты на изучаемой территории. На его основе и информации по открытым месторождениям оценена методом Монте-Карло ресурсная база УВ. Результаты представлены в виде суммарной таблицы геологических и извлекаемых ресурсов для вероятностей P10, P50, P90 в сравнении с категориями запасов ABC₁ и ABC_{1+C₂} месторождений, числящихся на государственном балансе на территории исследования. В качестве примера приведены графические материалы результатов: работы алгоритма повышения пространственного разрешения; моделирования осадконакопления; моделирования миграции УВ; карта прогноза перспектив нефтегазоносности для северной части Надымского и Пуревского нефтегазовых районов.

Ключевые слова:

Тюменская свита, средняя юра, машинное обучение, искусственный интеллект, генерация признаков, выбор признаков, градиентный бустинг, генеративно-состязательные нейросети, региональный прогноз нефтегазоносности, вероятность геологического успеха, сырьевая база УВ, геоинформатика, бассейновое моделирование, моделирование осадконакопления, моделирование миграции УВ.

Введение

В традиционных нефтегазовых провинциях РФ на большинстве антиклинальных структур завершены испытанием скважин поисковые работы. Этап открытия крупных месторождений пройден, и основные перспективы по наращиванию ресурсной базы связаны с открытием новых месторождений с мелкими сложнопостроенными залежами УВ.

Относительно высокая степень изученности бурением скважин и сейсморазведочными работами определенной части крупных нефтегазовых регионов и текущий уровень развития технологии анализа данных и машинного обучения позволяют перейти на другой масштаб качественного прогноза нефтегазоносности территорий.

Методика прогноза нефтегазоносности методами машинного обучения имеет богатое прошлое в отечественной геологической науке. Уже в 70-е гг. XX в. с помощью методов машинного обучения (в терминологии того периода – методы распознавания образов) сделаны прогнозы перспективности нефтегазоносности земель для крупных нефтегазовых провинций

[1, 2]. Впоследствии данный подход получил развитие в работах отечественных ученых и был включен в руководства прогнозирования нефтегазоносности как один из математических методов [3].

Предлагаемый в работе подход (рис. 1) является частным случаем в математических методах количественной оценки ресурсов нефти и газа с основой на методах бинарной классификации с учителем. Однако в контексте классификации методов предлагаемый подход скорее является гибридным, так как может использовать в качестве предикторов любой пространственный признак (атрибут) изучаемой территории, генерируемый самыми разными методами: геологической аналогией, объемно-статистическими, объемно-генетическими, вероятностно-статистическими, экспертными и др.

Цель работы – на примере прогноза нефтегазоносности отложений средней юры (тюменская свита) Западной Сибири в пределах района площадью 700×900 км, расположенного на территориях Ямalo-Ненецкого, Ханты-Мансийского административных округов и Томской области, показать методику прогноза и набор применяемых технологических решений.

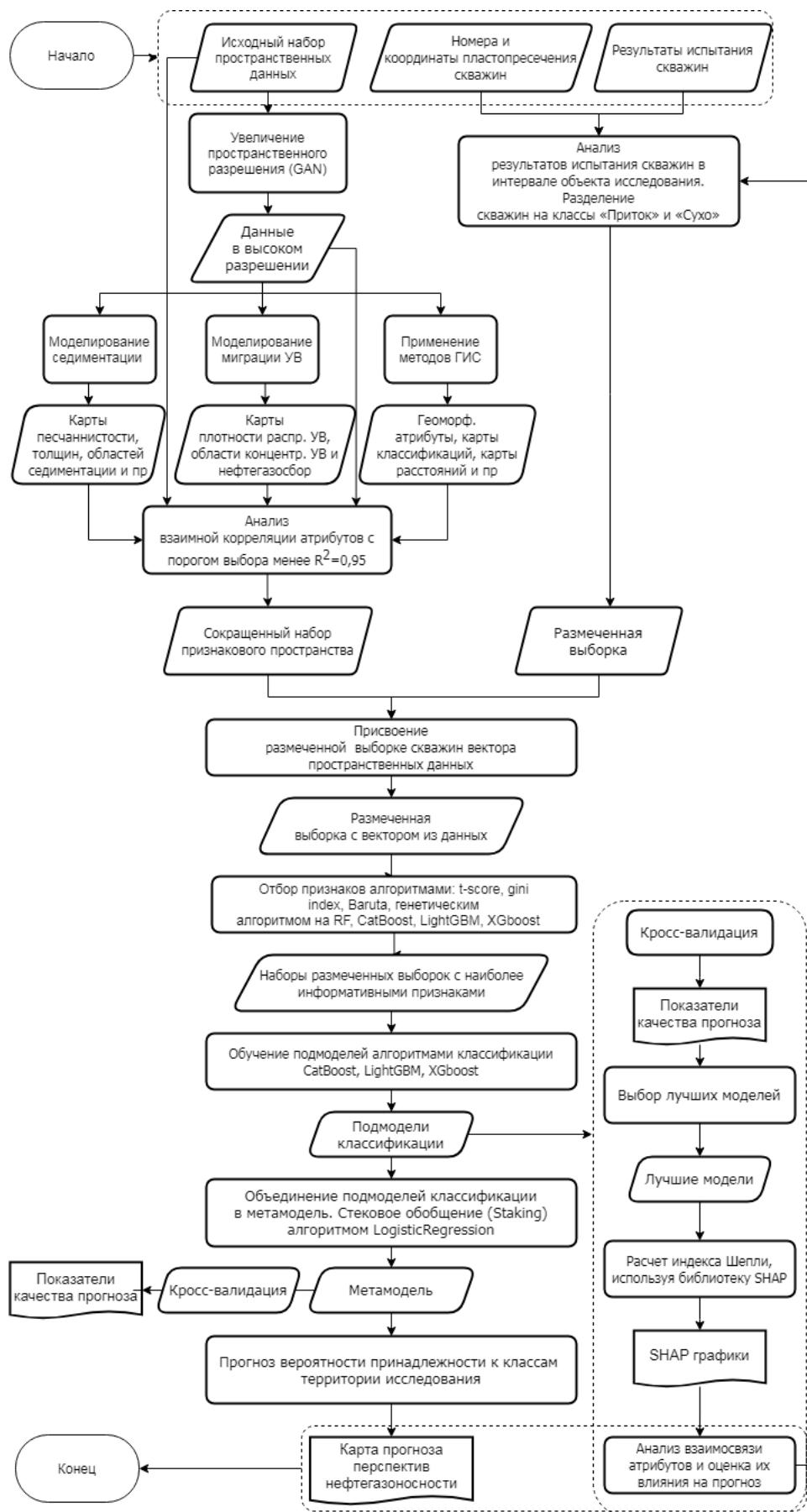


Рис. 1. Алгоритм прогноза перспектив нефтегазоносности территорий

Fig. 1. Algorithm for forecasting the prospects for oil and gas potential of territories

Текущая добыча углеводородов из тюменской свиты относительно общей для Западной Сибири не значительна, но в перспективе десятилетия ее объем будет увеличиваться в связи с истощением месторождений в меловых продуктивных горизонтах, а практическая важность поиска и разведки на объектах средней юры, с целью компенсации выпадающих объемов, значительно возрастет.

Объект исследования – средняя юра (тюменская свита), в стратиграфических региональных схемах подразделяется на нижнюю, среднюю и верхнюю подсвиты.

Формирование среднеюрских отложений происходило в условиях континентального и переходного режима седиментации за счет заполнения впадин осадками и размыва древних выступов фундамента, что приводило к выравниванию палеорельефа. В конце средней юры континентальный режим сменился морским. Пласти тюменской свиты (Ю_{2-9}) характеризуются резкой фациальной изменчивостью в пространстве и литологической неоднородностью по разрезу [4].

В рамках методики исследования [5] сформирована обучающая выборка из 8791 скважины, которая была разделена на два класса по результатам испытания в интервале тюменской свиты. В класс «приток» отнесено 3079 скважин, в класс «сухо» – 5712.

Атрибуты пространственных данных разделены на исходные и производные. Исходные значения пространственных параметров получены в ходе непосредственного замера, интерпретации, экспертной оценки. Производные сгенерировались на основе исходных данных в процессе конструирования признаков. Исходные значения разделяются на числовые и категориальные. В качестве числовых атрибутов использованы: значения гравитационных и магнитных аномалий; структурные построения по основным стратиграфическим горизонтам; карты изопахит; за картированные крупные тектонические разломы, ли неаменты. Исходные категориальные атрибуты – оцифрованные экспертные оценки территории и палеогеографические реконструкции, деления территории на области и районы нефтегазоносности, фациальное районирование. Последний вид атрибутов использовался в обучении в авторском, неизменном, виде.

Производные параметры генерировались в процессе конструирования признаков (features engineering). Конструирование признаков – это процесс использования предметной области данных для создания признаков, которые применяются для обучения алгоритмов и являются фундаментом для практического приложения машинного обучения [6].

Конструирование признаков

В работе применен ряд подходов к конструированию признакового пространства с использованием первичных числовых атрибутов. Использованы методы из геоинформатики, геоморфологии, машинного обучения для повышения пространственного разрешения данных, бассейнового моделирования, кластеризации (рис. 1).

Технология повышения пространственного разрешения данных в предлагаемой методике является основой для дальнейшего конструирования признакового пространства.

Плотность сейсмических профилей и количество скважин на части исследуемой территории изменяется значительно. Выделяются области, покрытые редкой сеткой профилей 2D (участки Приуральского, Шуришско-кальского, Надымского районов), и территории, детально изученные сейсморазведочными работами 3D (участки Сургутского, Нижневартовского районов). Неравномерно меняется и детализация структурных построений. Для увеличения детализации структурных построений применен подход на основе генеративно-состязательных сетей в его частной реализации: повышение разрешения изображений (Super Resolution – SR).

Генеративно-состязательные сети (Generative adversarial network – GAN) – алгоритм машинного обучения без учителя, построенный на комбинации из двух нейронных сетей, одна из которых (генеративная сеть) генерирует образцы, а другая (дискриминационная сеть) старается отличить правильные («подлинные») образцы от неправильных. Генеративная и дискриминационная нейронные сети имеют противоположные цели – создать образцы и отбраковать образцы, между ними возникает антагонистическая игра [7, 8].

Для реализации модифицированного GAN алгоритма [9] были использованы эталонные участки, покрытые сейсморазведкой 3D. На генеративную нейронную сеть подавались деградированные данные 3D до средней разрешающей детализации сейсморазведки 2D. Задачей дискриминационной нейронной сети было, анализируя образцы эталонные (сейсморазведки 3D) и сгенерированные, дать оценку качества и методом обратного распространения ошибки улучшить качество генерации, изменив набор латентных параметров. В итоге состязания двух нейросетей генеративная сеть училась справляться с задачей генерации исходного качества 3D из псевдо 2D данных сейсморазведки с учетом специфики оценки и обратного распространения ошибки для реализации алгоритмов SR. В качестве аналогии этого процесса можно представить вместо нейронной сети геолога, который на протяжении многих лет картирует определенную территорию и видел множество раз, как менялись структурные построения от данных сейсморазведки 2D к 3D, и на интуитивном уровне начинает понимать паттерны изменения, к примеру, что пологий структурный нос на карте, созданной по редкой сетке 2D сейсмопрофилей, является серией кулисообразно сочленённых валов. Подобная «интуиция» в настоящем исследовании была сформирована у генеративно-состязательной нейронной сети за 1344 часа непрерывного обучения на графическом процессоре.

По результатам работы алгоритма и объединения лучших экземпляров генеративной нейронной сети получены структурные построения с детализацией псевдо 3D по всей изучаемой территории. На рис. 2 в качестве примера приведены карты до и после работы алгоритма. Дальнейшее конструирование признаков проводилось на новых структурных построениях.

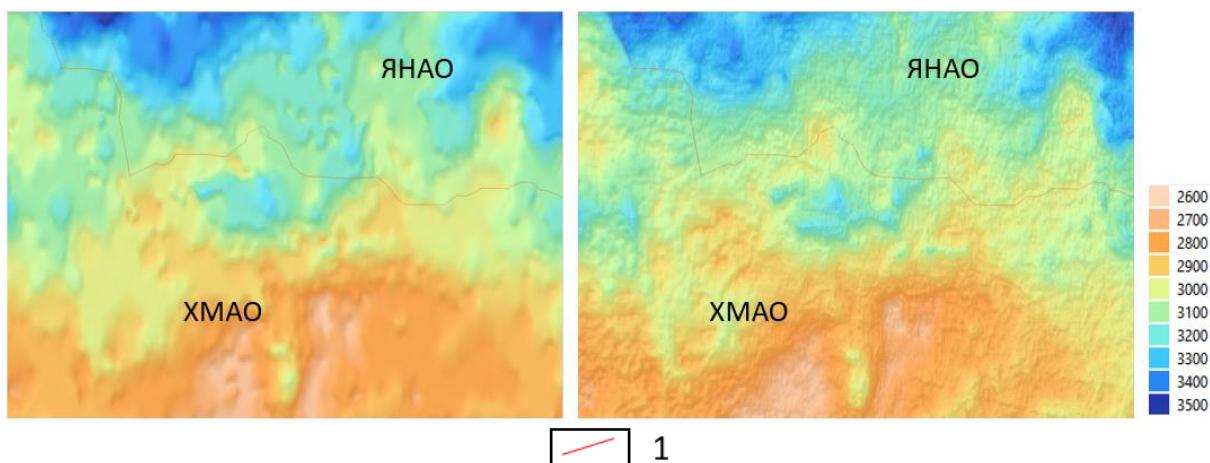


Рис. 2. Визуальное сравнение структурных построений по кровле баженовской свиты. Слева показана исходная карта, справа – после работы алгоритма повышения разрешения изображения: 1 – граница административного деления ХМАО, ЯНАО

Fig. 2. Visual comparison of structural maps, on the left is the original map, on the right – after the algorithm for increasing the image resolution: 1 – border of the administrative division of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug

На следующем этапе сгенерированы признаки, базирующиеся на методологии объемно-генетического метода – бассейнового моделирова-

ния: моделирование седиментации осадочного вещества (OB) и моделирование миграции углеводородного вещества (УВ).

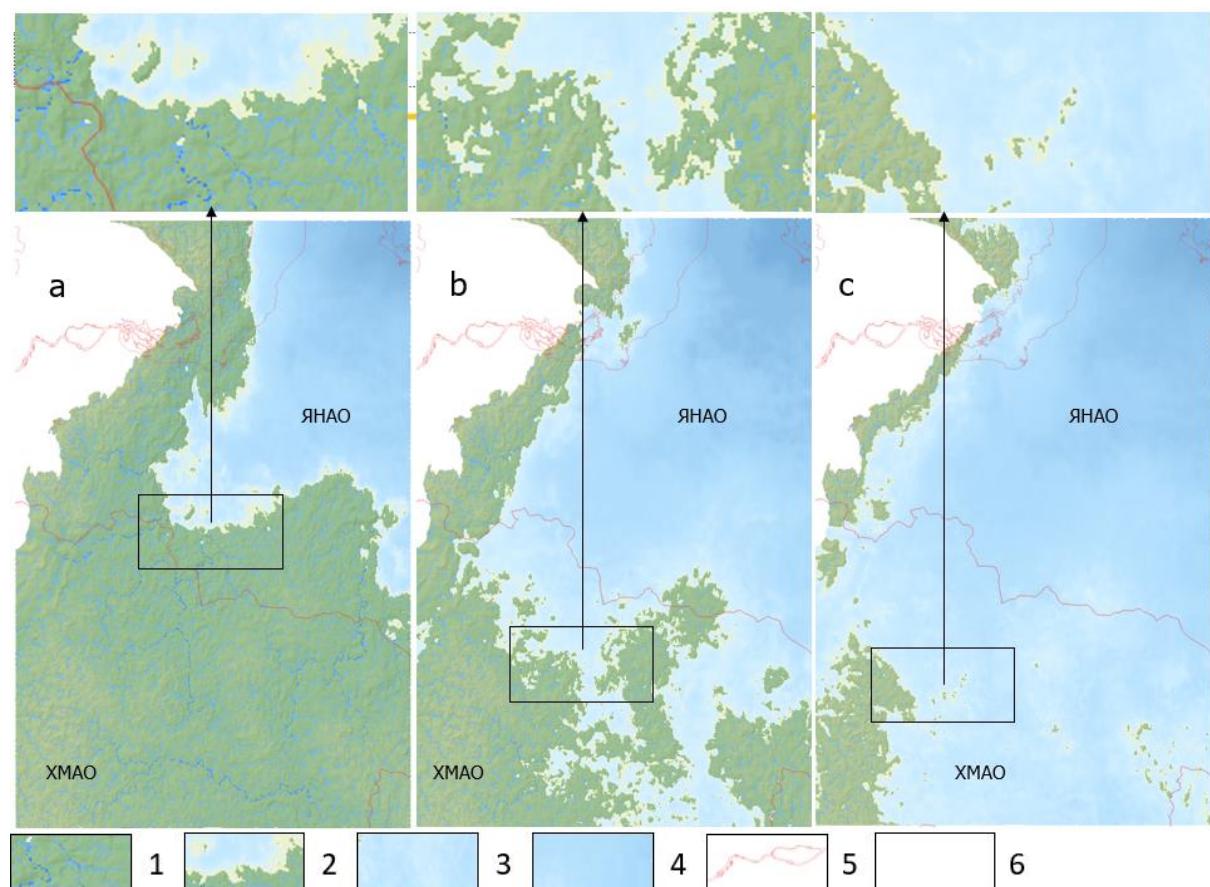


Рис. 3. Пример одной из моделей палеореконструкции трансгрессии моря: 1 – суши с гидросетью; 2 – береговая линия; 3 – мелководье; 4 – море; 5 – границы административных областей и современная береговая линия; 6 – отсутствие данных; серия схем последовательной трансгрессии: а) поздний-плисбах; б) бафт; в) оксфорд

Fig. 3. Example of one of the models of paleoreconstruction of the sea transgression: 1 – land with a hydraulic network; 2 – coastline; 3 – shallow water; 4 – sea; 5 – boundaries of administrative regions and the modern coastline; 6 – lack of data; a series of sequential transgression schemes: a) late-plisbach; b) baft; c) oxford

Созданы модели седиментации для основных стратиграфических единиц изучаемого объекта. С помощью симуляционных гидрологических моделей [10] воссозданы системы палеорек с учетом палеоландшафта и различного положения морской береговой линии [11]. На основе моделирования осадконакопления и эрозии рельефа, со стохастическим распределением начальных условий седиментации, сгенерированы серии карт песчаных и глинистых тел в заданных граничных условиях палеореконструкций на базе экспертных гипотез [12, 13]. Настройка моделей проводилась на опорный фонд скважин с известными значениями толщин. В качестве примера реализации моделирования приведены схемы палеореконструкции части бат-келловской трансгрессии в Западной Сибири (рис. 3). В целом модели повторяли схемы палеореконструкции прошлых лет [12, 13], но имели детализированные стохастические свойства распределения фаций. В общей сложности для дальнейшей работы принято

более 250 реализаций карт распределения фаций, созданных за счет вариаций входных параметров моделирования процесса седиментации.

Региональное моделирование миграции УВ осуществлялось только с учетом ее латеральной составляющей на базе полученных моделей седиментации, структурных моделей и карт изопахит, приуроченных к времени формирования коллекторов и миграции УВ. Начальные граничные условия задавались на базе стохастического распределения параметров моделей согласно экспертным оценкам и варьировались в широком диапазоне [14–16]. В качестве примера приведены карты областей нефтегазосбора, а также векторов и плотности потока миграции в зависимости от начальных условий (рис. 4). Получено более 500 вариантов реализаций моделей нефтегазонакопления в зависимости от входных параметров. Эти модели можно разделить на три типа по масштабу миграции УВ: локальная, глобальная и миграция промежуточного типа.

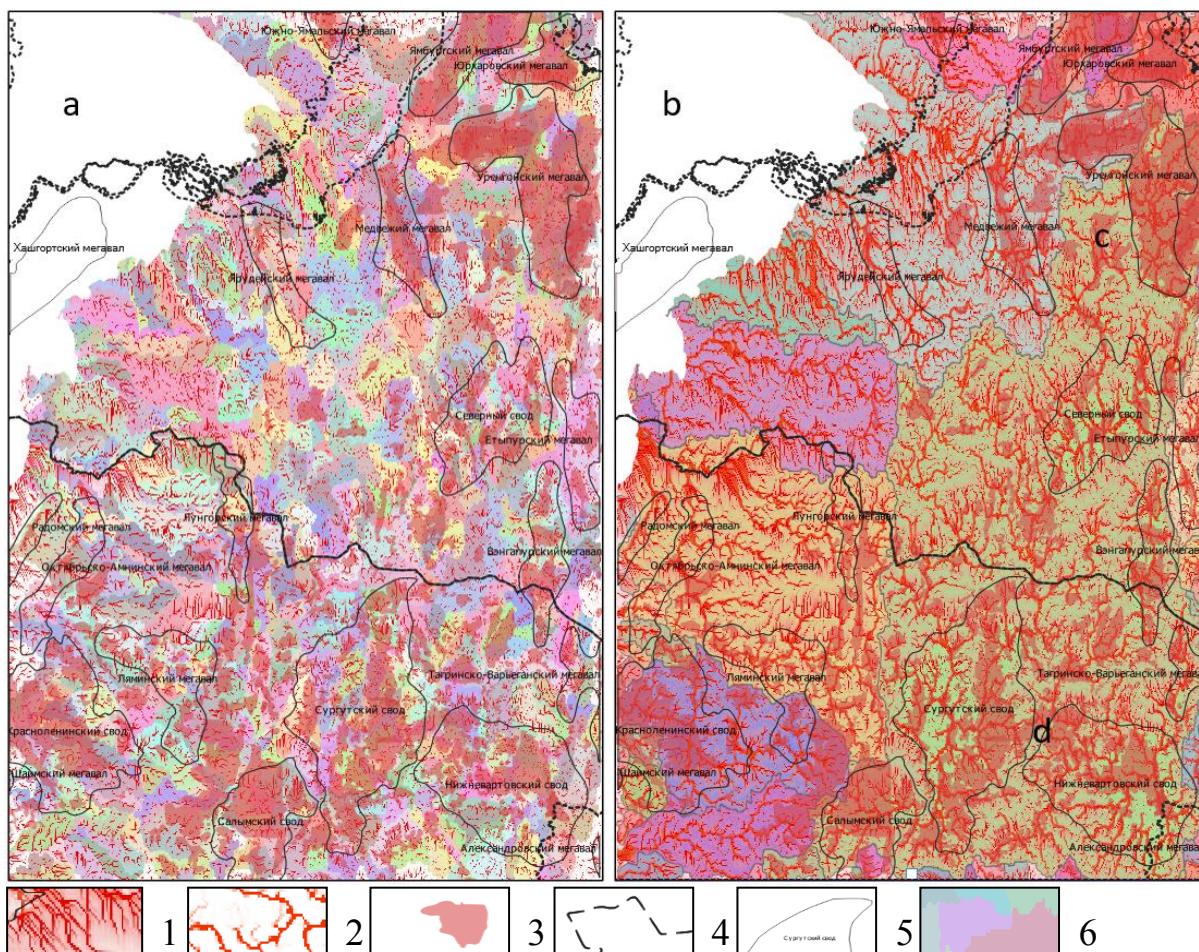


Рис. 4. Пример результатов моделирования миграции углеводородов: 1 – векторы миграции в области концентрации углеводородов; 2 – крупные потоки углеводородов по типу «руслы»; 3 – области нефтегазосбора и месторождения; виды миграции: а) местная; б) глобальная; положение крупных потоков углеводородов в областях нефтегазосбора: в) исток; г) место концентрации; 4 – административные границы; 5 – границы крупных тектонических элементов; 6 – области нефтегазосбора

Fig. 4. Example of the results of modeling of hydrocarbon migration: 1 – migration vectors in the area of hydrocarbon concentration; 2 – large hydrocarbon flows by the «channel» type; 3 – oil and gas catchment areas and deposits; types of migration: a) local; b) global; position of large hydrocarbon flows in the oil and gas catchment areas: c) source; d) place of concentration; 4 – administrative boundaries; 5 – boundaries of large tectonic elements; 6 – oil and gas catchment areas

Наибольшее количество реализаций моделей было связано с локальной миграцией УВ, однако при определенных начальных заданных параметрах миграция приобретала промежуточный или глобальный масштаб (рис. 4, *b*), что приводило к формированию потоков с характерными «русловыми» признаками концентрации и миграции УВ. Так, для одной из моделей (рис. 4, *b*) истоком «руслы» служила область в районе юга Уренгойского мегавала (рис. 4, *c*), а местом впадения – области глобальной концентрации в районе Сургутского свода и Нижневартовского свода (рис. 4, *d*).

Стоит отметить, что особенностью предлагаемого подхода (рис. 1) является отсутствие необходимости выбора «правильного» признака (модели, карты и пр.) для дальнейшего анализа: каждый признак, несущий информацию об изучаемом объекте исследования, может быть использован для разделения обучающей выборки на классы в многомерном признаковом пространстве, его значение для прогноза определяется эмпирически – по степени его эффективности для задачи классификации. Ограничение для генерации признаков связано с последующей интерпретируемостью моделей.

С помощью методов геоинформатики (LS-Factor, Downslope distance gradient, Slope, Aspect, Profile & Plan Curvature, Based Landform Classification и пр.), широко применяющихся в задачах анализа цифровых моделей рельефа дневной поверхности, снято 1511 числовых и категориальных атрибутов с основных структурных планов горизонтов, карт изопахит, магнитных и гравитационных аномалий. Построены карты расстояний до ближайших линеаментов, крупных тектонических разломов и специфических геоморфометрических точек изучаемого пространства (ближайшие максимальные и минимальные отметки в заданных окнах, границы разделов и др.). На основе карт с числовыми признаками были созданы категориальные, с помощью алгоритма K-мeан, с классификацией пространства на следующее количество кластеров: 3, 5, 8, 13, 21.

Отбор признаков

После процедуры конструирования признаков пространства проведена процедура отбора (features selection). Целью отбора является редукция гиперпространства признаков для более эффективного его разделения классификаторами машинного обучения (снижение «проклятия размерности») [17]. Отбор осуществлялся алгоритмами на основе статистики и машинного обучения с учителем. Статистический метод был применен ко всему набору пространственных данных. Из признакового пространства были отсеяны признаки с квадратичным коэффициентом корреляции Пирсона более 0,95. По итогам этой процедуры каждую точку исследуемого пространства характеризовал вектор из 5242 признаков.

Для отбора признаков с использованием методов обучения с учителем полученная векторная характеристика пространства была присвоена каждой скважине согласно ее пространственному положению. Далее эта размеченная выборка подавалась на вход следующим

алгоритмам отбора: T-Score, Gini Index, Gain Ratio, Baruta, генетическая селекция на RandomForest, CatBoost, LightGBM, XGBoost. Все модели отбора признаков проверялись на чувствительность к «шуму». К набору данных (вектору) из категориальных и численных признаков пространства добавлялись случайные значения. В данной работе использованы параметры, снятые с наложенной на территорию с различным смещением карты температуры реликтового излучения по результатам работы телескопа Планка. Так, если бы модель при отборе признаков с заданным генератором псевдослучайных чисел (seed=137) произвела выбор «шумящих» признаков как значимых, вся выборка признаков этой модели была бы исключена из дальнейшего исследования. Все предложенные алгоритмы отбора с учителем «проигнорировали» «шумные» признаки. Итогом работы алгоритмов стал набор отличающихся между собой выборок с наиболее информативными, по «мнению» алгоритмов, признаками для дальнейшей классификации.

В качестве алгоритма машинного обучения с целью прогноза перспектив нефтегазоносности был выбран градиентный бустинг над решающими деревьями в его частных реализациях CatBoost, LightGBM и XGBoost. На текущий момент этот класс алгоритмов является зарекомендовавшим себя на практике стандартом для обучения классификаторов на разнородном наборе числовых и категориальных признаков.

Каждый набор отобранных признаков разделялся на обучающую и тестовую выборку в разных пропорциях. Для контроля обучения использовалась метрика F1-score на тестовой выборке. F1-score достигает максимума при полноте и точности прогноза, равного единице, и близка к нулю, если один из аргументов близок к нулю [18]. Оценка качества предсказательной силы моделей велась методом кросс-валидации на 8 подвыборках (folds), со стратификацией выборок по соотношению классов.

С учетом разной настройки гиперпараметров для выбранных алгоритмов и входных наборов данных, сформированных на этапе отбора признаков, обучено 68 моделей со следующими лучшими показателями качества, достигнутыми при обучении (табл. 1).

Таблица 1. Оценка качества моделей с разными метриками

Table 1. Assessment of the quality of models with different metrics

Метрика/Модель Metric/Model	CatBoost	LightGBM	XGBoost
F1	0,87332	0,87013	0,8697
AUC	0,94626	0,94401	0,94041
CA	0,87549	0,86985	0,86898

Анализ и интерпретация результатов машинного обучения

Лучшие по метрикам модели обучения могут быть выбраны для интерпретации. В качестве примера показаны возможности аналитики с использованием библиотеки SHAP. Для каждого признака рассчитывался вектор Шепли на основе теории игр, с оценкой важности для прогноза, путем включения и выключения его из обучающей выборки [19].

По итогам обучения лучшей модели в качестве примера показаны следующие средства визуализации, входящие в библиотеку SHAP: сводный график важности признаков, график взаимосвязей признаков, график влияния признаков на конкретный случай (рис. 5–7).

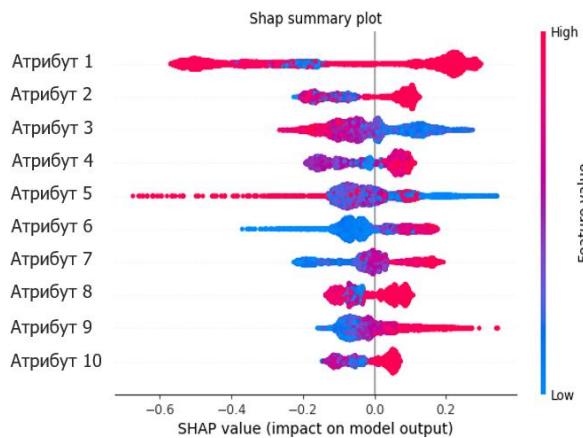


Рис. 5. Сводный график важности признаков для классификации

Fig. 5. Summary graph of the importance of features for classification

Сводный график важности признаков создает представление о том, какие признаки наиболее важны, и диапазон их влияния на модель (рис. 5). Чем выше находится признак в вертикальном списке, тем больше его интегральное влияние на модель. Слева от базовой линии, проведенной через ноль на нижней шкале влияния, располагаются значения от нормированного на ноль индекса Шепли – признака в виде точек, влияющих на категорию класса «сухо» – левая часть графика, и «приток» – правая его часть. Концентрация точек показывает количество значений с этим параметром. Цветом закодировано изменение

числового значения признака: чем краснее точки, тем выше значение. На графике интерес представляют признаки с наибольшим интегральным влиянием на модель и четким разделением по цвету базовой линией. Важными признаками для всех обученных моделей стали следующие характеристики пространства: принадлежность к нефтегазовому району, принадлежность к фациальной зоне, прогнозные температуры на кровле баженовской свиты, расстояние до ближайшего крупного тектонического элемента, связанная песчанистость тюменской свиты, производные от аномалий гравитационного поля.

В качестве примера на рис. 5 переведен результат расчета индекса Шепли для одной из 68 моделей с лучшими показателями качества (табл. 1). Из 2111 признаков пространства показаны 10, оказывающих максимальное влияние на прогноз, – это атрибуты под номерами:

- 1) принадлежности к нефтегазовому району;
- 2) фациальная принадлежность района согласно палеореконструкции Батского времени;
- 3) связанная песчанистость тюменской свиты;
- 4) принадлежность к бассейну нефтегазоносности при средних настройках миграции УВ;
- 5) плотность потока миграции углеводородов;
- 6) экспозиция значений гравитационных аномалий в редукции Буге;
- 7) прогнозная температура в кровле баженовской свиты;
- 8) принадлежность к кластеру (алгоритмом K-mean выделен 21 кластер на структурной поверхности по кровле баженовской свиты);
- 9) расстояние до ближайшего крупного тектонического элемента;
- 10) вертикальное расстояние до базового уровня сети каналов по структурной поверхности кровли фундамента.

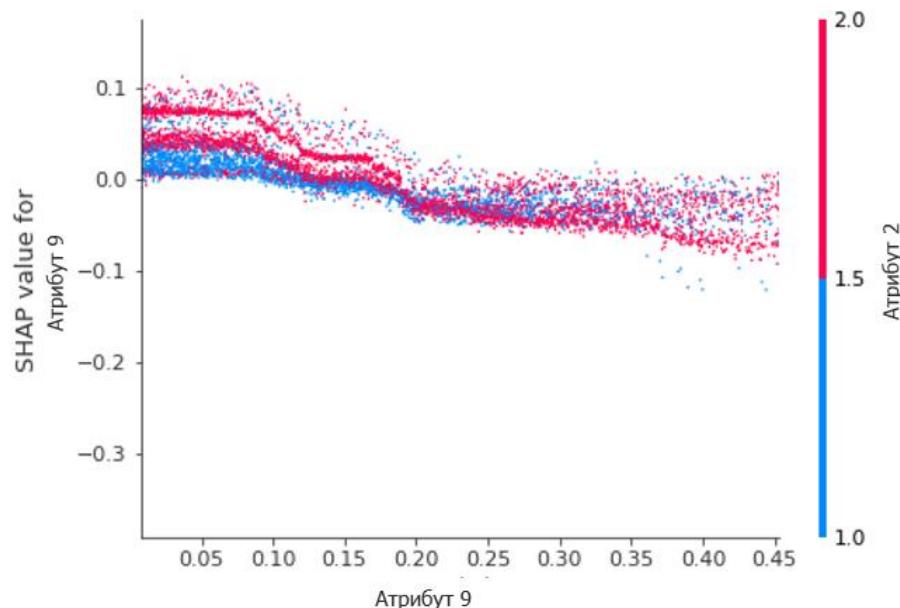


Рис. 6. График влияния на предсказание отдельного признака

Fig. 6. Graph of influence on prediction of a single feature

Влияние отдельного признака на модель визуализируется на графике взаимосвязью признаков (рис. 6). По оси абсцисс откладывается значение признака, по оси ординат – индекс Шепли. Чем выше индекс, тем

более «уверенно» модель прогнозирует класс «приток». Цветом кодируются значения другого признака (атрибут 2), с которым основной отображаемый признак имеет наибольшее взаимодействие при прогнозе.

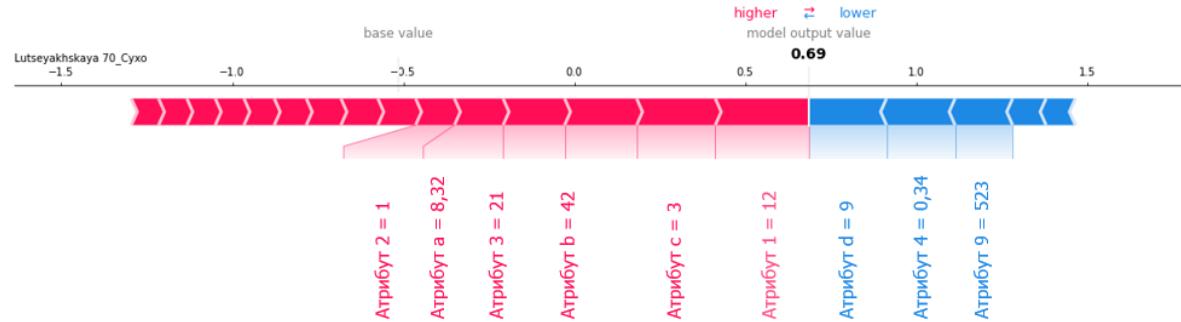


Рис. 7. График влияния признаков на конкретный случай
Fig. 7. Graph of influence of features on a specific case

В примере (рис. 6) чем меньше в градусах расстояние до ближайшего крупного тектонического элемента (атрибут 9), тем выше индекс Шепли и больше вероятность нефтегазоносности территории, в то же время, если территория находилась в баткое время в мелководной части с индексом 2 (красные точки), эта тенденция усиливается. При увеличении расстояния происходит инверсия, и уже более глубоководная область с индексом 1 (синие точки) увеличивает индекс Шепли. Однако в целом тенденция сохраняется: чем дальше от крупного тектонического элемента, тем меньше индекс Шепли.

График влияния признаков для конкретного случая может быть построен для каждой классифицируемой точки пространства, но в данном исследовании имеет смысл визуализировать прогноз для точек местонахождения скважин с известным исходом испытания, для сравнения факта и предсказания (рис. 7). Степень отклонения от порогового значения индекса Шепли, рассчитанного для скважины, показывает «уверенность» модели в классификации – чем правее и, соответственно, больше индекс относительно базового, тем модель более «уверена» в принадлежности ее к классу «приток». Длиной и близостью к порогу, а также цветом показана степень влияния признака на данную классификацию. Красным выделены признаки, «склоняющие» модель к классу «приток», синим – к классу «сухо». Иногда интерес представляют скважины, на которых модель ошиблась в классификации с высокой степенью «уверенности», эти случаи желательно рассматривать более детально, изучая дело скважины, анализируя нюансы испытания, показания станции ГТИ при бурении, описание керна, возможно, потребуется уточнение интерпретации каротажного материала. После детального анализа в ряде случаев выявлена некорректная исходная классификация скважин по результатам испытания как «сухих». Продуктивный объект был пропущен в ходе апробации продуктивных интервалов, или само испытание было некондиционное, в то время как ГИС и высокие газопоказания ГТС свидетельствовали о наличии продуктивного интервала.

В качестве примера приведен полученный результат на той же модели для скважины 70Р Луцеяского месторождения нефти. Помимо влияния атрибутов из первых десяти под номерами 2, 3, 4, 9, на прогноз оказывают влияния следующие атрибуты: а) мультиразрешающий индекс плоскости дна долины, снятый с карты общей толщины юрских отложений; б) стандартное отклонение от осреднённой поверхности общей толщины юрских отложений с окном снятия 40 км²; в) фациальная принадлежность согласно палеореконструкции Малышевского горизонта.

Значение атрибутов под индексами 1, с, б, 3, а, 2 увеличивают вероятность принадлежности скважины к классу «приток», в то же время значения атрибут под индексами д, 4, 9 снижают эту вероятность. Интегральный показатель индекса Шепли (вклада) каждого атрибута – 0,69, что выше порогового значения – 0,5. Таким образом, согласно модели, в данной скважине с высокой вероятностью тюменская свита нефтегазоносная. Однако по результату испытания притока получено не было, и скважина была отнесена в обучающей выборке к классу «сухо».

Анализ дела скважины и актов испытания показал значительное поглощение бурового раствора до 420 м³ при бурении в интервале тюменской свиты. После спуска хвостовика 127 мм и перфорации интервалов Ю₈, Ю₇, Ю₄ и Ю₃ общим погонным метражом 38 м зарядами ЗПРК-42С-01 после промывки (80 м³) проведено испытание продуктивных горизонтов единым объектом, методом снижения уровня технической жидкости в колонне с помощью сваба за несколько рейсов до глубины 1870 м при глубине верхних дыр перфорации 3516 м. За период испытания откачано 40 м³ технической воды без признаков УВ, общее время освоения составило 28 часов. Согласно заключению по результатам геофизических исследований пористость в перфорированных залежах – от 0,08 до 0,16 д.е. В шламе при проходке средней юры отмечались признаки УВ. Учитывая совокупность факторов, скважина не была освоена, испытание не было кондиционным, данный интервал рекомендуеться к переиспытанию.

Проблема исходной классификации скважин по результатам испытания является существенной для всех методов прогноза нефтегазоносности, однако в данном методе ошибки модели на основе глобальных и локальных выявленных закономерностей могут быть использованы для последующей ее донастройки или корректировки разметки обучающей выборки.

Аналитическая работа с графиками библиотеки SHAP позволяет раскрыть полученные моделью взаимосвязи между пространственными признаками и их влиянием как на прогноз в целом для изучаемой территории, так и для конкретной скважины.

Прогноз нефтегазоносности

Модели были объединены в метамодель (ensemble) со стековым обобщением (stacking) алгоритмом логистической регрессии. Стековое обобщение использует предсказание каждой отдельной «слабой» модели и, комбинируя сильные предсказательные свойства каждой из них, делает потенциально более качественный прогноз. Метрики качества итоговой метамодели на кросс-валидации составили: F1 – 0,91212, AUC – 0,95761, Accuracy – 0,9112. Метамодель показала лучшие результаты, чем алгоритмы по отдельности. Качество модели, согласно метрикам, хорошее.

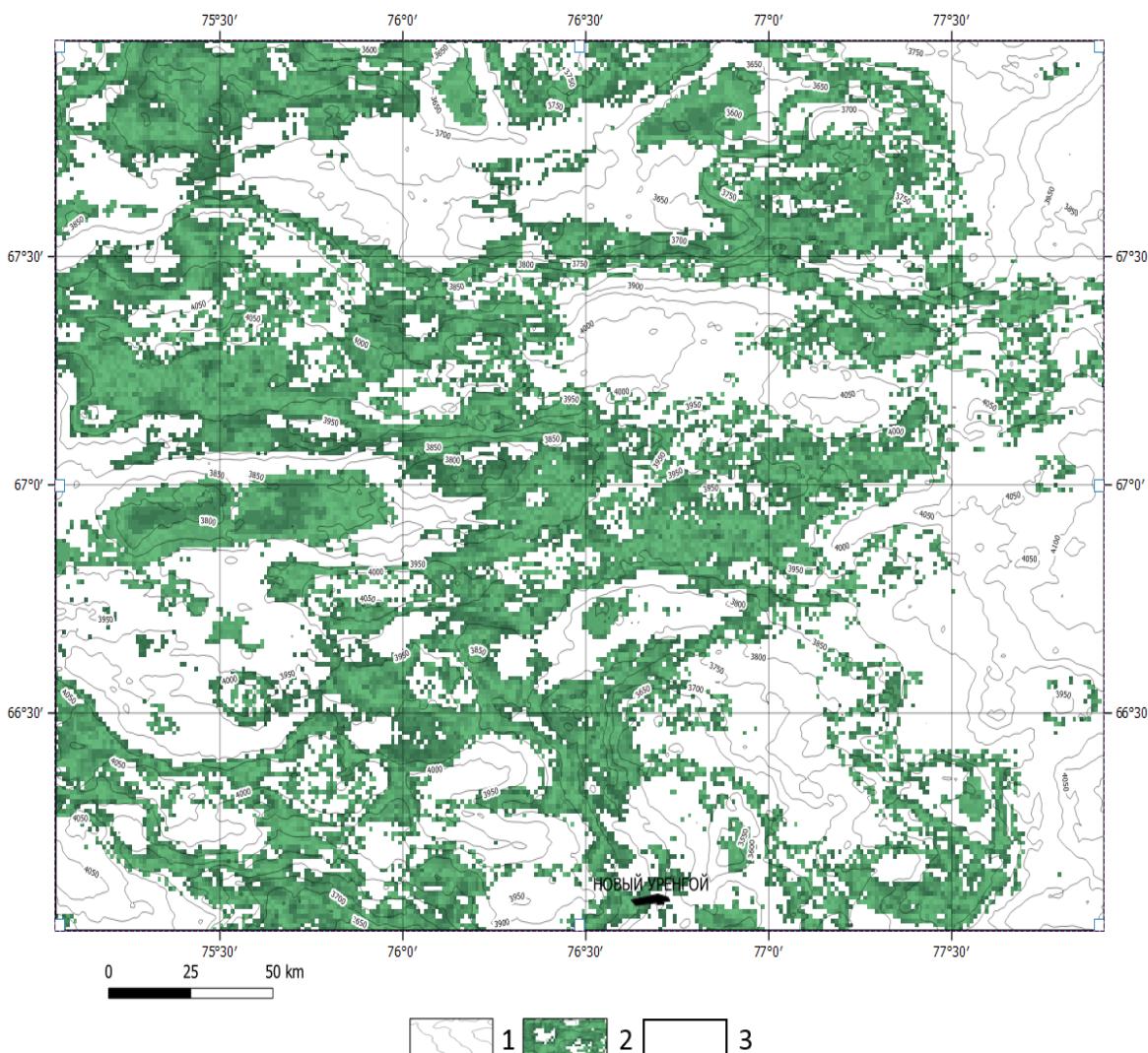


Рис. 8. Схема прогноза нефтегазоносности тюменской свиты в пределах северной части Надымского и Пурновского НГР: 1 – изолинии по абсолютным отметкам кровли баженовской свиты; 2 – перспективная территория; 3 – неперспективная территория для поисков углеводородов

Fig. 8. Scheme of forecasting the oil and gas content of the Tuymen suite within the northern part of the Nadym and Purovsky oil and gas regions: 1 – isolines at the absolute elevations of the top of the Bazhenov formation; 2 – promising territory; 3 – unpromising territory for hydrocarbon exploration

На основе обученной метамодели сделан прогноз вероятности принадлежности к классам в интервале тюменской свиты на изучаемой территории.

В зависимости от выбранного порога значений вероятности принадлежности к классу «приток» по

критерию степени важности для прогноза ошибки первого (False Positive Rate – FPR) или второго (False Negative Rate – FNR) рода проводится классификация территории. Ошибка первого рода при поисках на УВ обычно является более значимой, так как ее цена –

это затраты на бурение «сухой» скважины в область, классифицируемую как «приток».

В качестве примера прогноза приведена карта классификации территории на перспективные и не-перспективные земли для поисков УВ для северной части Надымского и Пуровского НГР (рис. 8).

На карте каждый пиксель с пространственным разрешением 400×400 м ассоциирован с вероятностью нефтегазоносности. Вероятность нефтегазоносности, или степень «уверенности» модели к принадлежности территории к классу «приток», варьируется от нуля до единицы; там, где значения не достигают выбранного порогового значения, территория относится к классу «сухо», где равны или более – к классу «приток». На рис. 8 чем интенсивнее зеленый цвет, тем значения ближе к единице, а белым отмечены не-перспективные земли. Особенностью полученного прогноза стали области, выделенные как перспективные вне привязки к структурному фактору, т. е. находящиеся на текущий момент вне поисково-разведочной парадигмы большинства нефтегазовых компаний.

Дополнительная проверка объективности полученных значений вероятности перспектив нефтегазоносности территории проведена на данных, по которым информации в обучающей выборке не было – это фактические результаты поисковой деятельности компаний за 2018 и 2019 гг. в регионе исследования. Для вновь открытых месторождений им. Ю.Е. Батурина вероятность открытия составляла 0,93, а для Восточно-Ундрского месторождения – 0,89. Прогнозируемые высокие коэффициенты вероятности открытия месторождений УВ в тюменской свите подтверждают эффективность выявленных моделями связей внутри признакового пространства и сделанных обобщений.

Информация по каждой вновь пробуренной скважине, законченной испытанием целевого объекта, позволяет уточнить существующую модель прогноза, а новые данные сейморазведки 3D – увеличить точность региональных структурных построений. Созданные модели, при появлении новых данных, можно дообучать, создавая таким образом динамично меняющийся прогноз в зависимости от поступления новых данных о территории исследования.

Оценка ресурсной базы УВ

Оценка ресурсной базы УВ тюменской свиты проведена вероятностным объемным методом через расчет плотности запасов, приведенных к единице площади, со стохастическим моделированием методом Монте-Карло [20]. По 281 месторождению, стоящему на государственном балансе на 2019 г. с залежами УВ в тюменской свите, определены плотности вероятностного распределения основных подсчетных параметров объемного метода. Рассчитана плотность вероятностного распределения запасов категорий ABC_1+C_2 на единицу площади для открытых месторождений в тоннах нефтяного эквивалента (т.н.э.). Полученное распределение умножалось на значения, взятые с карты вероятной нефтегазоносности терри-

тории в каждой точке пространства. Таким образом, на выходе генерировалась карта ресурсной базы по региону с учетом вероятности нефтегазоносности. Для получения интегральных показателей значения с карты просуммированы. Извлекаемые ресурсы оценивались путем перемножения полученных значений ресурсов на плотность вероятностного распределения КИН для залежей тюменской свиты. Вероятностная оценка геологической и извлекаемой ресурсной базы и суммарные значения этих параметров по месторождениям, числящимся на государственном балансе на территории исследования, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Оценка ресурсной базы углеводородов тюменских отложений

Table 2. Assessment of the resource hydrocarbons of the Tuymen deposits

Ресурсная база УВ/ Оценка в вероятности, гос. баланс Resource HC/Assessment in probability, State Register	P90	P50	P10	Гос. баланс 2018 State Register 2018	
				ABC ₁	ABC _{1+C₂}
Геологическая, млрд т.н.э. Geological, billion toe	6,3	23,8	178,5	5,4	9,3
Извлекаемая, млрд т.н.э. Recoverable, billion toe	1,4	5,3	46,7	1,3	2,1

На изучаемой территории геологическая ресурсная база УВ для тюменских отложений с вероятностью более 90 % равна или превышает 6,3 млрд т.н.э., что на 0,9 млрд т.н.э. больше поставленных на государственный баланс запасов по категории ABC₁. С вероятностью 50 % ресурсная база объекта исследования равна или более 23,8 млрд т.н.э., что на 14,5 млрд т.н.э. больше суммарных запасов по категориям ABC_{1+C₂}, поставленных на государственный баланс. В самом оптимистичном сценарии, с вероятностью P10, извлекаемая ресурсная база УВ равна или более 46,7 млрд т.н.э., что сопоставимо с потенциальной ресурсной базой мелового нефтегазоносного комплекса Западной Сибири.

Заключение

Предложенная методика прогноза нефтегазоносности с помощью методов машинного обучения и комплексирования технологического стека методов: геоинформатики, бассейнового моделирования, экспертных оценок, показала высокое качество предсказания вероятности нефтегазоносности территорий как на кросс-валидации, так и по результатам сделанных открытий прошлых лет.

Методика отличается от других методов прогноза эмпирическим подходом, при котором на основе фактических результатов испытания отдельных скважин методами машинного обучения ведется поиск взаимосвязей среди пространственных атрибутов территории и их многомерное обобщение. Пространственные атрибуты могут быть сгенерированы различными методами, способными привнести даже косвенную информацию об изучаемом объекте. Лучшие результаты возможны в тандеме между искусственным интеллектом (ИИ), частью которого является машинное обучение, и геологом. Используя возможности ИИ

искать связи и делать обобщения в признаковом гиперпространстве, геолог извлекает знания, создавая и совершенствуя гипотезы. При получении новых данных по результатам поисково-разведочных работ существующие модели могут быть доучены, совершенствуя прогноз, создавая динамический цикл с положительной обратной связью между прогнозом и поисковой деятельностью.

Результатом построения региональной карты вероятности нефтегазоносности территории и карты ресурсной базы УВ с учетом геологического риска может быть: определение и ранжирование поисково-разведочных объектов; оценка ожидаемой стоимости (EMV) проектов; оценка целесообразности приобретения или развития активов; понимание будущего

вектора развития конкурентов по итогам поисковых работ; изменение стратегии самой компании в связи с потенциальной возможностью вовлечения в разработку значительной традиционной ресурсной базы УВ с синергетическим экономическим эффектом от существующей и будущей инфраструктуры.

На основании оценки методом Монте-Карло ресурсной базы УВ в тюменской свите с учетом прогноза вероятности нефтегазоносности территории исследования показан ее значительный потенциал для поисковой деятельности. Так, в равновероятной оценке P50 ресурсный потенциал свиты в регионе исследования превышает в два с лишним раза поставленные на государственный баланс геологические запасы месторождений по сумме категорий ABC₁ и C₂.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распознавание образов гигантских нефтяных месторождений / А.А. Трофимук, В.С. Вышемирский, А.Д. Дмитриев, Д.П. Дробот, П.Н. Карагодин, И.Н. Сулимов // Проблемы нефтеносности Сибири. – 1971. – Т. 1. – С. 34–50.
2. Конторович А.Э. Геология нефти и газа: избранные труды. Методы прогноза нефтегазоносности. Планирование геологоразведочных работ. – Новосибирск: СНИИГиМС, 2008. – Т. 3. – 331 с.
3. Методическое руководство по количественной и экономической оценке ресурсов нефти, газа и конденсата России / под ред. К.А. Клещева – М.: ВНИГНИ, 2000. – 189 с.
4. Геологическое строение и нефтегазоносность нижней-средней юры Западно-Сибирской провинции / Ф.Г. Гуары, В.П. Девятов, В.И. Демин, А.Е. Еханин, А.М. Казаков, Г.В. Касаткина, Н.И. Курушин, Н.К. Могучева, В.В. Сальянник, О.В. Серебренникова, Л.В. Смирнов, Л.Г. Смирнова, В.С. Сурков, Г.Г. Сысолрова, О.В. Шиганова. – Новосибирск: Наука, 2005. – 156 с.
5. Ивлев Д.А. Региональный прогноз областей притока нефти из баженовско-абалакского комплекса на территории ХМАО-Югры методом машинного обучения // Нефтяное Хозяйство. – 2016. – № 6. – С. 90–93.
6. Zheng A., Casari A. Feature engineering for machine learning: principles and techniques for data scientists. – Boston: O'Reilly, 2018. – 218 p.
7. Ganguly Kuntal. Learning generative adversarial networks. – Birmingham: Packt Publ., 2017. – 180 p.
8. Langr J., Bok V. GANs in action: deep learning with generative adversarial networks. – New York: Manning Publishing, 2019. – 240 p.
9. High-throughput, high-resolution registration-free generated adversarial network microscopy / Hao Zhang, Xinlin Xie, Chunyu Fang, Yicong Yang, Di Jin, Peng Fei // arXiv.org. – 2018. – 21 p. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1801/1801.07330.pdf> (дата обращения: 08.08.2020).
10. Path sampling method for modeling overland water flow, sediment transport, and short term terrain evolution in Open Source GIS / H. Mitasova, C. Thaxton, J. Hofierka, A. Moore, L. Mitas // Developments in Water Science. – 2004. – V. 55. – № 2. – P. 1479–1490.
11. Hearn C.J. The dynamics of coastal models. – Cambridge: Cambridge University Press, 2008. – 503 p.
12. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в юрском периоде / А.Э. Конторович, В.А. Конторович, С.В. Рыжкова, Б.Н. Шурыгин, Л.Г. Вакуленко, Е.А. Гайдебурова, В.П. Данилова, В.А. Казаненков, Н.С. Ким, Е.А. Костырева, В.И. Москвин, П.А. Ян // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – № 8. – С. 972–1012.
13. Литолого-палеогеографические реконструкции юрского периода севера Западно-Сибирского осадочного бассейна / Г.Г. Шемин, В.А. Врениковский, В.И. Москвин, Л.Г. Вакуленко, Е.В. Деев, Н.В. Первухина // Геология нефти и газа. – 2018. – № 6. – С. 35–61.
14. Шиманский В.В., Танинская Н.В., Раевская Е.Г. Выявление структурно-литологических ловушек в юрских и нижнемеловых отложениях Западной Сибири на основе палеогеографических реконструкций // Геология нефти и газа. – 2019. – № 3. – С. 39–46.
15. Неручев С.Г., Смирнов С.В. Оценка потенциальных ресурсов углеводородов на основе моделирования процессов их генерации и формирования месторождений нефти и газа // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2007. – № 2. – С. 33–45.
16. Verweij J.M. Hydrocarbon migration systems analysis. – Delft: Elsevier Science Publishers, 1993. – 289 p.
17. Zheng A., Casari A. Feature engineering for machine learning. – Sebastopol: O'Reilly Media, 2018. – 216 p.
18. Opitz J., Burst S. Macro F1 and Macro F1 // arXiv.org. – 2019. – 12 p. URL: <https://arxiv.org/pdf/1911.03347.pdf> (дата обращения: 08.08.2020).
19. SHAP // github.com. URL: <https://github.com/slundberg/shap> (дата обращения: 08.08.2020).
20. Rose P.R. Risk analysis and management of petroleum exploration ventures. – Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2001. – 164 p.

Поступила 25.11.2020 г.

Информация об авторах

Ивлев Д.А., соискатель ученой степени в области геологических наук Бристольского университета.

UDC 550.8.012

METHOD FOR REGIONAL FORECAST OF OIL AND GAS POTENTIAL TERRITORIES BY MACHINE LEARNING ALGORITHMS ON THE EXAMPLE OF THE TYUMEN FORMATION OF WESTERN SIBERIA

Dmitry A. Ivlev,
dm.ivlev@gmail.com

University of Bristol,
Beacon House, Queens Road, Bristol, Clifton, BS8 1SE, UK.

The relevance of the research is caused by the reduction in the fund of structural traps and the need to expand the resource base of hydrocarbons by increasing the efficiency of prospecting and exploration of fields in complex oil and gas deposits.

The main aim of the research is to show the forecasting methodology and the set of applied technological solutions and algorithms using the example of forecasting the oil and gas content of the study area.

Object: Middle Jurassic deposits (Tyumen Formation) of Western Siberia within the region (700×900 km), which includes parts of the Yamalo-Nenets and Khanty-Mansiysk administrative districts and the Tomsk region.

Methods. Using the machine-learning algorithms and integrating a technological set of methods: geoinformatics, basin modeling, and expert assessments, the following stages of the forecast method implementation: 1) generation of the feature space of the studied area based on increasing the spatial resolution of structural constructions using algorithms of generative-adversarial architecture of neural networks, where the results of 3D seismic survey are used as reference areas; 2) selection of features by statistical method and machine learning methods; 3) creation of a subset of forecast models based on gradient boosting over decision trees; 4) combining them into a metamodel by stacking generalization by logistic regression, are shown.

Results. An approach to regional forecasting has been formalized and tested. A forecast of the probability of oil and gas content of the Tyumen suite in the study area was made. On its basis and information on discovered fields, the hydrocarbon resource base was estimated by the Monte Carlo method. The results are presented in the form of a summary table of geological and recoverable resources for probabilities P10, P50, P90 in comparison with the categories of reserves ABC1 and ABC₁+C₂ of the fields listed on the state balance sheet in the study area. As an example, the graphic materials of the results are given: the work of the algorithm for increasing the spatial resolution; sedimentation modeling; modeling of hydrocarbon migration; hydrocarbon potential forecast map for the northern part of the Nadym and Purovsky oil and gas regions.

Key words:

Tyumen formation, Middle Jurassic, machine learning, artificial intelligence, feature generation, feature selection, gradient boosting, generative adversarial neural networks, regional oil and gas forecast, probability of geological success, hydrocarbon resource, geoinformatic, basin modeling, sedimentation modeling, modeling HC migration.

REFERENCES

1. Trofimuk A.A., Vyshemirskiy V.S., Dmitriyev A.D., Drobot D.P., Karagodin P.N., Sulimov I.N. Recognition of images of giant oil fields. *Problems of oil-bearing capacity of Siberia*, 1970, vol. 1, pp. 34–50. In Rus.
2. Kontorovich A.E. *Geologiya nefti i gaza: izbrannye Trudy. Metody prognoza neftegazonosnosti*. Planirovanie geologorazvedochnykh rabot [Geology of Oil and Gas: Selected Works. Methods for forecasting oil and gas content. Planning of geological exploration works]. Novosibirsk, SNIIGGiMS Publ., 2008. Vol. 3. 331 p.
3. *Metodicheskoe rukovodstvo po kolichestvennoy i ekonomicheskoy otsenke resursov nefti, gaza i kondensata Rossii* [Methodological guide for the quantitative and economic assessment of oil, gas and condensate resources in Russia]. Ed. by K.A. Kleshchev. Moscow, VNIGNI Publ., 2000. 189 p
4. Gurari F.G., Devyatov V.P., Demin V.I., Ekhaniin A.E., Kazakov A.M., Kasatkina G.V., Kurushin N.I., Mogucheva N.K., Sapyanik V.V., Serebrennikova O.V., Smirnov L.V., Smirnova L.G., Surkov V.S., Sysolova G.G., Shiganova O.V. *Geologicheskoe stroenie i neftegazonosnost nizhney-sredney yury Zapadno-Sibirskskoy provintsii* [Geological structure and oil and gas content of the Lower-Middle Jurassic of the West Siberian province]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 156 p.
5. Ivlev D.A. Regional forecast of areas of oil inflow from the Bazhenov-Albalak complex on the territory of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug-Yugra by the machine learning method. *Oil Industry*, 2016, no. 6, pp. 90–93. In Rus.
6. Zheng A., Casari A. *Feature engineering for machine learning: principles and techniques for data scientists*. Boston, O'Reilly, 2018. 218 p.
7. Kuntal G. *Learning generative adversarial networks*. Birmingham, Packt Publ., 2017. 180 p.
8. Langr J., Bok V. *GANs in action: deep learning with generative adversarial networks*. New York, Manning Publ., 2019. 240 p.
9. Hao Zhang, Xinlin Xie, Chunyu Fang, Yicong Yang, Di Jin, Peng Fei. High-throughput, high-resolution registration-free generated adversarial network microscopy. *arXiv.org*, 2018, 21 p. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1801/1801.07330.pdf> (accessed 08 August 2020).
10. Mitasova H., Thaxton C., Hofierka J., Moore A., Mitas L. Path sampling method for modeling overland water flow, sediment transport, and short term terrain evolution in Open Source GIS. *Developments in Water Science*, 2004, vol. 55, no. 2, pp. 1479–1490.
11. Hearn C.J. *The dynamics of coastal models*. Cambridge, Cambridge University Press, 2008. 503 p.
12. Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Ryzhkova S.V., Shurygin B.N., Vakulenko L.G., Gaideburova E.A., Danilova V.P., Kazanenkov V.A., Kim N.S., Kostyreva E.A., Moskvin V.I., Yan P.A. Paleogeography of the West Siberian sedimentary basin in the Jurassic period. *Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 8, pp. 972–1012. In Rus.
13. Shemin G.G., Vrenikovsky V.A., Moskvin V.I., Vakulenko L.G., Deev E.V., Pervukhina N.V. Lithological-paleogeographic reconstructions of the Jurassic period in the north of the West Siberian sedimentary basin. *Geology of oil and gas*, 2018, no. 6, pp. 35–61. In Rus.
14. Shimansky V.V., Taninskaya N.V., Raevskaya E.G. Identification of structural and lithological traps in the Jurassic and Lower Cretaceous sediments of Western Siberia based on paleogeographic reconstructions. *Geology of Oil and Gas*, 2019, no. 3, pp. 39–46. In Rus.

15. Neruchev S.G., Smirnov S.V. Assessment of potential hydrocarbon resources based on modeling the processes of their generation and formation of oil and gas fields. *Neftegazovaya Geologiya, Theory and Practice*, 2007, no. 2, pp. 33–45. In Rus.
16. Verweij J.M. *Hydrocarbon migration systems analysis*. Delft, Elsevier Science Publishers, 1993. 289 p.
17. Zheng A., Casari A. *Feature engineering for machine learning*. Sebastopol, O'Reilly Media, 2018. 216 p.
18. Opitz J., Burst S. Macro F1 and Macro F1. *arXiv.org*, 2019, 12 p. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1911.03347.pdf> (accessed 08 August 2020).
19. Shap. *github.com*. Available at: <https://github.com/slundberg/shap> (accessed 08 August 2020).
20. Rose P.R. *Risk analysis and management of petroleum exploration ventures*. Tulsa, American Association of Petroleum Geologists, 2001. 164 p.

Received: 25 November 2020.

Information about the authors

Dmitry A. Ivlev, PhD applicant in Geological Sciences, University of Bristol.

УДК 544.6.018+628.164

ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ ПРОТИВ СОЛЕОТЛОЖЕНИЯ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

Томилин Александр Константинович¹,
aktomilin@tpu.ru

Беспалов Владимир Ильич¹,
vibsp@tpu.ru

Беспалов Виктор Владимирович¹,
vic@tpu.ru

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

Актуальность исследования определяется широким применением водных георесурсов в качестве рабочих тел в гидро- и теплоэнергетике, в системах теплоснабжения и охлаждения. При этом часто требуется произвести технологическую водоподготовку перед выполнением основного производственного цикла. В частности, воду требуется очищать от коллоидных, накипеобразующих и газообразных примесей. Наибольшую сложность представляет очистка воды от солей жесткости, то есть ее умягчение. Соли кальция и магния обычно выпадают на поверхностях теплообмена с образованием накипи, что приводит к резкому снижению эффективности работы теплообменного оборудования, перерасходу топлива и частым остановкам для чистки. Удаляют накипь обычно путем кислотных промывок внутренних поверхностей теплообмена или механическим способом. Все эти методы связаны с применением большого количества химических реагентов и сильно загрязняют сточные воды. Кроме того, это значительно увеличивает эксплуатационные расходы.

Цель настоящего исследования заключается в теоретическом описании электрохимических процессов, происходящих в установках с постоянными торOIDальными магнитами, при пропускании потока воды с растворенными в ней солями жесткости, а также в анализе опыта практической эксплуатации таких установок.

Объекты: магнитная система торOIDального типа, магнитное поле, ионы солей, содержащихся в воде, установки магнитной водоочистки.

Методы: торOIDальная электродинамика; эксперименты по взаимодействию торOIDальных электромагнитных объектов; гипотезы об электрохимических процессах, происходящих в водном потоке, протекающем вдоль оси магнитного торOIDа; эксперименты по проверке этих гипотез; теория, объясняющая технологию магнитной водоочистки; анализ многолетней практики эксплуатации установок «Магнуст».

Результаты. Дано теоретическое объяснение технологии магнитной водоподготовки с помощью торOIDальных магнитных установок. Описаны электрохимические процессы, происходящие на этапе магнитной обработки и на последующем этапе нагревания омагниченной воды. Показано, что в присутствии магнитного поля ионы разных знаков дрейфуют во взаимно противоположных направлениях. По этой причине образование гидрокарбонатов кальция и магния на поверхности нагревателя затруднено. Как следствие, не происходит и отложение карбонатов на нагреваемых поверхностях. Определена наиболее эффективная конструкция магнитной установки, ее оптимальные параметры. Приведены сведения об эксплуатации установок «Магнуст» на нескольких бытовых и производственных объектах.

Ключевые слова:

Электрохимия, солеотложение, торOIDальный магнит, магнитное поле, магнитная сила, магнитная установка.

Введение

Вода в энергетике играет исключительно важную роль – как рабочее тело в турбинах гидроэлектростанций, в виде пара в паротурбинных установках ТЭС и АЭС, как теплоноситель в системах теплоснабжения и охлаждения. Вода берется из естественных поверхностных или подземных водоемов и содержит в себе как взвешенные и растворенные твердые вещества, так и растворенные газы. Поэтому перед введением в тот или иной производственный цикл вода должна быть очищена от коллоидных, накипеобразующих и газообразных примесей. Наибольшую сложность представляет очистка воды от солей жесткости, то есть ее умягчение. Соли кальция и магния могут выпадать на поверхностях теплообмена с образованием накипи, что приводит к резкому снижению эффективности работы теплообменного оборудования, перерасходу топлива и частым

остановкам для чистки. Удаляют накипь путем кислотных промывок внутренних поверхностей теплообмена или механическим способом.

Наиболее распространенными методами водоподготовки являются химические (коагуляция, ионообменное умягчение или полное химобессолевание) и термические (деаэрация, дистилляция) [1–5]. Аналогичные методы применяются для опреснения морской воды [6–9]. Все эти методы связаны с применением большого количества химических реагентов и сильно загрязняют сточные воды от водоподготовительных установок.

Однако, если создать условия кристаллизации веществ непосредственно в объеме воды и периодически удалять образовавшейся шлам путем продувок, можно избежать обрастания поверхностей нагрева отложениями солей. Это позволяет отказаться от промывок, сократить расход химреагентов или вообще

ще отказаться от них, а значит, уменьшить объем сточных промывочных вод. Методы создания беззапасного режима работы теплообменного оборудования связаны с использованием электрического и магнитного полей [10–17]. Эффект объемной кристаллизации ионов солей жесткости, растворенных в потоке воды, под воздействием магнитного поля замечен давно. Для магнитной обработки воды применяются омагничивающие установки с постоянными магнитами или электромагнитами, а также электромагнитные фильтры. Наиболее перспективным и простым в эксплуатации являются установки с постоянными редкоземельными магнитами.

Целью настоящего исследования является теоретическое описание электрохимических процессов, происходящих в установках с постоянными тороидальными магнитами, при пропускании потока воды с растворенными в ней солями жесткости, а также анализ опыта практической эксплуатации таких установок.

Магнитные поля тороидальных магнитных систем

Для решения поставленной задачи, прежде всего, требуется рассмотреть движение заряженных частиц (ионов), содержащихся в потоке воды, протекающем во внешнем магнитном поле. Поскольку магнитное поле создается сложной системой постоянных магнитов, необходимо исследовать его конфигурацию и составляющие компоненты.

Обычно при изучении электромагнетизма ограничиваются рассмотрением магнитных полей простейших объектов: бесконечного линейного тока или уединенного замкнутого контура (или соленоида) с током. Для их описания достаточно вектора магнитной индукции \mathbf{B} , определяющего вихревую компоненту магнитного поля. Потенциальные (градиентные) магнитные поля возникают в сложных (многоконтурных) электрических или магнитостатических системах тороидального типа [18–20]. Взаимодействие тороидальных магнитных объектов изучается в научном направлении, которое сформировалось относительно недавно и получило название «тороидальная электродинамика» [21–23]. Тороидальные структуры часто образуются на молекулярном уровне, и взаимодействие между ними влияет на макроскопические характеристики материала [24, 25].

Простейшую тороидальную магнитную структуру образуют два плоских магнита с аксиальной намагниченностью (рис. 1). В «пустых» областях слева и справа от линии соединения магнитов концентрируется градиентное магнитное поле. Его свойства в настоящее время достаточно полно исследованы теоретически и экспериментально, что позволяет применять его в технике и технологиях [18–20, 26–28]. В качестве характеристик градиентного магнитного поля используются скалярные функции: H^* – напряженности (A/m) и B^* – индукции (Tl). По этой причине часто используется термин «скалярное магнитное поле» (СМП) [18]. Различают положительное и отрицательное СМП. На рис. 1 представлен график распределения напряженности СМП магнитной пары с учетом знаков этой функции. Следует обратить

внимание на направление градиента СМП вдоль линии соединения магнитов, указанное на рис. 1. Для обозначения градиента СМП ∇H^* в 1957 г. академик Я. Зельдович ввел термин «тороидальный момент» [29].

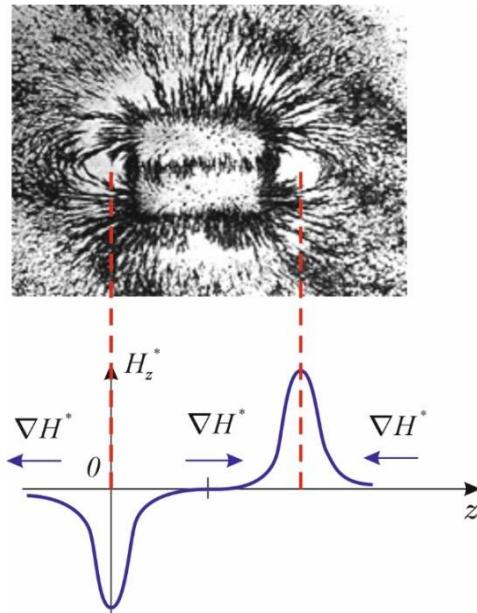


Рис. 1. Поле магнитной пары
 Fig. 1. Field of the magnetic pair

Магнитное поле обладает соленоидальной (векторной) \mathbf{H} и потенциальной (скалярной или градиентной) H^* компонентами. Оно в общем случае описывается четырехмерным вектором (\mathbf{H}, H^*) , или кватернионом [19].

Тороидальная катушка с током (или магнитный тороид) создает магнитное поле, в котором эти компоненты позиционно разделены: вихревое поле заключено внутри обмотки, а потенциальное находится снаружи, вблизи торцов (рис. 2) [19, 20]. Такую же конфигурацию имеет магнитное поле движущейся заряженной частицы, например, иона. Следовательно, при исследовании движения заряженных частиц в поле магнитного тороида одной лишь силы Лоренца недостаточно, необходимо учитывать еще и взаимодействие тороидальных магнитных объектов между собой за счет СМП.

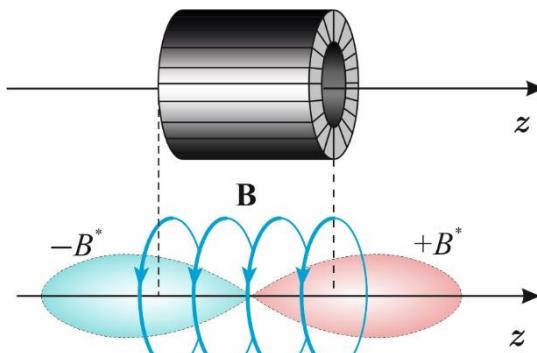


Рис. 2. Магнитное поле тороида
 Fig. 2. Toroid magnetic field

Рассмотрим два экспериментальных факта. В первом эксперименте (рис. 3) миниатюрный тороид располагается над линией соединения пары магнитов в области СМП [19]. На рис. 3, а представлен случай, когда тороидальная катушка находится в положительном СМП. Установлено, что в этом случае на него действует сила \mathbf{F}^* , направленная вдоль тока плотности \mathbf{j} , текущего по внутренней части витков. Если магниты расположить, как показано на рис. 3, б, то тороид находится в отрицательном СМП. В этом случае на него действует сила \mathbf{F}^* , направленная противоположно внутреннему току. Заметим, что градиент СМП, созданного магнитной парой, в данном случае направлен перпендикулярно оси тороидальной катушки, то есть ортогонально внутреннему току \mathbf{j} .

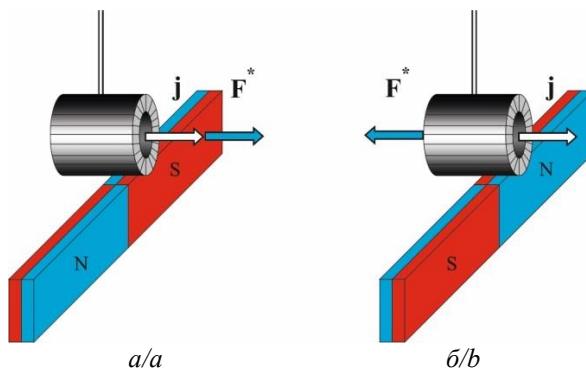


Рис. 3. Движение тороида в СМП в случае $\nabla H^* \perp j$: а) $H^* > 0$; б) $H^* < 0$

Fig. 3. Motion of the toroid in a scalar magnetic field (SMF) in the case of $\nabla H^* \perp j$: a) $H^* > 0$; b) $H^* < 0$

Этому экспериментальному факту соответствует формула, определяющая плотность магнитной силы при $\nabla H^* \perp j$:

$$\mathbf{f}_\perp^* = \mathbf{j}_\perp B^*. \quad (1)$$

Здесь символ \mathbf{j}_\perp означает, что ток направлен ортогонально градиенту внешнего СМП ∇H^* .

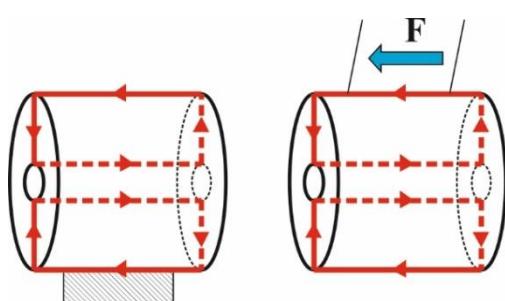


Рис. 4. Взаимодействие тороидов при одинаковом направлении токов

Fig. 4. Interaction of toroids in the same direction of currents

Второй экспериментальный факт обнаружен Г.В. Николаевым [18] (рис. 4). Две расположенные на одной оси тороидальные катушки (со скомпенсированными набегающими витками) при однонаправлен-

ных токах в них испытывают силы продольного притяжения. Градиенты СМП тороидов совпадают с их осями, расположенными на одной линии.

Этот экспериментальный факт выражается законом:

$$\mathbf{f}_\parallel^* = -\mathbf{j}_\parallel B^*, \quad (2)$$

где \mathbf{j}_\parallel – ток, расположенный на одной оси с градиентом внешнего СМП ∇H^* .

Объединив формулы (1) и (2), получим закон для определения потенциальной компоненты магнитной силы:

$$\mathbf{f}^* = B^*(\mathbf{j}_\perp - \mathbf{j}_\parallel). \quad (3)$$

С учетом (3) обобщенный закон электромагнитного взаимодействия тороидальных структур запишется в виде:

$$\mathbf{f} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} + B^*(\mathbf{j}_\perp - \mathbf{j}_\parallel). \quad (4)$$

Согласно формуле (4), полная магнитная сила представляется в виде суперпозиции вихревой \mathbf{f} и потенциальной компонент \mathbf{f}^* [19].

Если заряд q движется в обобщенном магнитном поле (\mathbf{B}, B^*) со скоростью \mathbf{v} , то на него действует магнитная сила в виде суперпозиции вихревой силы Лоренца \mathbf{F}_L и потенциальной силы \mathbf{F}^* :

$$\mathbf{F}_M = \mathbf{F}_L + \mathbf{F}^* = q[\mathbf{v} \times \mathbf{B} + B^*(\mathbf{v}_\perp - \mathbf{v}_\parallel)], \quad (5)$$

где \mathbf{v}_\perp и \mathbf{v}_\parallel – проекции скорости заряда на направление, ортогональное градиенту внешнего СМП и на направление этого градиента, соответственно.

Воздействие поля тороидального магнита на ионы в потоке воды

В водных растворах подавляющее большинство солей существует в виде ионов. В природных водах преобладают три аниона (гидрокарбонат HCO_3^- , хлорид Cl^- и сульфат SO_4^{2-}) и четыре катиона (кальций Ca^{2+} , магний Mg^{2+} , натрий Na^+ и калий K^+) – их называют главными ионами. Электрохимические процессы, происходящие в воде при воздействии магнитного поля, сложны и до конца не исследованы. В работах [16, 17] выделены три основные группы гипотез, объясняющих происходящие процессы: коллоидные, ионные и водные.

1. Коллоидные. Под влиянием магнитного поля в обрабатываемой воде происходит спонтанное образование и распад коллоидных комплексов ионов металлов (Fe^{3+}) и микровключений из ферромагнитных частиц железа (Fe_2O_3). Фрагменты их распада формируют центры кристаллизации, на которых адсорбируются катионы кальция Ca^{2+} и магния Mg^{2+} .
2. Ионные. Магнитное поле поляризует растворенные в воде ионы и деформирует их гидратные оболочки, уменьшая гидратацию. Это повышает вероятность сближения гидратов ионов и процессы седиментации и кристаллизации неорганических солей.

3. Водные. Магнитное поле за счет поляризации дипольных молекул воды оказывает воздействие непосредственно на структуру ассоциатов воды. Содержащиеся в воде соли жесткости теряют способность формировать плотные отложения, образуется более щадящая мелкокристаллическая полиморфная форма, рост кристаллов останавливается на стадии микрокристаллов. Подобная гипотеза образования микрокристаллов используется также в работе [30] для объяснения результатов экспериментального исследования объемной кристаллизации в магнитном поле.

Авторы настоящей статьи (Беспалов В.И. и Беспалов В.В.) совместно с аспирантами под руководством профессора В.В. Лопатина в 2008 г. выполнили эксперименты, которые могут быть воспроизведены в обычных лабораторных условиях. В дистиллированной воде растворялись соли кальция и магния. Измерялась электрическая проводимость исходного раствора, что подтвердило наличие ионов. Затем раствор прокачивался вдоль оси торOIDального магнита, расположенного снаружи водовода, с целью оценки воздействия преимущественно градиентной компоненты магнитного поля B^* . Затем вновь проводились измерения. Электрическая проводимость раствора после магнитной обработки резко снижалась, что говорит об уменьшении

числа ионов за счет кристаллизации солей жесткости. В растворе отсутствовали ионы металлов, что свидетельствует в пользу 2 и 3 группы гипотез образования микрокристаллов. Далее кристаллы солей жесткости транзитом могут проходить через любые поверхности нагрева, не образуя на них отложения. Более того, образование кристаллов резко снижает ионную жесткость воды, что приводит к растворению в ней старых отложений и к общей очистке системы.

При помощи закона (5) можно определить направление дрейфа ионов разных знаков в потоке воды, проходящей через торOIDальный магнит. Рассмотрим поток воды, направленный вдоль оси Oz и проходящий через магнитный торOID, то есть движущийся в СМП (рис. 5). Скорость водного потока обозначим вектором v . Области СМП ($-B^*$ и $+B^*$) на рисунке изображены разными цветами. Рассмотрим воздействие СМП на положительные и отрицательные ионы в каждой из двух областей. Градиент СМП, созданного магнитным торOIDом, направлен по линии, соединяющей точку положения иона с точкой O в центре торOIDа. Проектируем скорости ионов на соответствующее направление градиента СМП и в соответствии с законом (5) определяем компоненты магнитной силы F^* : F_{\perp}^* и F_{\parallel}^* .

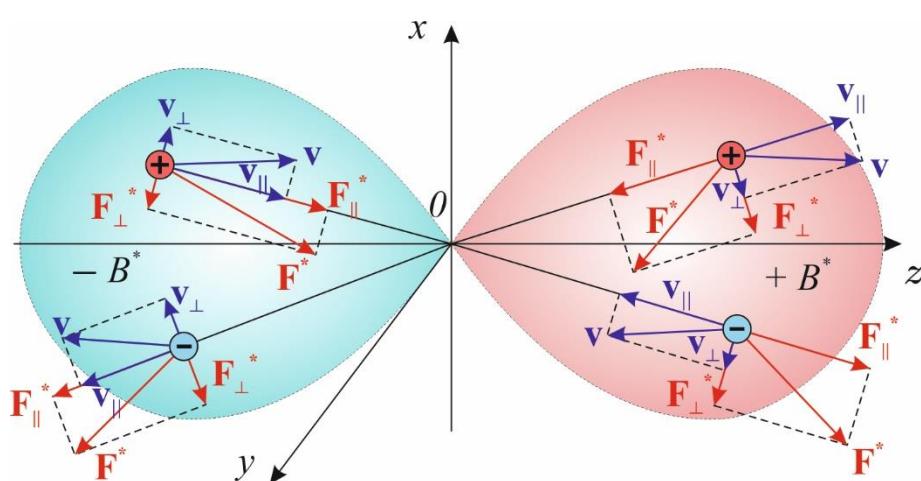


Рис. 5. Силы, действующие на ионы, в потоке воды, движущемся в СМП

Fig. 5. Forces acting on ions in a stream of water, moving in the SMF

Анализируя рисунок, приходим к заключению:

- 1) на положительные ионы, движущиеся в СМП торOIDального магнита, действует сила F^* , направленная к центральной оси течения z ;
- 2) отрицательные ионы под действием силы F^* дрейфуют от центральной оси z ;
- 3) положительные ионы при движении в отрицательном СМП ($-B^*$) ускоряются, а в положительном СМП ($+B^*$) замедляются;
- 4) отрицательные ионы, наоборот, в отрицательном СМП ($-B^*$) замедляются, а в положительном СМП ($+B^*$) ускоряются.

При взаимодействии ионов с торOIDальным (круговым) векторным магнитным полем B также происходит дрейф ионов под действием силы Лоренца F_{\perp} :

положительные ионы дрейфуют к оси z , а отрицательные от нее удаляются. Таким образом, радиальный дрейф ионов с одинаковыми зарядами за счет обеих компонент магнитного поля происходит в одном направлении. По этой причине имеет смысл размещать магнитный торOID внутри водовода. Это приводит к максимальному разделению положительных и отрицательных ионов в потоке воды.

Если изменить направление движения потока жидкости на противоположное при том же положении торOIDального магнита, то направления всех магнитных сил тоже изменятся на противоположные.

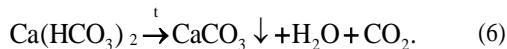
Можно сделать общий вывод: при движении воды в магнитном поле торOIDа положительные и отрицательные ионы дрейфуют противоположно в радиаль-

ном направлении. Ионы одного знака концентрируются вблизи оси течения, а другого – на его периферии. Этот эффект предлагается использовать для очистки воды от коллоидных, накипеобразующих и газообразных примесей. На основании изложенных выше теоретических соображений и экспериментальных фактов можно описать происходящие процессы следующим образом.

Рассмотрим процесс образования накипи при отсутствии магнитного поля. При нормальной температуре ионы, содержащиеся в воде, между собой не объединяются, поскольку вокруг них образуются гидратные оболочки из поляризованных молекул воды. Разрушение гидратных оболочек может произойти в результате нагревания воды.

Ионы, лишенные гидратных оболочек, образуют гидрокарбонаты кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ и магния $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, вода становится жесткой. Следует различать два типа жесткости: временную (карбонатную), обусловленную гидрокарбонатами кальция и магния, а также постоянную (некарбонатную), вызванную присутствием других солей, не выделяющихся при кипячении воды (в основном это сульфаты и хлориды кальция и магния: CaSO_4 , CaCl_2 , MgSO_4 , MgCl_2).

Гидрокарбонаты при дальнейшем нагревании раствора разлагаются с образованием карбонатов. Например, гидрокарбонат кальция разлагается по схеме:



Это происходит в основном на поверхности нагревателя, где и осаждается накипь. Накипь – это нерастворимый карбонат кальция CaCO_3 и карбонат магния MgCO_3 .

Если поток воды движется в магнитном поле, то гидратные оболочки на поверхности ионов деформируются и разрушаются без нагревания. Это происходит потому, что в электрическом поле

$$\mathbf{E} = \mathbf{v} \times \mathbf{B} + B^* (\mathbf{v}_\perp - \mathbf{v}_\parallel)$$

поляризованные молекулы воды ориентируются по направлению вектора \mathbf{E} , что приводит к их отрыву от ионов. Свободные ионы различных знаков дрейфуют во взаимно противоположных направлениях, поэтому на поверхности нагревателя присутствуют преимущественно ионы одного знака, например, катионы Ca^{2+} . При отсутствии в этой области анионов HCO_3^- образование гидрокарбонатов не происходит. Поэтому вблизи поверхности нагревателя карбонаты по схеме (6) не образуются, и накипь не осаждается.

Часть ионов, потерявших гидратную оболочку, объединяются в микрокристаллы вдали от нагреваемых поверхностей. Этот процесс описан О.В. Мосиным: «Известно, что наличие в воде ионов металлов (особенно железа Fe^{3+}) и микровключений из ферромагнитных частиц железа Fe_2O_3 интенсифицирует образование коллоидных гидрофобных золей ионов Fe^{3+} с ионами хлора Cl^- и молекулами воды, что может привести к появлению центров кристаллизации, на поверхности которых адсорбируются катионы кальция Ca^{2+} и магния Mg^{2+} , составляющие основу карбо-

натной жесткости воды, и образованию мелкодисперсного кристаллического осадка, выпадающего в виде шлама» [16. С. 21].

Конструкция аппаратов «Магнуст»

Конструктивные различия установок с постоянными магнитами сводятся к варьированию трех основных факторов, которые напрямую влияют на эффективность образования микрокристаллов шлама при заданных значениях температуры воды, состава и концентрации примесей в ней:

- 1) скорость потока жидкости в магнитном поле;
- 2) время прохождения ионов через магнитное поле;
- 3) тип основной составляющей магнитного поля, воздействующего на поток.

Как показано выше, на ионы, содержащиеся в водном потоке, проходящем через торOID, способны воздействовать обе составляющие его магнитного поля: векторная (полоидальная) и потенциальная (градиентная). При этом от конструкции магнитной системы и от организованного в установке потока воды зависит, какая из магнитных составляющих преимущественно воздействует на поток. Можно выделить три различных по конструкции типа магнитных установок:

- 1) с преимущественным воздействием векторной компоненты магнитного поля, когда поток воды движется поперек линий магнитного поля \mathbf{B} ;
- 2) с преимущественным воздействием градиентной компоненты магнитного поля B^* , когда поток воды движется вдоль оси магнитного тороида, расположенного снаружи водовода;
- 3) с одновременным воздействием двух компонент магнитного поля, когда магнитный тороид располагается внутри водовода.

Большинство установок магнитной водоочистки, производимых в настоящее время, можно отнести к первому типу. Однако, как показывает теория и подтверждает многолетняя практика, установки с тороидальными магнитами, расположенными внутри водовода, обладают наибольшей эффективностью. Идею разработки таких систем предложил Г.В. Николаев в 90-х гг. прошлого века [31]. Однако адекватное теоретическое описание процессов, происходящих в магнитных установках, в то время не было дано. К таким установкам относятся аппараты «Декарбон» и «Магнуст» [32–34]. Они отличаются лишь некоторыми конструктивными особенностями.

Магнитная система аппаратов располагается внутри отрезка трубы большего диаметра, чем трубопровод, на котором монтируется установка (рис. 6). Это минимизирует гидравлические потери и обеспечивает номинальную скорость потока через магнитное поле 0,5...1,5 м/с. Корпус врезается в трубопровод при помощи фланцевых или резьбовых соединений.

Экспериментально определенная оптимальная длина области активного магнитного поля составляет 25...30 см. Если установка располагается перед нагревательными устройствами, то температура потока холодной воды обычно меняется в пределах 4...30 °C. Экспериментально установлено, что изме-

нение температуры в этих пределах не оказывает существенного влияния на рассматриваемые процессы.

Расположение нагревательного прибора также не влияет на действие магнитной установки.

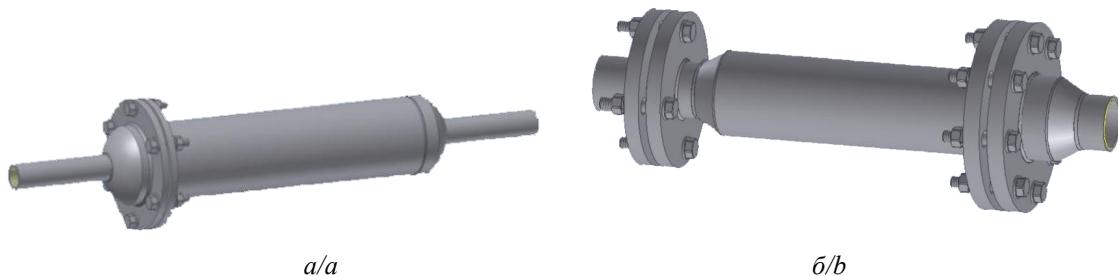


Рис. 6. Установки типа «Магнуст»: а) с фланцевым и резьбовым соединениями; б) с фланцевыми соединениями
Fig. 6. Installations of the «Magnust» type: a) with flange and threaded connections; b) with flanged connections

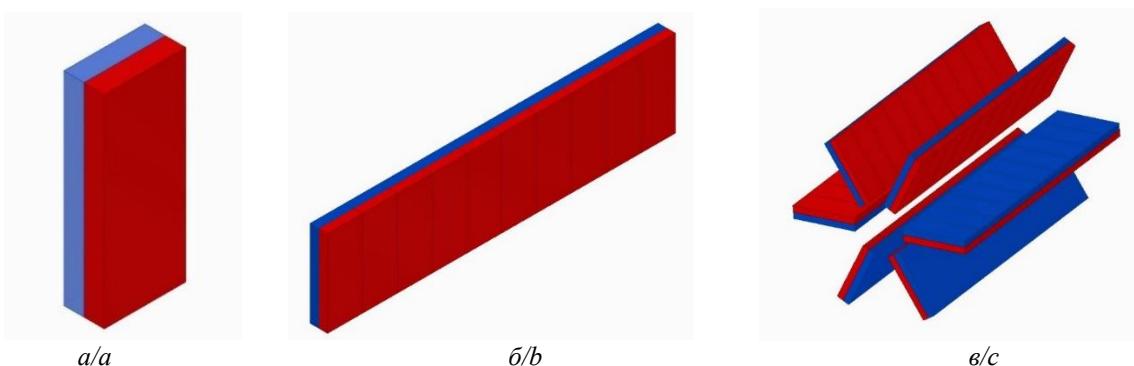


Рис. 7. Сборный модуль из постоянных магнитов: а) отдельный магнит; б) магнитная пластина; в) магнитный модуль
Fig. 7. Assembled permanent magnet module: a) separate magnet; b) magnetic plate; c) magnetic module

Изготовить цельные постоянные тороидальные магниты такой длины технологически сложно, поэтому применяются магнитные модули в виде сборки из магнитов меньшего размера (рис. 7, а). Они за-прессовываются в герметично запаянный кожух из немагнитной листовой нержавеющей стали (рис. 7, б). Модули располагаются в виде звезды (рис. 7, в). Рабочие поверхности лучей такой звезды повернуты друг к другу разными полюсами, то есть образуется магнитный тороид, который индуцирует магнитное поле достаточной индукции в составе двух компонент: B и B^* . Используются современные неодимовые магниты, создающие полоидальное магнитное поле порядка 1 Тл. Их остаточная намагниченность сохраняется в течение десятилетий. Сборка магнитов (рис. 7, в) помещается внутри трубы водовода (рис. 6).

Практика водоподготовки с использованием тороидальных магнитных систем

Пластинчатые теплообменники часто используют в системе ЖКХ в силу высокой эффективности и надежности работы. В то же время они требуют постоянного контроля и ежегодного обслуживания из-за образования накипи (отложения солей жесткости) на поверхностях нагрева. Можно выделить три фактора, которые способствуют этому:

- 1) для нужд горячего водоснабжения в качестве исходной используется холодная вода городской си-

стемы водоснабжения, которая не подвергается умягчению и в ряде регионов России имеет повышенную жесткость;

- 2) особенностью эксплуатации такого теплообменника является переменный расход подогреваемой воды: он уменьшается в период малого или нулевого водоразбора, что приводит к снижению скорости воды в каналах теплообменника;
- 3) пластинчатые теплообменники имеют конструктивно узкие каналы для прохода нагреваемой воды, что приводит к быстрому нарастанию в них отложения солей жесткости.

Установка магнитной обработки воды типа «Магнуст» перед пластинчатым теплообменником исключает образование в нем накипи и значительно снижает затраты на его эксплуатацию. Промышленные испытания установок «Магнуст» (рис. 8), проведенные в достаточном количестве, показали их высокую эффективность. Они обеспечивают безнакипный режим работы пластинчатых теплообменников, применяемых в тепловых узлах домов для подогрева воды с целью горячего водоснабжения по закрытой схеме. Имеется положительный опыт такого применения. В декабре 2009 г. подобная установка «Магнуст», рассчитанная на расход воды 0,5...1,5 м³/ч, установлена перед пластинчатым теплообменником на вводе в 20-ти квартирный жилой дом г. Томска. На сегодняшний момент установка эксплуатируется более 10 лет.

За прошедшее время образование отложений солей жесткости не обнаружено. Ежегодно производится контроль давления воды на входе и выходе пластинчатого теплообменника, повышение давления не об-

наружено. Промывка и механическая чистка с разборкой теплообменника не проводилась ни разу. Эффективность работы теплообменника за эти годы не изменилась.



a/a



b/b

Рис. 8. Магнитная установка «Магнуст»: а) магнитный модуль из 4 пластин; б) магнитный модуль из 12 пластин
Fig. 8. Magnetic installation «Magnust»: a) magnetic module of 4 plates; b) magnetic module of 12 plates

Аналогичный положительный опыт был получен для установок большей производительности на теплообменниках трубчатого типа. Имеются акты применения установок «Магнуст» для предотвращения отложения солей жесткости в системе горячего водоснабжения района «Академгородок» г. Томска (от 5.12.2001), Чебаркульского молочного завода (от 31.05.2002), а также в корпусах санатория «Ключи» г. Томска (от 22.04.2002).

Заключение

Открытие потенциального магнитного поля, изучение его свойств и условий проявления позволяет успешно решать актуальные технические и технологические задачи. Одна из них связана с устранением солеотложений в теплообменниках систем водоснаб-

жения. Теоретически описан эффект разделения положительных и отрицательных ионов солей, содержащихся в водном потоке, за счет дрейфа в поле магнитного тороида. Описаны электрохимические процессы, происходящие в водном потоке, протекающем вдоль оси магнитного тороида с последующим нагреванием. Экспериментально определена оптимальная конструкция аппарата магнитной водоочистки, преимуществами которого являются: максимальная производительность, простота в изготовлении и эксплуатации, низкая себестоимость, длительный срок эксплуатации без изменения технологических свойств. Магнитная водоподготовка не требует применения химических реагентов и является экологически чистой технологией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волькович Ю.М. Емкостная деионизация воды (обзор) // Электрохимия. – 2020. – Т. 56. – № 1. – С. 20–55. DOI: 10.31857/S0424857020010090
2. Ушаков Г.В., Соловьев Г.А., Мочальников С.В. Разработка ингибитора процессов отложений солей жесткости и коррозии в водных средах на основе органического фосфоната для систем оборотного водоснабжения предприятий химической и коксохимической промышленности // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – № 1. – С. 144–148.
3. Рудакова Г.Я., Ларченко В.К., Цирульникова Н.В. Теория и практика применения комплексонов в энергетике // ГУ «Кузбасский центр энергосбережения». URL: <http://www.energosovet.ru/stat77.html> (дата обращения 09.05.2020).
4. Электрохимическая активация: очистка воды и получение полезных растворов / В.М. Бахир, Ю.Г. Задорожний, Б.И. Леонов, С.А. Паничева. – М.: ВНИИМТ, 2001. – 176 с.
5. Костылева С.С., Джумабаев Х.К., Тюсенков А.С. Влияние электрохимической активации воды на солеотложение // Нефтегазовое дело. – 2018. – Т. 16. – № 4. – С. 89–95. DOI: 10.17122/ngdello-2018-4-89-96.
6. A protic salt-derived porous carbon for efficient capacitive deionization: Balance between porous structure and chemical composition / Li Yang, J. She, Li Jiansheng, X. Sun, J. Shen, W. Han, L. Wang // Carbon. – 2017. – V. 116. – P. 21–32.
7. Hydrogen-treated, sub-micrometer carbon beads for fast capacitive deionization with high performance stability / B. Krüner, P. Srimuk, S. Fleischmann, M. Zeiger, A. Schreiber, M. Aslan, A. Quade, P. Volker // Carbon. – 2017. – V. 117. – P. 46–54.
8. Energy-efficient hybrid FCDI-NF desalination process with tunable salt rejection and high water recovery/ S. Choi, B. Chang, J.H. Kang, M.S. Diallo, J.W. Choi // Journal of Membrane Science. – 2017. – V. 541. – P. 580–586.
9. Optimization of sulfate removal from brackish water by membrane capacitive deionization (MCDI) / W. Tang, D. He, C.T. Zhang, D. Waite // Water Research. – 2017. – V. 121. – P. 302–310.
10. Smith K.C. Theoretical evaluation of electrochemical cell architectures using cation intercalation electrodes for desalination // Electrochimica Acta. – 2017. – V. 230. – P. 333–341.
11. Theory of water treatment by capacitive deionization with redox active porous electrodes / F. He, P.M. Biesheuvel, M.Z. Bazant, T.A. Hatton // Water Research. – 2018. – V. 132. – P. 282–291.
12. Su X., Hatton T.A. Electrosorption at functional interfaces: from molecularlevel interactions to electrochemical cell design // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2017. – V. 19. – P. 23570–23584.

13. Su X., Hatton T.A. Redox-electrodes for selective electrochemical separations // Advances in Colloid and Interface Science. – 2017. – V. 244. – P. 6–20.
14. Asymmetric Faradaic systems for selective electrochemical separations / X. Su, K.-J. Tan, J. Elbert, C. Rüttiger, M. Gallei, T.F. Jamison, T.A. Hatton // Energy Environmental Science. – 2017. – V. 10. – P. 1272–1283.
15. Nativ P., Badash Y., Gendel Y. New insights into the mechanism of flow-electrode capacitive deionization // Electrochemistry Communications. – 2017. – V. 76. – P. 24–31.
16. Мосин О.В. Магнитные системы обработки воды. Основные перспективы и направления // Сантехника. – 2011. – № 1. – С. 21–25.
17. Мосин О.В. Конструктивные особенности магнитогидродинамической ячейки для магнитной обработки воды // Энергосбережение и водоподготовка. – 2014. – № 6 (92). – С. 21–26.
18. Николаев Г.В. Электродинамика физического вакуума. Новые концепции физического мира. – Томск: Изд-во НТЛ, 2004. – 700 с.
19. Томилин А.К. Обобщенная электродинамика. Издание второе, переработанное и дополненное. – М.: Изд-во «Триумф», «Лучшие книги», 2020. – 300 с. DOI: 10.32986/978-5-93673-270-6-2020-04
20. Томилин А.К. Потенциально-вихревая электродинамика// Электродинамика и техника СВЧ, КВЧ и оптических частот. – 2012. – Т. 17. – № 1 (46). – С. 169–173.
21. Dubovik V.M., Tosunyan L.A., Tugushev V.V. Axial toroidal moments in electrodynamics and solid-state physics // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 1986. – Т. 90. – С. 590–605.
22. Dubovik V.M., Saha B. Electrodynamics with toroid polarization // Turkish Journal of Physics. – 1999. – V. 23 (7–12). – P. 1065–1074.
23. Talebi N., Guo S., van Aken P.A. Theory and applications of toroidal moments in electrodynamics: their emergence, characteristics, and technological relevance // Nanophotonics. – 2018. – V. 7 (1). – P. 93–110. DOI: 10.1515/nanoph-2017-0017
24. Spaldin N.A., Fiebig M., Mostovoy M. The toroidal moment in condensed-matter physics and its relation to the magnetoelectric effect // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2008. – V. 20. – P. 434203(15). DOI: 10.1088/0953-8984/20/43/434203
25. Dielectric metamaterials with toroidal dipolar response / A.A. Basharin, M. Kafesaki, E.N. Economou, C.M. Soukoulis, V.A. Fedotov, V. Savinov, N.I. Zheludev // Physical Review X. – 2015. – V. 5. – P. 011036 (11). DOI: 10.1103/PhysRevX.5.011036
26. Woodside D.A. Three-vector and scalar field identities and uniqueness theorems in Euclidean and Minkowski spaces // American Journal of Physics. – 2009. – V. 77 (5). – P. 438–446.
27. Arbab A.I., Satti Z.A. On the generalized Maxwell equations and their prediction of electroscalar wave // Progress in physics. – 2009. – V. 2. – P. 8–13.
28. Systems, apparatuses, and methods for generating and/or utilizing scalar-longitudinal waves: Patent № US 9,306,527 B1. Publ. 05.04.2016.
29. Зельдович Ю.Б. Электромагнитное взаимодействие при нарушениях четности// Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1957. – № 33. – С. 1531–1544.
30. Павлова М.Л. Исследование объёмной кристаллизации в магнитном поле // Современные техника и технологии сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых ТПУ. – Томск, 2010. – Т. 3. – С. 196–197. URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2010/C01/V1/092.pdf> (дата обращения 09.05.2020).
31. Николаев Г.В. Устройство для магнитной обработки жидкости. Пат. Рос. Федерации № 2092446, 1997. URL: www.freepatent.ru/patents/2092446 (дата обращения 09.05.2020).
32. Беспалов В.И., Загорнов М.А. Особенности магнитной обработки воды при применении технологии ее обеззараживания гипохлоритом натрия // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – Вып. 2: Труды II-го семинара вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике, Томск, 2001. – С. 180–183.
33. Беспалов В.И., Лапицкий М.Ю., Загорнов М.А. Основные факторы, определяющие эффективность обработки воды на ТЭС магнитными полями // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – Вып. 2: Труды II-го семинара вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике, Томск, 2001. – С. 183–187.
34. Беспалов В.И., Кривошеев В.В., Быстров В.Л. Некоторые результаты практического использования нетрадиционных магнитных систем для обработки воды // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы докладов 6 Всероссийской научно-технической конференции, Томск, 2000. – Т. 1. – С. 78–80.

Поступила 11.05.2020 г.

Информация об авторах

Томилин А.К., доктор физико-математических наук, профессор отделения общетехнических дисциплин Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Беспалов В.И., кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра им. И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Беспалов В.В., кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра им. И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 544.6.018+628.164

WATER MAGNETIC PROCESSING TECHNOLOGY AGAINST SALT DEPOSITION: THEORY AND PRACTICE

Aleksandr K. Tomilin¹,
aktomilin@tpu.ru

Vladimir I. Bespalov¹,
vibsp@tpu.ru

Viktor V. Bespalov¹,
vic@tpu.ru

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

The relevance of this research is determined by the widespread use of water georesources as working fluids in hydro- and heat power engineering, in heat supply and cooling systems. In this case, it is often required to carry out technological water treatment before using in the main production cycle. In particular, water needs to be cleaned of colloidal, scale-forming and gaseous impurities. The greatest difficulty is the water treatment from hardness salts, that is, its softening. Calcium and magnesium salts usually precipitate on heat exchange surfaces with the formation of scale, that leads to a sharp decrease in the efficiency of the heat exchange equipment, excessive fuel consumption and frequent stops for cleaning. Descaling is usually done by acid washing of the internal heat exchange surfaces or mechanically. All these methods involve the use of a large number of chemical reagents, and strongly pollute wastewater from water treatment units. In addition, it significantly increases operating costs.

The purpose of this research is to theoretically describe the electrochemical processes that occur in installations with permanent toroidal magnets when passing a stream of water with hardness salts dissolved in it, as well as to analyze the practical operation experience of such installations.

Objects: toroidal magnetic system, magnetic field, salt ions contained in water, magnetic water treatment units.

Methods: toroidal electrodynamics; experiments on the interaction of toroidal electromagnetic objects; hypotheses about electrochemical processes occurring in a water stream flowing along the axis of a magnetic toroid; experiments to test these hypotheses; theory explaining magnetic water treatment technology; analysis of the «Magnust» apparatus long-term operating.

Results. The paper introduces the theoretical explanation of the magnetic water treatment technology using toroidal magnetic installations and describes the electrochemical processes occurring at the stage of magnetic treatment and the subsequent stage of heating magnetized water. It is shown that ions of different signs drift in mutually opposite directions in the magnetic field presence. For this reason, the formation of calcium and magnesium hydrocarbonate on the heat exchange surface is difficult. As a result, the deposition of carbonates on heated surfaces does not occur. The authors have determined the most effective design of the magnetic installation and its optimal parameters as well. The paper introduces the information on the «Magnust» apparatus operation at several civil and industrial facilities.

Key words:

Electrochemistry, salt deposition, toroidal magnet, magnetic field, magnetic force, magnetic installation.

REFERENCES

1. Volkovich Yu. M. Emkostnaya deionizatsiya vody (obzor) [Capacitive deionization of water (Review)]. *Electrochemistry*, 2020, vol. 56, no. 1, pp. 20–55. DOI: 10.31857/S0424857020010090
2. Ushakov G.V., Solodov G.A., Mochalnikov S.V. Development of an inhibitor of processes of deposition of salts of hardness and corrosion in aqueous media based on organic phosphonate for water recycling systems of chemical and coke industry. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 310, no. 1, pp. 144–148. In Rus.
3. Rudakova G.Ya., Larchenko V.K., Tsirulnikova N.V. Teoriya i praktika primeneniya kompleksionov v energetike [Theory and practice of applying complexones in the energy sector]. State Institution «Kuzbass Center for Energy Saving». Available at: <http://www.energosovet.ru/stat77.html> (accessed 9 May 2020).
4. Bakhir V.M., Zadorozhniy Yu.G., Leonov B.I., Panicheva S.A. *Elektrokhimicheskaya aktivatsiya: ochistka vody i poluchenie poleznykh rastvorov* [Electrochemical activation: water purification and obtaining beneficial solutions]. Moscow, VNIIIMT Publ., 2001. 176 p.
5. Kostyleva S.S., Dzhumabaev H.K., Tusenkov A.S. The effect of electrochemical activation of water on scaling. *Oil and gas business*, 2018, vol. 16, no. 4, pp. 89–95. In Rus. DOI: 10.17122/ngdello-2018-4-89-96.
6. Yang Li, She J., Jiansheng Li., Sun X., Shen J., Han W., Wang L. A protic salt-derived porous carbon for efficient capacitive deionization: Balance between porous structure and chemical composition. *Carbon*, 2017, vol. 116, pp. 21–32.
7. Krüner B., Srimuk P., Fleischmann S., Zeiger M., Schreiber A., Aslan M., Quade A., Volker P. Hydrogen-treated, sub-micrometer carbon beads for fast capacitive deionization with high performance stability. *Carbon*, 2017, vol. 117, pp. 46–54.
8. Choi S., Chang B., Kang J.H., Diallo M.S., Choi J.W. Energy-efficient hybrid FCDI-NF desalination process with tunable salt rejection and high water recovery. *Journal of Membrane Science*, 2017, vol. 541, pp. 580–586.
9. Tang W., He D., Zhang C.T., Waite D. Optimization of sulfate removal from brackish water by membrane capacitive deionization (MCDI). *Water Research*, 2017, vol. 121, pp. 302–310.
10. Smith K.C. Theoretical evaluation of electrochemical cell architectures using cation intercalation electrodes for desalination. *Electrochimica Acta*, 2017, vol. 230, pp. 333–341.
11. He F., Biesheuvel P.M., Bazant M.Z., Hatton T.A. Theory of water treatment by capacitive deionization with redox active porous electrodes. *Water Research*, 2018, vol. 132, pp. 282–291.
12. Su X., Hatton T.A. Electrosorption at functional interfaces: from molecularlevel interactions to electrochemical cell design. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2017, vol. 19, pp. 23570–23584.
13. Su X., Hatton T.A. Redox-electrodes for selective electrochemical separations. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2017, vol. 244, pp. 6–20.
14. Su X., Tan K.-J., Elbert J., Rüttiger C., Gallei M., Jamison T.F., Hatton T.A. Asymmetric Faradaic systems for selective electrochemical separations. *Energy Environmental Science*, 2017, vol. 10, pp. 1272–1283.

15. Nativ P., Badash Y., Gendel Y. New insights into the mechanism of flow-electrode capacitive deionization. *Electrochemistry Communications*, 2017, vol. 76, pp. 24–31.
16. Mosin O.V. Magnetic water treatment systems. The main prospects and directions. *Plumbing*, 2011, no. 1, pp. 21–25. In Rus.
17. Mosin O.V. Design features of a magnetohydrodynamic cell for magnetic treatment of water. *Energy saving and water treatment*, 2014, no. 6 (92), pp. 21–26. In Rus.
18. Nikolayev G.V. *Elektrodinamika fizicheskogo vakuuma. Novye kontseptsiy fizicheskogo mira* [Electrodynamics of physical vacuum. New concepts of the physical world]. Tomsk, NTL Publ. House, 2004. 700 p.
19. Tomilin A.K. *Obobshchennaya elektrodinamika* [Generalized electrodynamics]. Moscow, Triumph Publ. House, 2020. 300 p. DOI: 10.32986/978-5-93673-270-6-2020-04
20. Tomilin A.K. Potensialno-vikhrevaya elektrodinamika [Potentially-vortex electrodynamics]. *Elektrodinamika i tekhnika SVCH, KVCH i opticheskikh chastot*, 2012, vol. 17, no. 1 (46), pp. 169–173.
21. Dubovik V.M., Tosunyan L.A., Tugushev V.V. Axial toroidal moments in electrodynamics and solid-state physics. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1986, vol. 90, pp. 590–605.
22. Dubovik V.M., Saha B. Electrodynamics with Toroid Polarization. *Turkish Journal of Physics*, 1999, vol. 23 (7–12), pp. 1065–1074.
23. Talebi N., Guo S., Van Aken P.A. Theory and applications of toroidal moments in electrodynamics: their emergence, characteristics, and technological relevance. *Nanophotonics*, 2018, vol. 7 (1), pp. 93–110. DOI: 10.1515/nanoph-2017-0017
24. Spaldin N.A., Fiebig M., Mostovoy M. The toroidal moment in condensed-matter physics and its relation to the magnetoelectric effect. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2008, vol. 20, pp. 434203 (15). DOI: 10.1088/0953-8984/20/43/434203
25. Basharin A.A., Kafesaki M., Economou E.N., Soukoulis C.M., Fedotov V.A., Savinov V., Zheludev N.I. Dielectric Metamaterials with Toroidal Dipolar Response. *Physical Review X*, 2015, vol. 5, pp. 011036 (11). DOI: 10.1103/PhysRevX.5.011036
26. Woodside D.A. Three-vector and scalar field identities and uniqueness theorems in Euclidean and Minkowski spaces. *American Journal of Physics*, 2009, vol. 77 (5), pp. 438–446.
27. Arbab A.I., Satti Z.A. On the generalized Maxwell equations and their prediction of electroscalar wave. *Progress in physics*, 2009, vol. 2, pp. 8–13.
28. Hively L. *Systems, apparatuses, and methods for generating and/or utilizing scalar-longitudinal waves*. Patent US no. 306,527 B1, 2016.
29. Zeldovich Yu.B. Elektromagnitnoe vzaimodeystvie pri narusheniyakh chetnosti [Electromagnetic interaction for parity violations]. *Zhurnal eksperimentalnoi i teoreticheskoy fiziki*, 1957, no. 33, pp. 1531–1544.
30. Pavlova M.L. Issledovaniye obemnoy kristallizatsii v magnitnom pole [The study of bulk crystallization in a magnetic field]. *Sovremennye tekhnika i tekhnologii. Sbornik trudov XVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh TPU* [Modern Engineering and Technology. Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists of TPU]. Tomsk, 2010. Vol. 3, pp. 196–197. Available at: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2010/C01/V1/092.pdf> (accessed 9 May 2020).
31. Nikolayev G.V. *Ustroystvo dlya magnitnoy obrabotki zhidkosti* [Device for magnetic fluid processing]. Patent RF no. 2092446, 1997. Available at: www.freepatent.ru/patents/2092446 (accessed 9 May 2020).
32. Bespalov V.I., Zagornov M.A. Features of magnetic treatment of water when using the technology of its disinfection with sodium hypochloride. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2002, vol. 305, no. 2, pp. 180–183. In Rus.
33. Bespalov V.I., Lapitskiy M.Yu., Zagornov M.A. The main factors determining the effectiveness of water treatment at thermal power plants by magnetic fields. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2002, vol. 305, no. 2, pp. 183–187. In Rus.
34. Bespalov V.I., Krivosheyev V.V., Bystrov V.L. Nekotorye rezulaty prakticheskogo ispolzovaniya netraditsionnykh magnitnykh sistem dlya obrabotki vody [Some results of the practical use of non-traditional magnetic systems for water treatment]. *Energetika: ekologiya, nadezhnost, bezopasnost. Materialy dokladov 6 Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Energy: ecology, reliability, safety. Materials of the reports of the 6th All-Russian Scientific and Technical Conference]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2000. Vol. 1, pp. 78–80.

Received: 11 May 2020.

Information about the authors

Aleksandr K. Tomilin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vladimir I. Bespalov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Viktor V. Bespalov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.94:550.4

ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ В УГЛЯХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ФАНДЮШКИНСКОЕ ПОЛЕ (БЕРИНГОВСКИЙ КАМЕННОУГОЛЬНЫЙ БАССЕЙН, ЧУКОТКА)

Скиба Дарья Александровна¹,
dariaskib@bk.ru

Кузеванова Евгения Владимировна²,
e.kuzevanova@oilmsu.ru

Шишов Евгений Павлович¹,
e-shishov@mail.ru

¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского,
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Средний пр., 74.

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Россия, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1.

Актуальность. Изучение возможности комплексной переработки углей Беринговского каменноугольного бассейна на предмет извлечения различных элементов-примесей вызвано необходимостью повышения уровня экономического развития и безопасности Чукотского автономного округа. Это особенно важно в контексте его географического расположения в районе Крайнего Севера и труднодоступности. В настоящее время из-за довольно высокой себестоимости добычи и повышенной зольности (до 30 %) угли нижних пачек месторождения «Фандюшкунское поле» пользуются небольшим спросом на рынке, хотя составляют значительную часть запасов. Потенциальная возможность оценки данных углей еще и с точки зрения наличия попутных полезных компонентов могла бы увеличить ценность добываемого сырья.

Цель: определить перспективность территории на предмет повышенных содержаний элементов-примесей и выявить направления дальнейших исследований.

Объекты: Беринговский каменноугольный бассейн, угленосные отложения позднемелового возраста Алькатваамского угленосного района, месторождение «Фандюшкунское поле» и его фланги.

Методы: отбор проб, построение литологических колонок и разрезов, инструментальный нейтронно-активационный анализ.

Результаты. Данна геохимическая характеристика углей месторождения «Фандюшкунское поле» (Алькатваамский угленосный район, Чукотский автономный округ) на основе данных, полученных с помощью инструментального нейтронно-активационного анализа. Установлено, что в углях месторождения «Фандюшкунское поле» Беринговского каменноугольного бассейна и его флангов концентрации цинка, стронция, гафния, скандия и редкоземельных элементов находятся на уровне минимально-промышленных содержаний в известных типах руд. Данные о содержании некоторых элементов-примесей в углях изученного месторождения публикуются впервые.

Ключевые слова:

Каменные угли, элементы-примеси в углях, редкие металлы, редкоземельные элементы, инструментальный нейтронно-активационный анализ, Чукотка.

Введение

Ископаемые угли относятся к важным концентраторам редких и ценных металлов [1–4]. Современные аналитические методы расширяют возможность изучения механизмов их накопления в угольных месторождениях. Обнаружение рудных концентраций ценных элементов-примесей в углях Чукотки могло бы послужить важным стимулом для экономического развития региона, так как сможет существенно повысить стоимость извлекаемого полезного ископаемого. Это особенно важно для отдаленных северных территорий России со слабо развитой инфраструктурой [5, 6]. В статье приводятся результаты проведенного авторами исследования особенностей распределения элементов-примесей и их концентрации в углях месторождения «Фандюшкунское поле» Беринговского каменноугольного бассейна.

Угленосность

Угленосность Беринговского бассейна связана с чукотской свитой палеоцен-эоценового возраста, ко-

рякской и барыковской свитами позднемелового возраста. В работах [7, 8] описаны три угленосных района: район Бухты Угольной, Алькатваамский, Амаамский, и несколько углерождений. Угли месторождения «Фандюшкунское поле» приурочены к верхней подсвите корякской свиты Алькатваамского угленосного района. Особый интерес представляет угольный пласт «Одинокий». Пласт состоит из двух угольных пачек: Верхняя и Нижняя, которые расщепляются на Верхнюю-1, Верхнюю-2 и Нижнюю-1, Нижнюю-2. Пласт имеет сложное строение с довольно изменчивым количеством и мощностью породных прослоев. Общая мощность пласта местами может достигать 25–28 м [9].

Ранее проведенные исследования

Спектральным анализом в углях месторождения «Бухта Угольная» оценены содержания Pb, Cr, Ni, Sn, Ag, Zn, Co. Высокие содержания (%) характерны для Sr (0,05–0,3), V (0,004–0,06), Ba (0,01–0,03) и Ti (0,1–0,5) [10].

Во время геологоразведочных работ в 2007–2010 и в 2013 гг. были проведены аналитические исследования на содержание в углях попутных полезных компонентов в Амаамском и Алькатваамском угленосных районах Беринговского каменноугольного бассейна. Для Амаамского угленосного района были отобраны пробы I, II, III и IV пластов, для Алькатваамского – пачки Верхняя-1 и Верхняя-2 угольного пласта «Одинокий». Исследования проводились в «Becquerel laboratories» (Канада) и в лаборатории SGS Vostok Limited (г. Новокузнецк). Были использованы следующие методы: нейтронно-активационный, ICP-MS и пробирный. Определялось содержание в сухом угле 28 элементов: Sb, Cs, Cr, Co, F, Au, Mn, V; As, Be, Bi, B, Cd, Cu, Ga, Ge, Pb, Hg, Mo, Ni, Re, Se, Ag, Te, Sn, W, Zn; Pt. Высоких концентраций редких и рассеянных элементов не установлено [7, 8].

Фактический материал и результаты исследования

В 2019 г. для изучения элементов-примесей был выполнен инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА) на 28 элементов (Sm, Ce, Ca, Lu, U, Th, Cr, Yb, Au, Hf, Ba, Sr, Nd, As, Ag, Br, Cs, Tb, Sc, Rb, Fe, Zn, Ta, Co, Na, Eu, La, Sb). Анализ выполнен на базе НИ ТПУ (г. Томск) в лаборатории ядерно-геохимических методов исследования (зав. лаб. А.Ф Судыко). Для анализа было подготовлено 140 штрафных проб. Пробы были отобраны из основных угольных пачек угольного пласта «Одинокий» (рис. 1). Аналитические исследования на содержание элементов-примесей для пачек Нижняя-1 и Нижняя-2 были выполнены впервые.

По результатам анализа была проведена статистическая обработка данных [11–13]. В табл. 1, 2 приведены средние значения, максимальные и минимальные содержания для каждого элемента по каждой отдельной пачке пласта в пересчете на золу.

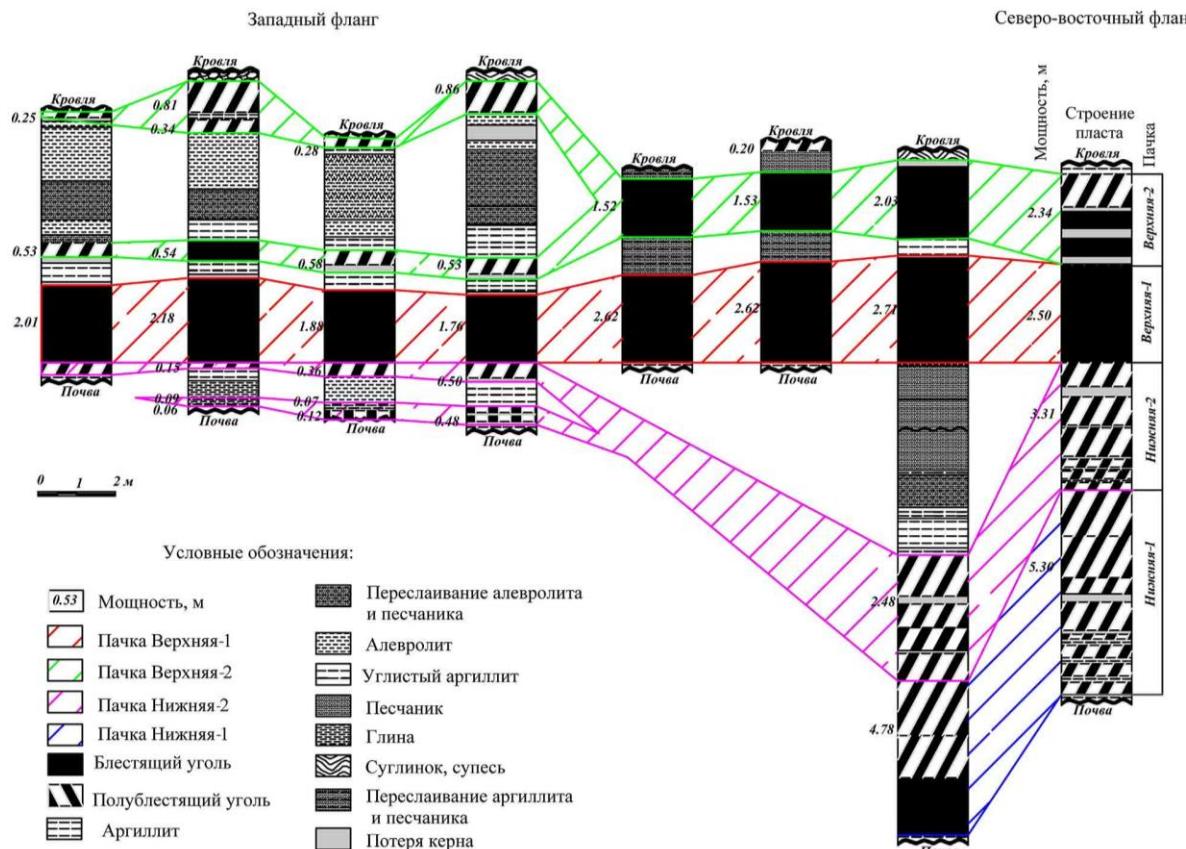


Рис. 1. Литологические колонки опробованных скважин
Fig. 1. Lithology columns of sampled holes

Для оценки уровня концентрации того или иного химического элемента в углях были сопоставлены их содержания с кларками элементов-примесей в золе каменных углей. Это позволило выявить геохимическую специализацию изучаемого угольного бассейна (района), а также обратить внимание на элементы, содержания которых могут достигать промышленных концентраций (рис. 2, 3).

Стронций. В пачках Верхняя-1 и Верхняя-2 средние содержания элемента в золе составляют 424 и

1118 г/т соответственно. Максимальные содержания по отдельным пробам до 1,46 %. В нижних пачках содержания стронция не превышают 58,5 г/т.

Цинк. По всем четырем пачкам пласта среднее содержание цинка от 232 до 709,5 г/т в золе, что составляет от 1,3 (в верхних пачках) до 4 (в нижних пачках) кларков. Максимальное содержание в 1,32 % отмечается в пачке Верхняя-1.

Кобальт. Повышенные средние содержания кобальта приурочены к пачкам Верхняя-1 и Верхняя-2.

Они превышают кларковые значения от полутора до пяти раз и достигают 199 г/т в золе. Максимальное содержание составляет 600 г/т. Для нижних пачек средние содержания не достигают кларковых значений.

Хром. Содержание хрома во всех пачках угольного пласта приближается к околокларковым значениям.

Иттриевая подгруппа редкоземельных элементов – иттербий, тербий, лютей. Суммарное среднее содержание элементов данной подгруппы находится на уровне околокларковых, и только в пачке Нижняя-1 отмечаются высокие концентрации, превышающие кларк в 3 раза (37 г/т в золе). Максимальное содержание в пачке Нижняя-1 составляет 105 г/т. Также стоит отметить повышенное содержание отдельного элемента – иттербия – в пачке Верхняя-2. Оно составляет 13 г/т в золе, что почти в 2 раза выше кларка.

Цериевая подгруппа редкоземельных элементов – самарий, церий, неодим, европий, лантан. Суммарное среднее содержание элементов данной подгруппы распределено по пачкам пласта неравномерно. Наибольшая концентрация приурочена к пачке Нижняя-1, где в среднем составляет 476 г/т в золе (1,5 раза выше кларка). Максимальная концентрация в этой же пачке достигает 2848 г/т. В остальных пачках пласта средние содержания в 1,5–2 раза ниже кларковых.

Гафний. Повышенные содержания гафния отмечаются в пачке Нижняя-1 (в среднем 53 г/т в золе, что в 6 раз выше кларка). Среднее во всех остальных пачках пласта находится на околокларковом уровне и не превышает 13 г/т.

Скандий. Повышенные содержания скандия приурочены к пачкам Нижняя-1 и Нижняя-2 и составляют от 46 до 53 г/т в золе, что примерно в 2 раза превышает кларк. В верхних пачках содержания скандия ниже кларка в 2 раза.

Тантал. Наиболее высокие содержания тантала установлены в пачке Нижняя-1 – в среднем 5,4 г/т, что в 2,5 раза превышает кларк. Максимальное содержание – 51 г/т.

Торий. Среднее содержание тория от 2 до 5 раз ниже, чем кларк, и составляет в среднем от 4,5 до 26 г/т в золе. Максимальное содержание элемента достигает 130 г/т и приурочено к пачке Нижняя-1.

Мышьяк, бром, барий, цезий, уран, рубидий, сурьма. Содержания данных элементов в несколько раз ниже кларковых значений и не представляют промышленного интереса.

Золото, серебро. Повышенных содержаний благородных металлов в пласте не выявлено. Концентрации составляют не более 0,05 и 0,1 г/т в угле соответственно. Отмечаются отдельные ураганные пробы серебра – до 66 г/т в золе.

Таким образом, следует обратить внимание на элементы, выделенные цветом в табл. 1, 2. На рис. 2 приведены элементы, концентрации которых в 1,5–3 раза превышают кларковые значения.

Ввиду того, что для некоторых элементов по отдельным пробам отмечаются ураганные концентрации, не учтенные при расчетах, фактические средние

содержания могут оказаться даже выше, чем приведенные в таблицах, а список микроэлементов с повышенными содержаниями может расширяться [12].

Минимальные промышленные содержания элементов-примесей

Оценка промышленных содержаний элементов-примесей в углях пласта «Одинокий» исследуемого месторождения проводилась на основе сопоставления с *минимальными промышленными содержаниями (МПС)* этих элементов в известных типах руд по [6]. Графически результаты этой оценки приведены на рис. 3.

Таблица 1. Средние, минимальные и максимальные содержания РЭ в изученных углях (в пересчете на золу, г/т)

Table 1. Average, minimum and maximum contents of REE in the studied coal (in terms of the equivalent amount of coal ash, ppm)

	Σ (Sm, Ce, Nd, Eu, La)	Σ (Lu, Yb, Tb)	Пачка/Ply
Кларки Bulk earth values	307,6	10,3	
МПС/MIC***	340 для Σ (Y+РЭ) for Σ (Y+REE)		
Среднее/Avg.	476*	37*	Нижняя-1 Nizhnyaya-1
От/Min	76	7,9	
До/Max	2848	105	
Среднее/Avg.	235	13	Нижняя-2 Nizhnyaya-2
От/Min	111	7,3	
До/Max	384	22	
Среднее/Avg.	317	11	Верхняя-1, северо-восточный фланг Verkhnyaya-1, northeast area
От/Min	26	2,63	
До/Max	3788	174	
Среднее/Avg.	153	5	Верхняя 1, западный фланг Verkhnyaya-1, west area
От/Min	31	1,5	
До/Max	399	21	
Среднее/Avg.	212	17,5	Верхняя-2 Verkhnyaya-2
От/Min	8	3	
До/Max	604	48	

Пачка Верхняя-1 представлена самой большой выборкой проб и самым выдержаным по мощности и простирианию строением. Наибольший интерес с точки зрения МПС здесь могут представлять цинк и стронций. Среднее содержание цинка составляет 709,5 г/т в золе северо-восточного фланга участка и 518 г/т в золе западного фланга участка при МПС, равном 500 г/т. Среднее содержание стронция от 1018 до 1118 г/т в золе при МПС 730 г/т.

Пачка Верхняя-2. С точки зрения оценки МПС пачка на данном этапе исследования не представляет интереса. Тем не менее в будущих работах, посвященных вопросу элементов-примесей в углях Алькатваамского угленосного района, следует обратить внимание на следующий ряд элементов, обладающий повышенными концентрациями: цинк, кобальт и иттербий.

В пачке Нижняя-1 сконцентрировано наибольшее разнообразие элементов-примесей, которые могли бы

представлять промышленный интерес. Легкие и тяжелые РЭ, сумма которых составляет 511 г/т в золе при МПС 340 г/т, скандий, содержания которого

находятся на уровне МПС (53 г/т в золе), а также гафний со средними содержаниями 53 г/т в золе, что почти в 2 раза выше МПС (23 г/т).

Таблица 2. Средние, минимальные и максимальные содержания элементов-примесей в изученных углях (в пересчете на золу, г/т)

Table 2. Average, minimum and maximum contents of trace elements in the studied coal (in terms of the equivalent amount of coal ash, ppm)

Параметр Parameter	Ba	Sr	U	Th	Cr	Sc	Zn	Co	Hf	Ta	Cs	Rb	Sb	As	Br
Кларки/Clarks	980	730	15	23	120	24	170	37	9	2	8	110	7,5	46	32
МПС/MIC***	—	675	100	—	—	50	500	—	23	—	25	71	30	2100	—
Пачка Нижняя-1/Ply Nizhnyaya-1 (зольность/ash 20,6 %)															
Среднее/Avg.	38,5	4	8	26	126	53*	261**	16	53*	5,4**	0,2	2,8	2,5	3,5	11
От/Min	<п.о./thr.	<п.о./thr.	<п.о./thr.	1,2	25	1,7	39	<п.о./thr.	3,4	<п.о./thr.	<п.о./thr.	<п.о./thr.	0,5	<п.о./thr.	<п.о./thr.
До/Макс	595	1624	53	130	318	100	512	40	184,5	51	3,7	66	6,7	14	22
Пачка Нижняя-2/Ply Nizhnyaya-2 (зольность/ash 20,5 %)															
Среднее/Avg.	69	58,5	3,4	11	125	46**	232	36	13	2,2	0,1	0,8	2	1,7	14
От/Min	<п.о./thr.	<п.о./thr.	<п.о./thr.	1,7	43	11	144	10	3,9	<п.о./thr.	<п.о./thr.	<п.о./thr.	0,7	<п.о./thr.	<п.о./thr.
До/Макс	206	1129	9,5	27	258,5	111	427	88	22	6,2	7	37	4,1	4,1	43
Пачка Верхняя-1, северо-восточный фланг/Ply Verkhnyaya-1, northeast area (зольность/ash 6 %)															
Среднее/Avg.	120	1018*	0,2	6	143	17	709,5*	199**	10	0,6	0,2	6,5	5	2,5	8,3
От/Min	<п.о./thr.	<п.о./thr.	<п.о./thr.	1	51,5	2,6	269	5,4	1,1	<п.о./thr.	<п.о./thr.	<п.о./thr.	1,4	<п.о./thr.	<п.о./thr.
До/Макс	1496	6155	24	49	674	265	1517,5	600	35	6,8	28	226,5	19	18	50
Пачка Верхняя-1, западный фланг/Ply Verkhnyaya-1, west area (зольность/ash 8 %)															
Среднее/Avg.	224	1118*	0,1	6,7	102	12	517*	159**	7,7	0,8	0,1	5	3,3	6,6	5,5
От/Min	<п.о./thr.	<п.о./thr.	<п.о./thr.	0,9	52	3,1	139	40,5	1	<п.о./thr.	<п.о./thr.	<п.о./thr.	1,5	<п.о./thr.	<п.о./thr.
До/Макс	1662	14631	9,2	31	212	27	13177	365	42	7,3	1,7	27,5	7,2	22	15
Пачка Верхняя-2/Ply Verkhnyaya-2 (зольность/ash 12,18 %)															
Среднее/Avg.	175	424	2,8	4,5	80	13	311**	60**	4,9	0,5	0,4	2,7	2,5	1,1	6,7
От/Min	8,8	<п.о./thr.	<п.о./thr.	0,4	29	2,7	200	11	0,7	<п.о./thr.	<п.о./thr.	<п.о./thr.	1,0	<п.о./thr.	<п.о./thr.
До/Макс	1617	3053	24	79	245	118	3453	373	80	12	15	143	6,5	13	16

Примечания к таблицам: МПС*** – минимальные промышленные содержания в известных типах руд по [6], ** – повышенные содержания (в 1,5 и более раз выше кларка в золе каменных углей по [14]), * – промышленные содержания, сопоставимые с МПС в известных типах руд, п.о. – порог определения.

Notes: MIC *** – minimum industrial contents according to [6], ** – elevated level (1,5 times or more higher than bulk earth values in bituminous coal ash according [14]), * – industrial contents comparable to MIC in known ore type, thr. – threshold value.

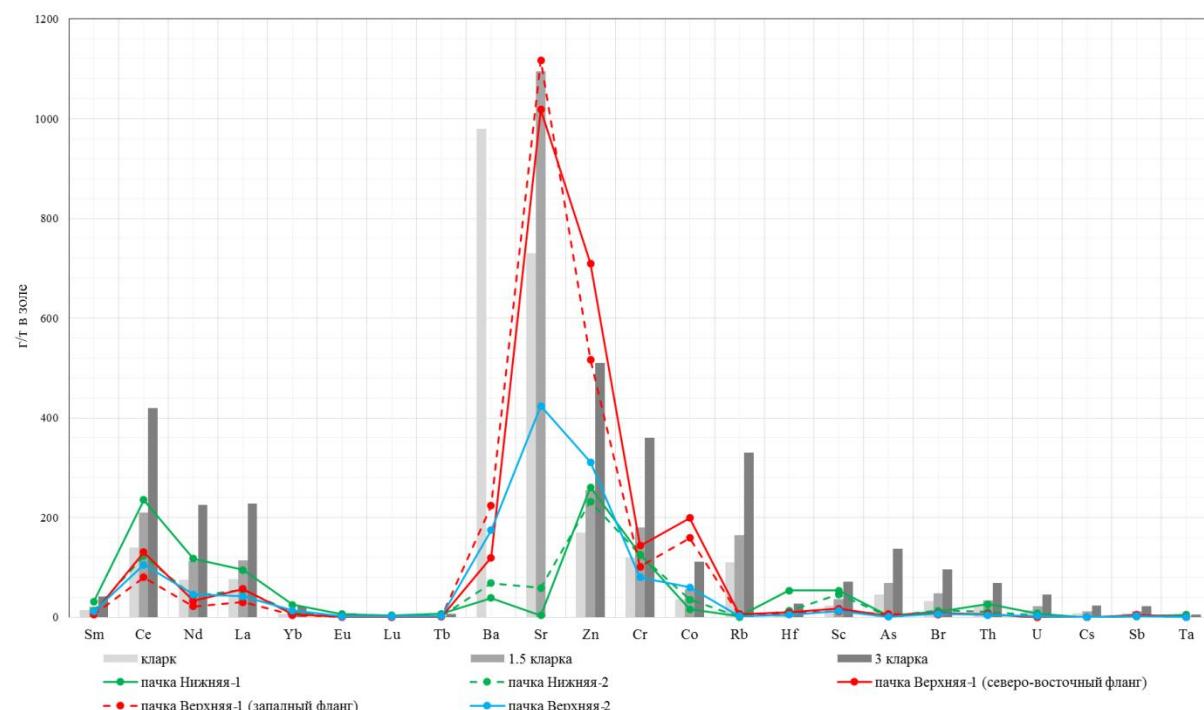


Рис. 2. Сравнение среднего содержания элементов-примесей с кларком в золе каменных углей по [14]

Fig. 2. Comparison of the average content of trace elements with bulk earth values in bituminous coal ash according to [14]

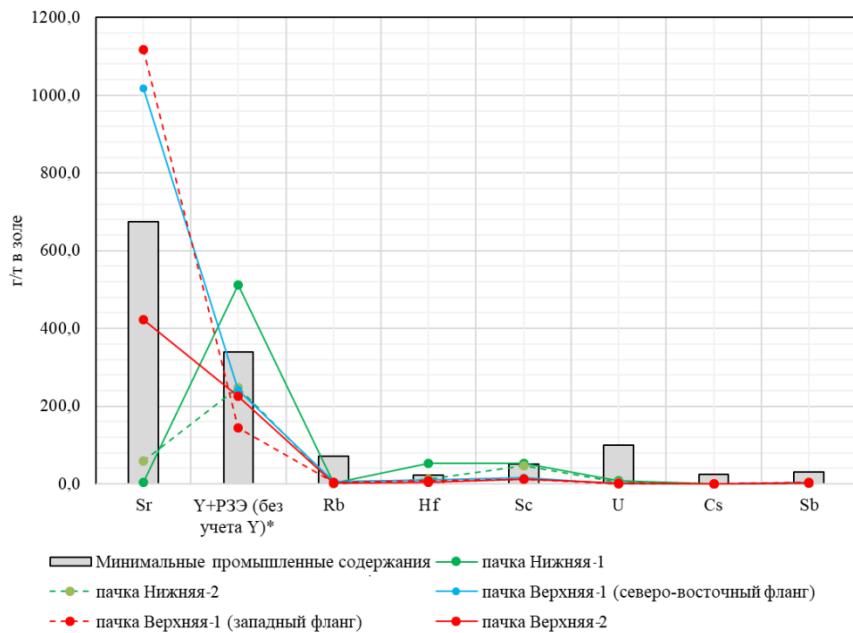


Рис. 3. Сравнительный график средних содержаний элементов-примесей и минимальных промышленных содержаний по [6]

Fig. 3. Comparative graph of the maximum and average contents of trace elements and the minimum industrial contents according to [6]

Пачка Нижняя-2. Группа нижних пачек пласта «Одинокий» имеет значительные отличия от верхних пачек по литологическому строению, по составу и содержаниям элементов-примесей. Для пачки Нижняя-2 нет достаточного количества определений (9 проб) для того, чтобы однозначно установить уровень концентрации элементов-примесей. На данном этапе исследования можно обратить внимание только на скандий, содержания которого приближаются к минимально промышленным и составляют 46 г/т при МПС 50 г/т. В целом при дальнейшем изучении данного вопроса следует учесть схожесть строения нижних пачек, которые могут оказаться аналогичными и по составу элементов-примесей.

Геохимические ассоциации элементов-примесей в углях

На основе корреляционного анализа [11] содержаний элементов-примесей в углях месторождения «Фандюшкинское поле» выделены геохимические ассоциации. Они графически отражены на рис. 4–6, где линиями показаны значимые положительные корреляционные связи (чем толще линия, тем значительнее корреляция).

Учитывая многообразие форм нахождения элементов-примесей в углях, а также предполагая наличие нескольких источников и различных процессов, послуживших их накоплению [15–18], можно предложить изложенную ниже интерпретацию полученных данных.

В пачке Верхняя-2 надежно выделяются три геохимические ассоциации элементов (рис. 4):

- 1) Ассоциация типичных катионогенных лиофилов (Ca, Rb, Cs, Ba) с группой лиофилов с постоянной валентностью (Sc, тяжелых РЭ – Tb, Yb, Lu,

и легких РЭ – Eu, Sm), элементов-халькофилов (Fe, Sb, As) и сидерофила Cr. Из этих элементов с зольностью значимую положительную корреляцию имеет Eu. Элементы в этой ассоциации, вероятно, находятся преимущественно в сорбционной золе [4], образованной из растворенного вещества, поступившего в торфяник извне, а также при растворении минеральных частиц терригенной (и вулканогенной) золы в торфяных водах. Для этих элементов можно предположить наличие микроминеральных форм нахождения, вероятно, связанных с ОВ углей. Также эта ассоциация отражает собственно терригенную золу, сингенетическую торфонакоплению, занесенную в торфяник из воды или воздуха. Наиболее вероятная форма нахождения элементов в терригенной золе – макроминеральная (аллотигенные глинистые минералы, карбонаты, сульфиды, оксиды, акессорные минералы и др.). Для элементов в этой крупной ассоциации характерна криволинейная зависимость от зольности, что указывает на их нахождение в разных генетических классах золы, вероятно, существенно сорбционная зола-носитель и терригенная зола-разбавитель [3].

- 2) Ассоциация легких РЭ (Ce, La, Nd) и крупноионного лиофила Sr, сульфофила Zn и главного элемента – Na. Вероятно, источником элементов ассоциации могли послужить воды поверхностного стока, грунтовые и пластовые воды, гидротермы, питавшие древние торфяные или буроугольные залежи. Криволинейный характер зависимости от зольности предполагает присутствие этих элементов в различных генетических классах золы, при этом терригенная зола углей, вероятно, является разбавителем [19, 20].

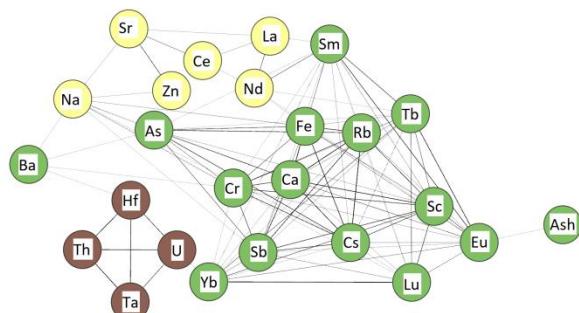


Рис. 4. Геохимические ассоциации элементов-примесей в углях пачки Верхняя-2 пласта «Одинокий». Критическое значение коэффициента корреляции ($N=22$ пробы) при уровне значимости 0,05 составляет 0,42

Fig. 4. Geochemical associations of trace elements in the Verkhnyaya-2 ply of coal seam «Odinokiy». Significant correlation coefficient is 0,42 (for $N=22$, $p=0,05$)

- 3) Ассоциация высокозарядных элементов (Hf, U, Ta, Th), в которой наблюдается отрицательная корреляционная связь с зольностью, существенная у урана. Скорее всего, уран находится в связи с органическим веществом углей. Вероятным источником могла быть кислая или щелочная пироклазика, массивы и дайки гранитов и гранодиоритов в обрамлении угленосного бассейна.

В пачке Верхняя-1 выделяются следующие геохимические ассоциации (рис. 5, показаны связи выше уровня коэффициента корреляции 0,3):

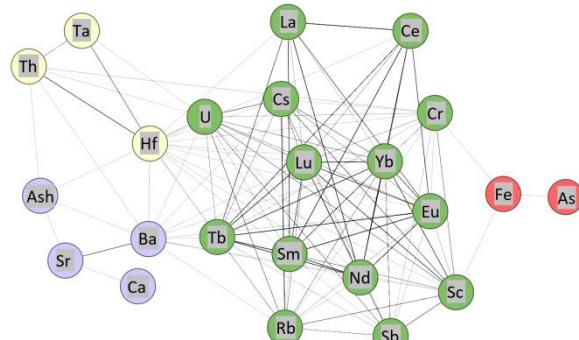


Рис. 5. Геохимические ассоциации элементов-примесей и зольности углей пачки Верхняя-1 пласта «Одинокий». Критическое значение коэффициента корреляции ($N=76$ проб) при уровне значимости 0,05 составляет 0,23

Fig. 5. Geochemical associations of trace elements in the Verkhnyaya-1 ply of coal seam «Odinokiy». Significant correlation coefficient is 0,23 (for $N=76$, $p=0,05$)

- 1) Ассоциация As, Fe, отвечающая сульфидам, при этом у железа отмечается значимая позитивная корреляция с зольностью (0,27).
- 2) Группа высокозарядных элементов (Ta, Th, Hf), где Hf и Th коррелируют с зольностью (0,32), вероятно, указывает на тот же источник этих элементов, что и в пачке Верхняя-2.

- 3) Ассоциация крупноионных лиофилов (Ba, Sr) с зольной (Ash) и Ca интерпретируется как баритовая и карбонатная минерализация, природа которой может быть как сингенетичной угленакоплению, так и эпигенетической [19].

- 4) Группа элементов лиофилов Sc, U, тяжелых РЗЭ (Lu, Tb, Yb), легких РЗЭ (Nd, Sm, Ce, Eu, La), крупноионных лиофилов (Cs, Rb) халькофил Sb при их практически отсутствующей корреляции с зольностью, интерпретируется как группа элементов, присутствующая в сорбционной и терригенной золе, и, вероятно, связанная с одним источником в области сноса, в результате гипергенного разрушения которого в различных формах произошла мобилизация этих элементов.

В нижних пачках (Нижняя-1+Нижняя-2) выделяются следующие геохимические ассоциации (рис. 6, показаны связи выше уровня коэффициента корреляции 0,4):

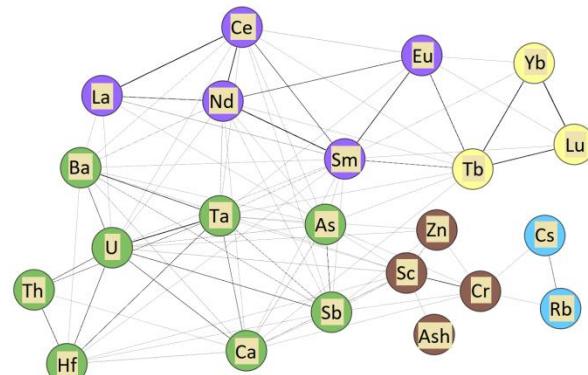


Рис. 6. Геохимические ассоциации элементов-примесей углей пачек Нижняя-1 и Нижняя-2 пласта «Одинокий». Критическое значение коэффициента корреляции ($N=40$ проб) при уровне значимости 0,05 составляет 0,31

Fig. 6. Geochemical associations of trace elements in the Nizhnyaya-1 and Nizhnyaya-2 plies of coal seam «Odinokiy». Significant correlation coefficient is 0,31 (for $N=40$, $p=0,05$)

- 1) Ассоциация тяжелых РЗЭ (Yb, Tb, Lu), имеющих очень сильную корреляцию между собой, по всей видимости, отвечает одному источнику этих элементов и одному механизму накопления в углях. Содержание этих тяжелых РЗЭ в золе углей убывает с увеличением зольности углей, что может отражать их преимущественное нахождение в сорбционной золе. При этом терригенная зола, вероятно, является разбавителем, то есть уменьшает валовое содержание этих элементов в общей золе угля [3].
- 2) Элементы группы Sc, Zn, Cr, учитывая их значимую корреляцию с зольностью (0,38–0,48), предположительно, содержатся в терригенной золе, но также могут быть сорбированы и находиться в комплексах с ОВ.
- 3) Отдельная ассоциация крупноионных лиофилов (Rb, Cs), вероятно, отвечает гидрослюдам.

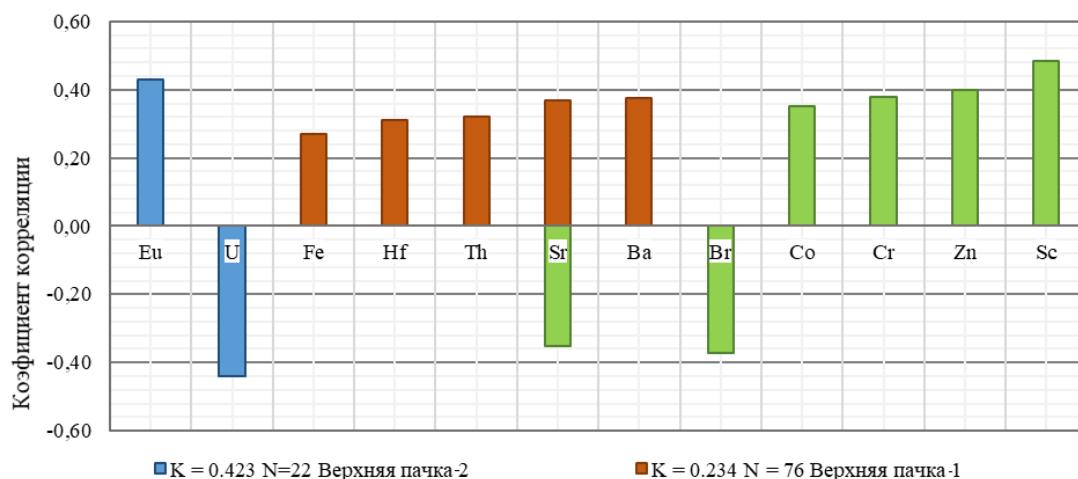


Рис. 7. Корреляция элементов-примесей и зольности для разных пачек пласта «Одинокий»
Fig. 7. Correlation between trace elements and ash content in different plies of the seam «Odinokiy»

Учитывая полученные данные, можно сделать предположения об источнике основных элементов-примесей, которые могут представлять промышленный интерес (цинк, стронций, гафний, скандий и РЗЭ).

Цинк не коррелирует с зольностью в верхних пачках (рис. 7), но достаточно хорошо коррелирует в нижних пачках. Вероятно, цинк может содержаться не только во внешней золе, но и в значительной мере во внутренней. Также это может объясняться сменой фациальных особенностей углеобразования. В верхней пачке цинк идет в связке со стронцием, а в нижней – самостоятельно, в группе транзитных элементов. Условием фиксации цинка в обстановке торфяных болот является подщелачивание среды, а его связь со стронцием может указывать на влияние морских вод на обстановку угленакопления. Накопление в углях Zn могло быть результатом эпигенетических процессов, для которых характерен литологический контроль минерализации.

Стронций имеет корреляцию с зольностью в верхней пачке. В изверженных породах – возможных источниках терригенного стронция, он в основном встречается в плагиоклазах и калиевом полевом шпальте [16]. На рассматриваемой территории это могли быть породы позднемеловой и палеогеновой гранит-гранодиоритовых формаций, расположенные в северо-западном обрамлении Беринговского каменноугольного бассейна (рис. 8). Накопление стронция также могло происходить при трансгрессии моря на прибрежные торфяники [4]. Формирование МПС стронция в углях могло также носить эпигенетический характер.

Скандий. По данным [4] отмечается присутствие скандия в сидеритах, кальцитах и глинистом веществе из углей. В нижних пачках пласта наблюдается множество сидеритовых конкреций, предположительно, с ними могут быть связаны повышенные содержания скандия. Скандий имеет значительную положительную корреляцию с зольностью.

Гафний. Так как этот элемент в нижних пачках не коррелирует с зольностью, то, возможно, он содер-

жится преимущественно в форме $\text{Hf}_{\text{опр}}$. Обогащение большинства углей гафнием сингенетическое и контролируется составом терригенного петрофонда и примесями кислой пирокластики [3]. Гафний в нижних пачках идет в связке с ураном, торием, что может указывать на единый источник поступления элементов.

Редкоземельные элементы, повышенные концентрации которых отмечаются в нижних пачках пласта, не коррелируют с зольностью. Предположительно они могут находиться в углях в органической форме.

Источники элементов-примесей.

Минерагеническая специализация территории Беринговского каменноугольного бассейна

Территория Беринговского каменноугольного бассейна относится к двум минерагеническим провинциям – Берингоморской и Берингоморско-Чукотской. В минерагеническом отношении ведущая роль принадлежит позднемеловому и кайнозойскому магматизму, связанному с раздвиговыми процессами Берингоморского вулканоплутонического пояса [10].

Непосредственно изучаемый район расположен на территории Алькатваам-Варапелинской минерагенической зоны, в ее Алькатваамской части. В целом для нее характерны выходы позднемеловых-палеогеновых угленосных отложений и незначительные проявления рудных полезных ископаемых: позднемеловая золотоносная медно-порфировая формация, палеогеновые оловорудные зоны дробления, мел-кайнозойское ртутьно-сурымяное и вольфрам-ртутное оруденение.

Алькатваам-Варапелинская зона расположена в обрамлении Майницко-Эконайской рудной зоны, богатой на проявления ртути, вольфрама, золота, платины, хрома, меди, сурымы, мышьяка. Можно выделить несколько этапов минерализации. Первый связан с породами позднеюрского-раннемелового офиолитового комплекса (хромитовые платино- и золотоносные руды, собственно золоторудные формации, никелевое оруденение, жильные проявления барита, асбест, поделочные камни).

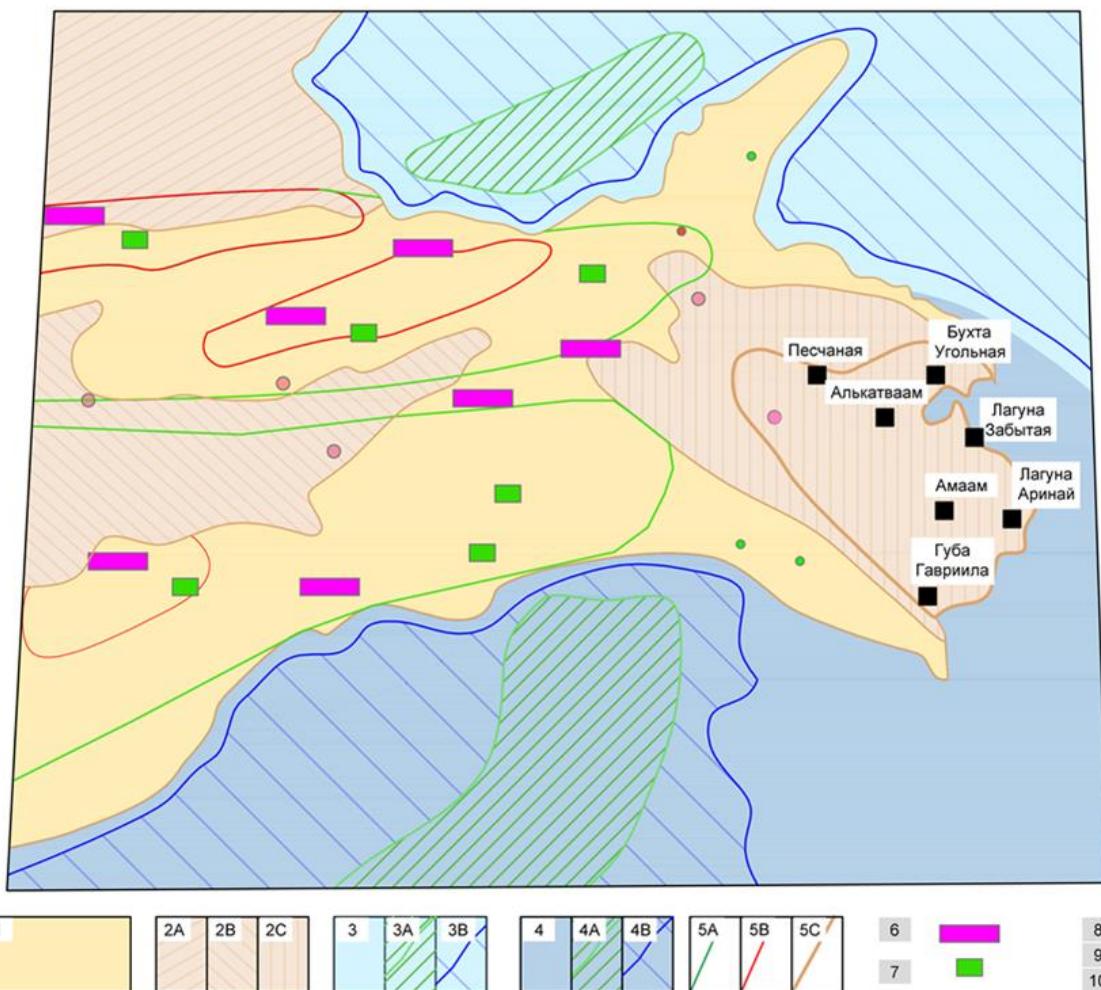


Рис. 8. Обзорная схема минерагенического районирования юго-восточной Чукотки*. Условные обозначения: 1 – Майнинско-Эконайская минерагеническая зона (Hg , W , Au , Pt , Cr , Cu (Sb , As)); 2 – Алькатваам-Варапелинская минерагеническая зона (Au , уголь каменный, Cu , Sn , (Hg , Sb), фрагменты: 2A – Алгано-Великореченский, 2B – Варапелинский, 2C – Алькатваамский; 3 – Анадырская минерагеническая зона (газ, нефть, (уголь бурый, Au ?)): 3A – Поворотно-Телекайская нефтегазоносная зона, 3B – Анадырский нефтегазоносный бассейн; 4 – Хатырская минерагеническая зона (нефть, газ (битум, воды минеральные)): 4A – Угловая нефтегазоносная зона, 4B – Хатырский нефтегазоносный бассейн; 5A – металлогенические зоны с золотым и медным оруденением преимущественно золото-кварцевой и медноколчеданной формаций; 5B – металлогенические зоны с оруденением металлов платиновой группы в хромитовых гипербазитах (предполагаемые); 5C – Беринговский каменноугольный бассейн; Островодужные формации: 6 – Позднеюрская-раннемеловая дунит перидотитовая формация (Cr , Au , Hg , (Pt , Ni , асбест, камни поделочные)); 7 – Позднеюрская-раннемеловая габбровая, раннемеловая плагиогранитовая и габбровая формации (Cu , Zn , Pb , (Au , Mo)); Формации Беринговоморского вулканоплутонического пояса невадийского типа: 8 – Позднемеловая гранодиорит-гранитовая формация (Cu , (Au , Ag , Mo)); 9 – Палеогеновая габбродиорит-габбровая и базальтовая формации (Au); 10 – Палеогеновая гранит-гранодиоритовая формация (Sn). *Примечание: Схема составлена на основе данных [10] с использованием электронных информационных ресурсов ВСЕГЕИ им. Карпинского

Fig. 8. Overview scheme of mineragenic zoning of southeastern Chukotka [10]*. Legend: 1 – Mainitsko-Ekonaysky mineragenic zone (Hg , W , Au , Pt , Cr , Cu (Sb , As)); 2 – Alkatvaam-Varapelinsky mineragenic zone (Au , coal, Cu , Sn , (Hg , Sb), fragments: 2A – Algano-Velikorechensky, 2B – Varapelinsky, 2C – Alkatvaamsky); 3 – Anadyr mineragenic zone (gas, oil, (brown coal, Au ?)): 3A – Povorotno-Telekai petroleum zone, 3B – Anadyr petroleum basin; 4 – Khatyr mineragenic zone (oil, gas (bitumen, water mineral)): 4A – Uglovaya petroleum zone, 4B – Khatyr petroleum basin; 5A – metallogenetic zones with gold and copper mineralization, predominantly gold-quartz and copper-sulphide formations; 5B – metallogenetic zones with mineralization of platinum group metals in chromite ultrabasite rocks (supposititious); 5C – Bering coal basin; Arc formations: 6 – Late Jurassic-Early Cretaceous dunite peridotite formation (Cr , Au , Hg , (Pt , Ni , asbestos, ornamental stones)); 7 – Late Jurassic-Early Cretaceous gabbro, Early Cretaceous plagiogranite and gabbro formations (Cu , Zn , Pb , (Au , Mo)); Formations of the Bering Sea volcano-plutonic belt of the Nevada type: 8 – Late Cretaceous granodiorite-granite formation (Cu , (Au , Ag , Mo)); 9 – Paleogene gabbrodiorite-gabbro and basaltic formations (Au); 10 – Paleogene granite-granodiorite formation (Sn). *Note: The scheme was based on the data [10] using electronic information resources of Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI)

Второй этап связан с позднемеловой-кайнозойской аккрецией, надвиговыми и сбросовыми процессами. Здесь выделяются ртутные, вольфрамово-ртутные оруденения лиственитового типа, сменяющиеся по латерали ртутно-мышьяковым и ртутно-сурьмяным оруденением. Оруденение золотосульфидно-кварцевой формации приурочено к жилам в палеогеновых долеритах [10]. Алькатваамская минерагеническая зона формировалась в условиях островодужной геодинамической обстановки. Она включает в себя среднепалеозойские карбонатно-кремнисто-вулканогенные, триасовые и позднеюрские – раннемеловые вулканогенно-терригенные формации (золото, медь, цинк, свинец – минерагеническая специализация). Данные формации, подстилающие угленосные отложения, могут быть источниками цинка и стронция в углях. Также в зону входят отложения более поздних обстановок Берингоморского вулканоплутонического пояса, внутриконтинентальных межгорных впадин, конъик-палеоценовая молассоидная терригенная угленосная формация. Южная граница Алькатвамской-Варапелинской зоны, по разломам, характеризуется проявлениями ртути. Северо-западная граница – проявлениями золота, никеля и ртути, также по разломам. В северо-западном обрамлении угленосного бассейна выделяется позднемеловая гранодиорит-гранитовая формация со специализацией Cu (Au, Ag, Mo). Не исключено, что данная формация могла послужить источником гафния и РЗЭ в углях. С позднеюрско-раннемеловой дунит-перidotитовой формацией, выделяемой в западном обрамлении бассейна, связаны проявления ртути, золота, никеля и, вероятно, повышенные содержания скандия в исследуемых углях. Широко распространенные гидротермально-метасоматические изменения пород, установленные в районе исследования, среди которых преобладает

карбонатизация, реже сульфидизация и окварцевание, могли значительно повлиять на процессы мобилизации и накопления элементов-примесей в углях месторождения «Фандюшкинское поле» Беринговского каменноугольного бассейна [10].

Заключение

Промышленное значение элементы-примеси могут получить лишь в случае, если их концентрации в продуктах обогащения и переработки угля, а также технология последующего извлечения обеспечивают целесообразность добычи этих компонентов по технико-экономическим показателям [6].

Обобщая вышеизложенную информацию, можно сделать вывод, что четыре отдельные пачки пласта «Одинокий» месторождения «Фандюшкинское поле» достаточно отличаются друг от друга по составу и содержаниям элементов-примесей.

Наличие повышенных концентраций, сравнимых с МПС, предполагается для следующих элементов: в пачке Нижняя-1 – гафний, скандий, сумма редкоземельных элементов (иттербий, тербий, лютеций, самарий, церий, неодим, европий, лантан). В пачке Верхняя-1 – цинк и стронций. Пачка Верхняя-2 отличается повышенными содержаниями цинка, кобальта и иттербия только относительно кларка. Пачка Нижняя-2 – повышенными содержаниями скандия относительно кларка. Таким образом, особое внимание при дальнейших исследованиях следует обратить на угольные пачки Верхняя-1 и Нижняя-1.

Исследование выполнено за счет гранта Российской научного фонда (проект № 18-17-00004).

Авторы благодарят Арбузова Сергея Ивановича и Вялова Владимира Ильича за ценные консультации и помочь в проведении исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Неорганическое вещество углей. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 422 с.
2. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Ценные элементы-примеси в углях. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 538 с.
3. Шишов Е.П., Богомолов А.Х. Многоэлементная металлоносность Корфского и Эчваймского буруоугольных месторождений (Камчатка) // Вестн. Моск. Ун.-та. Сер. 4. Геология. – 2014. – № 6. – С. 70–75.
4. Вялов В.И., Наставкин А.В. Уровни содержания промышленно ценных микроэлементов в углях // Химия твердого топлива. – 2019. – № 5. – С. 63–67.
5. Ценные металлы в углях Арктической зоны России / В.И. Вялов, А.Х. Богомолов, А.В. Наставкин, Е.В. Кузеванова, Е.П. Шишов, А.А. Чернышев // Георесурсы. – 2019. – № 21 (2). – С. 53–62.
6. Угольные месторождения Дальнего Востока России и ресурсный потенциал содержащихся в них ценных металлов / В.И. Вялов, А.Х. Богомолов, Е.П. Шишов, А.А. Чернышев // Георесурсы. – 2017. – Спецвыпуск. – Ч. 2. – С. 256–262.
7. Фандюшкин Г.А., Иванов Н.И., Ломидзе В.С. Геологический отчет с подсчетом запасов и оценкой прогнозных ресурсов угля по результатам оценочных работ на участке Западный Амгаамского каменноугольного месторождения Беринговского бассейна. – Владивосток: Трест Дальнестуглеразведка, 2011. – 267 с.
8. Фандюшкин Г.А. Поисковые работы на участке «Левобережный» Верхне-Алькатваамского месторождения Беринговского
9. Коксующиеся угли Арктической зоны России / В.И. Вялов, А.Б. Гуревич, Г.М. Волкова, Д.А. Скиба, Е.П. Шишов, А.А. Чернышев // Георесурсы. – 2019. – № 21 (3). – С. 111–129.
10. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:000000 (новая серия). Лист Р-60 – мыс Наварин. Объяснительная записка. – СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСГЕИ, 2001. – 162 с.
11. Дэвис Дж.С. Статистический анализ данных в геологии. В 2 кн. / пер. с англ. В.А. Голубевой, под ред. Д.А. Родионова. – М.: Недра, 1990. – Кн. 1. – 319 с.
12. Чини Р.Ф. Статистические методы в геологии / Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 189 с.
13. Conover W.J. Practical nonparametric statistics. 3rd ed. – Australia: John Wiley & Sons, 1999. – 584 p.
14. Ketriss M.P., Yudovich Y.E. Estimations of clarke for carbonaceous biolithes: world averages for trace element contents in black shales and coal // International Journal of Coal Geology. – 2009. – V. 78. – P. 135–148.
15. Wagner N.J., Matiane A. Rare earth elements in select Main Karoo Basin (South Africa) coal and coal ash samples // International Journal of Coal Geology. – 2018. – V. 196. – P. 82–92.
16. Мейсон Б. Основы геохимии / Пер. с англ. – М.: Недра, 1971. – 312 с.
17. Henderson P. Rare earth element geochemistry. – Amsterdam: Elsevier Science, 1983. – 510 p.

18. Killops S.D., Killops V.J. Introduction to organic geochemistry. 2nd ed. – New York: Wiley-Blackwel, 2013. – 408 p.
19. Handbook of geochemistry. Elements Kr (36) to Ba (56). – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1974. – V. 2. – P. 4. – 950 p.
20. Handbook of geochemistry. Elements Cr (24) to Br (35). – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1972. – V. 2. – P. 3. – 897 p.

Поступила 25.11.2020 г.

Информация об авторах

Скиба Д.А., аспирант отдела геологии горючих полезных ископаемых, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского.

Кузеванова Е.В., кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых.

Шишов Е.П., старший научный сотрудник отдела геологии горючих полезных ископаемых, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского.

UDC 553.94:550.4

TRACE ELEMENTS IN THE FANDYUSHKINSKOE POLE COAL DEPOSIT (BERING COAL BASIN, CHUKOTKA)

Daria A. Skiba¹,
dariaskib@bk.ru

Evgenia V. Kuzevanova²,
e.kuzevanova@oilmsu.ru

Evgeniy P. Shishov¹,
e-shishov@mail.ru

¹ A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute,
74, Sredny prospect, St. Petersburg, 199106, Russia.

² Lomonosov Moscow State University,
GSP-1, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia.

Relevance. The study of possibility of complex processing of coals of Bering coal basin for extracting rare metals and various trace elements is caused by the necessity of economic development and improvement of security of the Chukotka Autonomous Region. This is especially important in the context of its geographical location in the Far North and its poor accessibility. Nowadays, due to their relatively high cost of production and increased ash-content (up to 30 %), the coals of the lower members of the Fandyushkinskoe Pole coal deposit are in low demand in the market, although they make up a significant part of the reserves. The potential opportunity to evaluate these coals also for presence of useful additional elements could increase the value of the extracted raw materials.

The aim of the research is to determine the prospects of the territory from the point of view of increased content of trace elements and to identify the areas for the further research.

Objects: the Bering coal basin, Late Cretaceous coal deposits of the Alkatvaam coal-bearing region, the Fandyushkinskoe Pole coal deposit and its flanks.

Methods: samples collection, construction of lithological columns and sections, instrumental neutron activation analysis.

Results. The authors have given the geochemical characteristics of the coals of the Fandyushkinskoe Pole coal deposit (the Alkatvaam coal-bearing region, the Chukotka Autonomous Region) based on the data obtained by instrumental neutron activation analysis. It was discovered that in the coals of the Fandyushkinskoe Pole field deposit of the Bering coal basin and its flanks, concentrations of zinc, strontium, hafnium, scandium and rare earth elements can be at the level of minimum industrial grade in identified types of ores. The data on content of some trace elements in coals of the studied deposit are published for the first time.

Key words:

Coals, trace elements in coal, rare metal, rare-earth elements, instrumental neutron activation analysis, Chukotka.

The research was carried out on account of the grant of the Russian Science Foundation (project no. 18-17-00004).

The authors appreciate S.I. Arbuzov and V.I. Vyalov for valuable advice and assistance in conducting the study.

REFERENCES

1. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Neorganicheskoe veshchestvo ugley* [Inorganic substance of coals]. Yekaterinburg, Ural department of RAS Publ., 2002. 422 p.
2. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Tsennye elementy-primesi v uglyakh* [Valuable trace elements in coals]. Yekaterinburg, Ural department of RAS Publ., 2006. 538 p.
3. Shishov E.P., Bogomolov A.Kh. Multielement metalliferousness of the Korfsky and the Echvayamsky brown coal deposits (Kamchatka). *Journal of Moscow University, ser. 4. Geology*, 2014, no. 6, pp. 70–75. In Rus.
4. Vyalov V.I., Nastavkin A.V. Concentration levels of industrially valuable trace elements in coals. *Solid fuel chemistry*, 2019, no. 5, pp. 63–67. In Rus.
5. Vyalov V.I., Bogomolov A.Kh., Nastavkin A.V., Kuzevanova E.V., Shishov E.P., Chernyshev A.A. Valuable metals in coals of the Russian Arctic Zone. *Georesources*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 53–62. In Rus.
6. Vyalov V.I., Bogomolov A.Kh., Shishov E.P., Chernyshev A.A. Coal deposits of the Far East Russia and resource potential of precious metals contained in them. *Georesources*, 2017, Special issue, P. 2, pp. 256–262. In Rus.
7. Fandyushkin G.A., Ivanov N.I., Lomidze V.S. *Geologicheskiy otchet s podschetom zapasov i otsenok progonznykh resursov uglya po rezulatam otsenochnykh rabot na uchastke Zapadny Amaamskogo kamennougolnogo mestorozhdeniya Beringovskogo basseyna* [Geological report with reserves estimation and assessment of forecasted coal resources based on the results of evaluations at the Western Amaamsky coal deposit of the Bering basin]. Vladivostok, Trest Dalvostuglerazvedka Publ., 2011. 267 p.
8. Fandyushkin G.A. *Poiskovye raboty na uchastke «Levoberezhny» Verkhne-Alkatvaamskogo mestorozhdeniya Beringovskogo kamennougolnogo basseyna. Geologicheskiy otchet s podschetom zapasov i otsenok progonznykh resursov uglya na uchastke «Fandyushkinskoe pole»* [Exploration works at the Levoberezhny site of the Verkhne-Alkatvaamskoe field of the Bering coal basin. Geological report with reserves estimation and estimation of forecasted coal resources at the Fandyushkinskoe Pole field site]. Moscow, OOO «Beringpromugol» Publ., 2013. 455 p.
9. Vyalov V.I., Gurevich A.B., Volkova G.M., Skiba D.A. Shishov E.P., Chernyshev A.A. Coking coals of the Arctic zone of Russia. *Georesources*, 2019, no. 21 (3), pp. 107–124. In Rus.
10. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:000000 (novaya seriya). List R-60 – mys Navarin. Obyasnitelnaya zapiska* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:000000 (new series). Sheet R-60 – Cape Navarin. Explanatory letter]. St. Petersburg, St. Petersburg Map-factory of VSEGEI Publ. house, 2001. 162 p.

11. Davis J.C. *Statistics and data analysis in geology*. 2nd ed. New York, John Wiley and Sons Publ., 1986. 656 p.
12. Cheeney R.F. *Statistical methods in geology for field and lab decisions*. London, Allen and Unwin Publ., 1983. 169 p.
13. Conover W.J. *Practical nonparametric statistics*. 3rd ed. Australia, John Wiley & Sons Publ., 1999. 584 p.
14. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of clarkes for carbonaceous biolithes: world averages for trace element contents in black shales and coal. *International Journal of Coal Geology*, 2009, no. 78, pp. 135–148.
15. Wagner N.J., Matiane A. Rare earth elements in select Main Karoo Basin (South Africa) coal and coal ash samples. *International Journal of Coal Geology*, 2018, no. 196, pp. 82–92.
16. Mason B. *Principles of geochemistry*. 3rd ed. New York, John Wiley and Sons Publ., 1966. 329 p.
17. Henderson P. *Rare earth element geochemistry*. Amsterdam, Elsevier Science Publ., 1983. 510 p.
18. Killops S.D., Killops V.J. *Introduction to organic geochemistry*. 2nd ed. New York, Wiley-Blackwel Publ., 2013. 408 p.
19. *Handbook of geochemistry. Elements Kr (36) to Ba (56)*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Publ., 1974. Vol. 2, P. 4, 950 p.
20. *Handbook of geochemistry. Elements Cr (24) to Br (35)*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Publ., 1972. Vol. 2, P. 3, 897 p.

Received: 25 November 2020.

Information about the authors

Daria A. Skiba, graduate student, A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute.

Evgenia V. Kuzevanova, Cand. Sc., researcher, Lomonosov Moscow State University.

Evgeniy P. Shishov, senior researcher, A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute.

БРОМ В ЛИСТЬЯХ ТОПОЛЯ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ: ПРИРОДНЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОСТУПЛЕНИЯ

Юсупов Дмитрий Валерьевич^{1,2},
yusupovd@mail.ru

Рихванов Леонид Петрович²

Барановская Наталья Владимировна²,
natalya.baranovs@mail.ru

Робертус Юрий Владимирович³,
ariecol@mail.gornyy.ru

Радомская Валентина Ивановна⁴,
radomskaya@ascnet.ru

Павлова Людмила Михайловна⁴,
pav@ascnet.ru

Дорохова Любовь Александровна^{2,4},
liubov.ad@yandex.ru

Судыко Александр Федорович²,
sudykoaf@yandex.ru

¹ Амурский государственный университет,
Россия, 675027, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

³ Институт водных и экологических проблем СО РАН,
Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1.

⁴ Институт геологии и природопользования ДВО РАН,
Россия, 675000, г. Благовещенск, пер. Рёлочный, 1.

Актуальность исследования. Бром является толассофильтным, органофильтным и эссенциальным элементом. Сочетание природно-антропогенных источников рассеяния этого элемента обуславливает комплексность и многофакторность его поступления в окружающую среду, оказывает влияние на особенности накопления и распределения галогена в природных средах. Основное внимание в работе сосредоточено на урбанизированных территориях локального и регионального уровней исследования с источниками эмиссии Br. Пути миграции и биогеохимической аккумуляции брома остаются слабо изученными вопросами.

Цель: определить количественные содержания Br в листьях древесных растений рода тополь (*Populus L.*), произрастающих на урбанизированных территориях юго-востока Евразии, и на основе принципов биогеохимического районирования выявить ореолы Br нагрузки, определить главные факторы их формирования.

Объект и методы. Объектом исследования являлись листья тополя (*Populus L.*). Отбор проб проведен в августе 2015–2018 гг. на территории 50 городов по равномерной сети с шагом 1×1 и 2×2 км. Средний объем выборок в городах составил 30 проб. Всего отобрано 1686 проб листьев тополя. Озоление листьев проводилось методом сухой минерализации в муфельной печи при температуре 450 °C в течение 5 час. Принимались во внимание литературные данные о том, что потери Br в золе, полученной при 400 °C, составляют не более 20 % от расчетной величины. Определение содержания Br и других химических элементов в золе листьев тополя проводилось методом инструментального нейтронно-активационного анализа в ядерно-геохимической лаборатории на исследовательском учебном ядерном реакторе (ИРТ-Т) в Томском политехническом университете. Результаты анализов обработаны методами описательной статистики, кластерного и дискриминантного анализов.

Результаты. Среднее содержание Br в золе листьев тополя урбанизированных территорий составило 56,5±2,1 мг/кг, при разбросе от 0,3 до 1730,1 мг/кг. Медиана – 30,6 мг/кг. Нижнее аномальное содержание Br составило 103,4 мг/кг. Выявлены две сопряженные аномальные бромные биогеохимические области: Кулундинская – природного генезиса, и Северо-Казахстанская – природно-техногенного генезиса. Области объединены в бромную биогеохимическую субпровинцию, впервые описанную в данной работе.

Ключевые слова:

Биогеохимическая индикация, листья тополя, бром, инструментальный нейтронно-активационный анализ, урбанизированная территория.

Введение

Br – редкий, летучий, токсичный неметалл; относится к группе редких и рудных p-элементов, общей особенностью которых является низкая распространенность в земной коре. Кларки Br составляют для литосферы – 2,4 г/т, для биосферы – 26 г/т, для гидросферы – 67 г/т. По геохимическим свойствам Br относят к био-, атмо- и гидрофильтным элементам, а по минералого-геохимическому поведению в земной ко-

ре – к литофильтным и галогенофильтным [1]. Основными накопителями Br являются осадочные породы, особенно илы соляных озер. В рассолах артезианских бассейнов содержание Br достигает 0,4 %. Области накопления Br находятся в аридных и semiаридных климатических зонах и связаны с эвапоритами. Собственные минералы – бромиды – Br образует редко [2], в основном встречается в виде изоморфной примеси в минералах-галоидах: галите, сильвините, кар-

наллите, бишофите, присутствует в арагоните, сорбируется $\text{Ca}_{\text{опр}}$. В морской воде содержание Br на 2–3 порядка выше, чем в пресных водах; повышенное его содержание наблюдается и в атмосферных осадках прибрежных морских территорий [3, 4]. Для углей Br является органофильтным и типоморфным элементом за счет обогащения из формирующей их растительности – кларк Br в бурых углях – $4,4 \pm 0,8 \text{ г/т}$, в золе – $32,0 \pm 5 \text{ г/т}$; в каменных углях – $6,0 \pm 0,8 \text{ г/т}$, в золе – $32,9 \text{ г/т}$ [5]. В растениях средние содержания Br одни из самых высоких и могут достигать, например, для морских растений 740 мг/кг , наземных – 15 мг/кг . Даже в культурных наземных растениях природное содержание Br варьирует от $0,002$ до 120 мг/кг [1].

Технофильтность Br высокая – $1,5 \times 10^9$ [1], при этом с экогеохимических позиций и по биозначению Br характеризуется слабой изученностью. Содержание Br в окружающей среде увеличивается за счет промышленных выбросов, работы автотранспорта, сжигания органического топлива [6–9]. Аэротехногенная эмиссия Br наблюдается при различных технологиях сжигания углей [5]. На тепловых электростанциях при пылеугольном сжигании Br концентрируется в тонкой фракции золы уноса, минуя электрофильтры, что свидетельствует о его переходе в газовую фазу. При низких температурах озоления (120°C) от исходного содержания Br теряется 47 – 85% , тогда как в золе, полученной при 400°C , остаточное количество Br составляет порядка 80% от расчетной величины. При 800°C Br уходит из золы практически полностью – на 98 – 100% [10]. Около 80% промышленного производства брома приходится на его органические соединения [11], которые, попадая в окружающую среду даже в малых концентрациях, обладают общетоксическим, эмбриотропным, гонадотропным, мутагенным действием [12–16].

Таким образом, на локальных территориях может наблюдаться загрязнение окружающей среды бромсодержащими соединениями [17]. При этом многие аспекты формирования атмогеохимических бромных аномалий до сих пор остаются недостаточно изученными.

При мониторинге состояния окружающей среды урбанизированных территорий хорошим биогеохимическим индикатором могут служить листья тополя [18–22]. Сорта, гибриды, клонсы тополя бальзамического широко используются для защитных и озеленительных насаждений в промышленных, селитебных и рекреационных зонах городов из-за его устойчивости к задымлению, высокой способности к газообмену и пылеподавлению. Известно, что листья тополей, произрастающих на урбанизированных территориях, содержат в 26 – 60 раз больше Br по сравнению с таковыми из пригородов [23]. На преимущественно воздушный путь миграции и биоаккумуляции Br косвенно указывает тот факт, что в листьях растений Br содержится больше, чем в других органах, и концентрация элемента при этом не зависит от типа почв, его содержания в почвах, величины pH [24].

Цель работы – определить количественные содержания Br в листьях древесных растений рода тополь

(*Populus* L.), произрастающих на урбанизированных территориях юго-востока Евразии, и на основе принципов биогеохимического районирования выявить ореолы Br нагрузки, определить главные факторы их формирования.

Материалы и методы исследования

Полевые исследования проводили на территории 50 городов юга Азиатской части России и северо-востока Казахстана в период с 2013 по 2018 гг. по единой стандартной методике [25]. Объектом исследования служили листовые пластинки тополя трех видов: черного (*Populus nigra* L.), душистого (*Populus suaveolens* Fisch.) и бальзамического (*Populus balsamifera* L.).

Отбор проб листьев проводили с августа по сентябрь: в крупных городах и городах-миллионниках – по площадной сети $2 \times 2 \text{ км}$; в малых и средних городах – $1 \times 1 \text{ км}$. Отбор проб в каждом городе производился в течение одного дня. Листья отбирали по окружности кроны на высоте 2 – $2,5 \text{ м}$ с одновозрастных деревьев одного вида в ясную погоду, паковали в пакеты из влагопрочной бумаги. Всего было отобрано 1686 проб, из которых 90% представлены листьями тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.).

Подготовка проб к анализу заключалась в двухэтапной сухой минерализации (озолении) листьев: высушеннную биомассу первоначально обугливали в фарфоровых чашках на электроплитке до прекращения выделения дыма; полученную золу переносили в тигли и затем прокаливали в электропечи – 2 часа при постепенном повышении температуры от 250 до 450°C (50°C через 30 минут) и 3 часа при постоянной температуре 450°C [26]. В результате получали золу белого или светло-серого оттенка, которую после остывания дополнительно растирали в агатовой ступке.

Для определения содержания Br и других элементов в золе листьев тополя использовали метод инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) на тепловых нейтронах [27]. Методика ИНАА заключается в облучении исследуемых проб потоком тепловых нейтронов в реакторе и последующем измерении наведенной активности на гаммаспектрометре с полупроводниковыми детекторами. Метод является неразрушающим, не требующим химической подготовки пробы, обладает высокой чувствительностью и точностью в диапазоне содержаний от $n^{-1} \%$ до $n \cdot 10^{-8} \%$. Помехи от матричных или других элементов могут быть исключены или нивелированы варьированием продолжительности облучения и охлаждения.

ИНАА проводили в аккредитованной ядерно-геохимической лаборатории (аттестат аккредитации № RA.RU.21AB27) на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т в Национальном исследовательском Томском политехническом университете по аттестованным методикам (НСАМ ВИМС № 410-ЯФ). В капсулы из алюминиевой фольги марки А-995 помещали навески золы (по $100 \pm 1 \text{ мг}$) исследуемых образцов и золу листьев березы ЛБ-1 в качестве эталона

(8923–2007); заполненные капсюли переносили в контейнер для облучения. Продолжительность облучения проб в канале реактора составляла 20 часов с плотностью потока тепловых нейtronов порядка $1 \cdot 10^{13}$ нейtron/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$. Аттестованное значение концентрации Br в стандартном образце ЛБ-1 – $3,2 \pm 0,4$ мг/кг; погрешность определения содержания элементов не более 30 %.

Результаты ИНАА обрабатывали методами описательной статистики, корреляционного, кластерного и дискриминантного анализов.

Результаты и их обсуждение

Среднее содержание Br в золе листьев тополя во всей выборке (1686 проб) составило $56,5 \pm 2,1$ мг/кг (медиана – 30,6 мг/кг) при разбросе значений от 0,3 до 1730,1 мг/кг. Медианное значение принято за средний региональный уровень содержания Br. Установлен ло-

гарифмически нормальный закон распределения содержания Br в выборке. Проверку соответствия распределения Br гипотезе логнормального закона производили по показателям асимметричности и эксцесса. За нижнее аномальное значение принято произведение среднего геометрического и стандартного множителя [28]. Нижнее аномальное содержание Br составило 103,4 мг/кг. Принята следующая градация показателей содержаний Br: менее 30 мг/кг – ниже регионального уровня; 30–99 мг/кг – средний и выше регионального уровня, но ниже аномального содержания; 100–200 мг/кг – аномальный уровень; более 200 мг/кг – максимальный аномальный уровень содержаний.

Уровни накопления Br в золе листьев тополя на исследованных урбанизированных территориях северо-востока Казахстана и азиатской части России показаны на рис. 1.



Рис. 1. Территория исследования. Распределение содержания брома в листьях тополя на урбанизированных территориях северо-восточного Казахстана, юга Сибири и Дальнего Востока

Fig. 1. Study area. Distribution of bromine content in poplar leaves in the urbanized territories of north-eastern Kazakhstan, Siberia and the Far East

На региональном уровне четкой зависимости (геохимической зональности) в распределении диапазона средних содержаний Br в золе листьев тополя, простирающихся на исследованных урбанизированных территориях, не выявлено. На этих территориях, находящихся в диапазоне среднего уровня содержаний Br, зафиксированы локальные биогеохимические аномалии (указаны максимальные содержания в выборке в мг/кг): Тюмень (793,3), Омск (407,0), Новосибирск (152,9), Томск (159,6), Северск (520,7), Барнаул (146,0), Бийск (149,7), Кемерово (643,3), Новокузнецк (178,5), Красноярск (595,4), Ачинск (175,9), Кызыл (173,4), Ангарск (243,4), Иркутск (296,0), Закаменск (185,3), Улан-Удэ (152,9), Чита (537,4), Краснокаменск (953,3), Благовещенск (298,3), Комсомольск-на-Амуре (200,0), Владивосток (111,6). Аномалии Br локализованы в зонах влияния крупных теплоэлектростанций, работающих на угле (Барнаул, Чита, Комсомольск-на-Амуре и др.); пространственное распределение аномальных концентра-

ций согласуется с летними розами ветров (рис. 2, I-II), что свидетельствует о преимущественно аэротехногенном характере их формирования.

Высококонтрастные локальные аномалии Br также выявлены вблизи крупных транспортных узлов – авто-, железнодорожного и авиационного транспорта (Тюмень, Иркутск, Улан-Удэ и др.) (рис. 2, III-IV). По литературным данным отмечены высокие уровни накопления Br в атмосферном воздухе вблизи автодорог [29], а также в сугревом покрове вблизи аэропортов [30]. Известно, что в качестве антидетонационной добавки к авто- и авиатопливу используют дигромэтан [4].

Средние содержания Br выше нижнего аномального уровня зафиксированы на территориях приграничных городов Алтайского края (Славгород, Яровое, Рубцовск, Горняк) и сопредельных территориях Казахстана – Павлодарской (Экибастуз, Павлодар) и Восточно-Казахстанской областей (Усть-Каменогорск).

Максимальное среднее и фактическое содержание Br установлено в г. Яровое – 393,0 и 1730,1 мг/кг соответственно. Урбанизированные территории с аномальным средним уровнем содержания Br выделены в Кулундинскую и Северо-Казахстанскую биогеохимические области и объединены в единую

бромную биогеохимическую субпровинцию. Для сравнительного анализа были получены статистические параметры аномальных средних содержаний Br в золе листьев тополя ряда городов выделенной биогеохимической субпровинции и общей выборки проб, которые представлены в табл. 1.

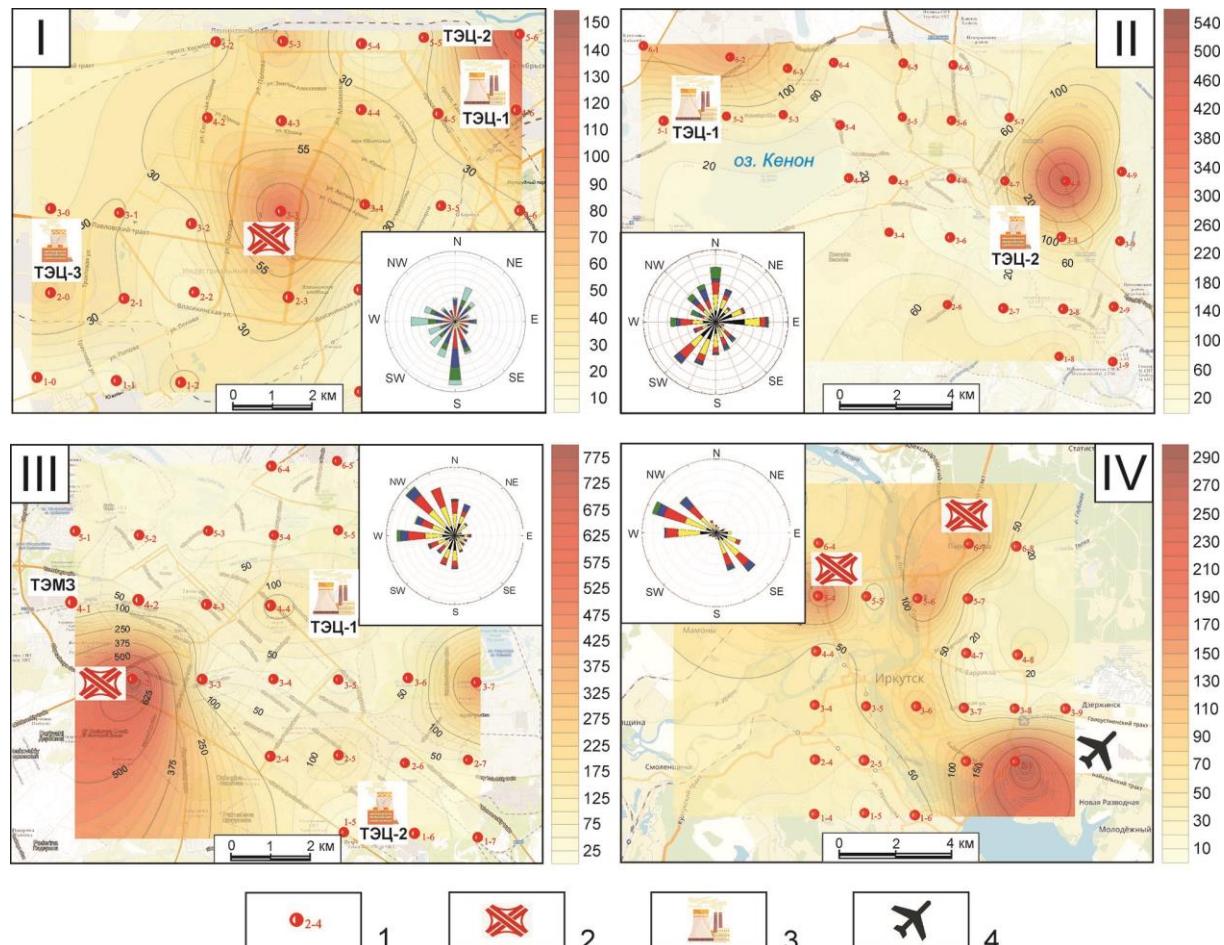


Рис. 2. Биогеохимические ореолы брома на территории городов: Барнаула (I), Читы (II), Тюмени (III), Иркутска (IV), по данным опробования листьев тополя. Условные обозначения: 1 – точки отбора проб и их номера, 2 – развязки автомагистралей, 3 – теплоэлектростанции, 4 – аэропорт. Врезки – летние розы ветров, соответствующие сезону отбора проб. Изолинии содержания брома в золе листьев – в мг/кг

Fig. 2. Biogeochemical halos of bromine on the territory of cities: Barnaul (I), Chita (II), Tyumen (III), Irkutsk (IV), according to the sampling of poplar leaves. Legend: 1 – sampling points and their numbers, 2 – highway junctions, 3 – thermal power plants, 4 – airport. The insets are summer wind roses corresponding to the sampling season. Isolines of bromine content in leaf ash – in mg/kg

Таблица 1. Статистические параметры содержания Br (мг/кг) в золе листьев тополя

Table 1. Statistical parameters of bromine content (mg/kg) in the ash of poplar leaves

Территория/город/Territory/City	N	X $\pm\lambda$	X _{геом}	Me	Min-Max	S	V
Горняк/Gornjak	16	124,8 \pm 20,5	103,9	112,9	48,7...323,3	81,9	66
Рубцовск/Rubtsovsk	19	119,6 \pm 21,2	91,0	96,7	17,6...396,4	92,3	77
Славгород/Slavgorod	12	114,2 \pm 16,1	100,7	112,8	36,1...214,0	55,7	49
Яровое/Yarovoje	9	393,0 \pm 177,6	186,3	203,7	23,8...1730,1	532,8	136
Павлодар/Pavlodar	27	144,1 \pm 12,5	129,7	135,6	47,5...279,8	64,9	45
Экибастуз/Ekibastuz	42	186,5 \pm 12,5	168,7	178,7	66,6...386,3	82,0	44
Усть-Каменогорск/Ust-Kamenogorsk	101	128,7 \pm 8,2	110,9	110,8	21,1...630,9	81,5	63
Бромная субпровинция/Bromine subprovince	226	150,0 \pm 9,2	121,4	124,4	17,6...1730,1	137,8	92
Юг Сибири и ДВ/South Siberia and Far East	1686	56,5 \pm 2,1	29,0	30,6	0,3...1730,1	85,8	152

Примечание: N – количество проб в выборке, X $\pm\lambda$ – среднее арифметическое \pm ошибка среднего, X_{геом} – среднее геометрическое, Me – медиана, S – стандартное отклонение, V – коэффициент вариации (%).

Note: N – number of samples, X $\pm\lambda$ – arithmetic mean \pm error of the mean, X_{геом} – geometric mean, Me – median, S – standard deviation, V – coefficient of variation (%).

Проведенный кластерный анализ показателей всей выборки и бромной биогеохимической субпровинции

позволил выделить ассоциации химических элементов и характер связи некоторых из них с Br (рис. 3).

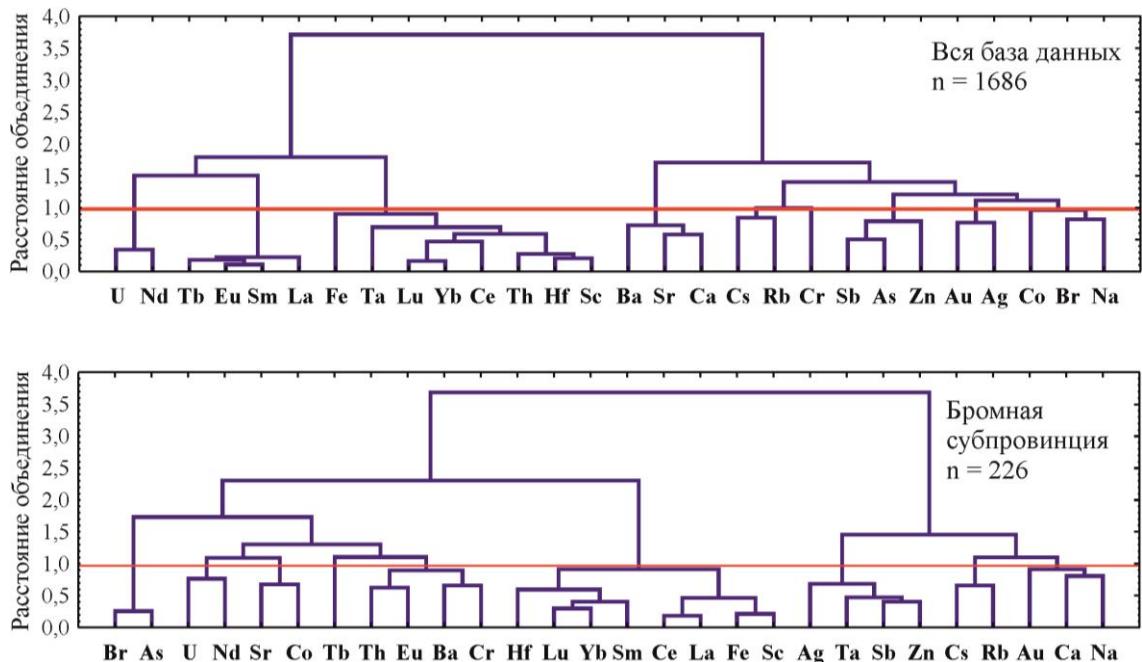


Рис. 3. Дендрограммы корреляционных матриц геохимического спектра элементов в золе листьев тополя выборок на территории юга Сибири и Дальнего Востока (сверху) и бромной биогеохимической субпровинции (снизу); (Метод Варда, 1-Pearson $r(0,05)=0,99$; n – объем выборки)

Fig. 3. Dendrogram for correlation matrix of geochemical spectrum of elements in the ash samples of the poplar leaves on the South of Siberia and the Far East territory (above) and of bromine biogeochemical subprovince (bottom); (Ward's Method, 1-Pearson $r(0,05)=0,99$; n – number of samples)

Дендрограммы показывают, что в общей выборке существует несколько групп элементов, имеющих тесное геохимическое родство и образующих значимые ассоциации: 1 – U, Nd; 2 – Tb, Eu, Sm, La; 3 – Fe, Ta, Yb, Lu, Ce, Th, Hf, Sc; 4 – Ba, Sr, Ca; 5 – Cs, Rb; 6 – Sb, As, Zn; 7 – Au, Ag; 8 – Br, Na. В бромной биогеохимической субпровинции характер связи между элементами несколько отличается, наблюдаются следующие геохимические ассоциации: 1 – Br, As; 2 – Sr, Co; 3 – Th, Eu, Ba, Cr; 4 – группа редкоземельных и рассеянных элементов с железом; 5 – Ag, Ta, Sb, Zn; 6 – Ca, Na. Связи U–Nd и Cs–Rb неизменны.

Для поиска и оценки параметров (содержания спектра химических элементов), по которым группа выборок с аномальным содержанием Br отличается от других территорий, а также для их классификации нами был использован дискриминантный анализ. По результатам дискриминантного анализа установлено, что по рассчитанным коэффициентам канонических переменных все исследованные территории в пределах бромной биогеохимической субпровинции уверенно выделяются содержаниями Ca и Br (табл. 2).

В пределах бромной субпровинции по значениям дискриминантной функции в координатах многомерных канонических переменных проведена классификация выборок с аномальным средним уровнем содержания Br. Результат представлен на рис. 4.

Таблица 2. Факторная структурная матрица канонических переменных элементного состава золы листьев тополя на территории городов в пределах бромной биогеохимической субпровинции

Table 2. Factorial structural matrix of canonical variables of the elemental composition of poplar leaves ash in the cities within the bromine biogeochemical sub-province

Элемент Element	Каноническая переменная 1 Canonical variable 1	Каноническая переменная 2 Canonical variable 2	Элемент Element	Каноническая переменная 1 Canonical variable 1	Каноническая переменная 2 Canonical variable 2
Na	0,30	-0,30	Ba	-0,33	0,11
Ca	0,51	-0,20	La	0,36	0,49
Sc	-0,07	0,40	Ce	-0,34	-0,19
Cr	0,04	0,48	Nd	0,09	-0,02
Fe	0,25	-0,06	Sm	-0,79	-0,06
Co	-0,16	0,32	Eu	-0,05	-0,05
Zn	0,07	-0,23	Tb	-0,02	-0,23
As	-0,02	-0,71	Yb	0,07	-0,07
Br	-0,22	0,57	Lu	0,00	-0,10
Rb	0,13	-0,18	Hf	-0,18	0,00
Sr	-0,26	0,00	Ta	0,07	-0,08
Ag	-0,04	-0,03	Au	0,05	-0,12
Sb	0,33	-0,03	Th	-0,07	-0,36
Cs	0,28	0,12	U	-0,17	0,31

Примечание: жирным (красным) шрифтом выделены максимальные положительные значения канонических переменных для кальция и брома.

Note: bold (red) font indicates maximum positive values of canonical variables for calcium and bromine.

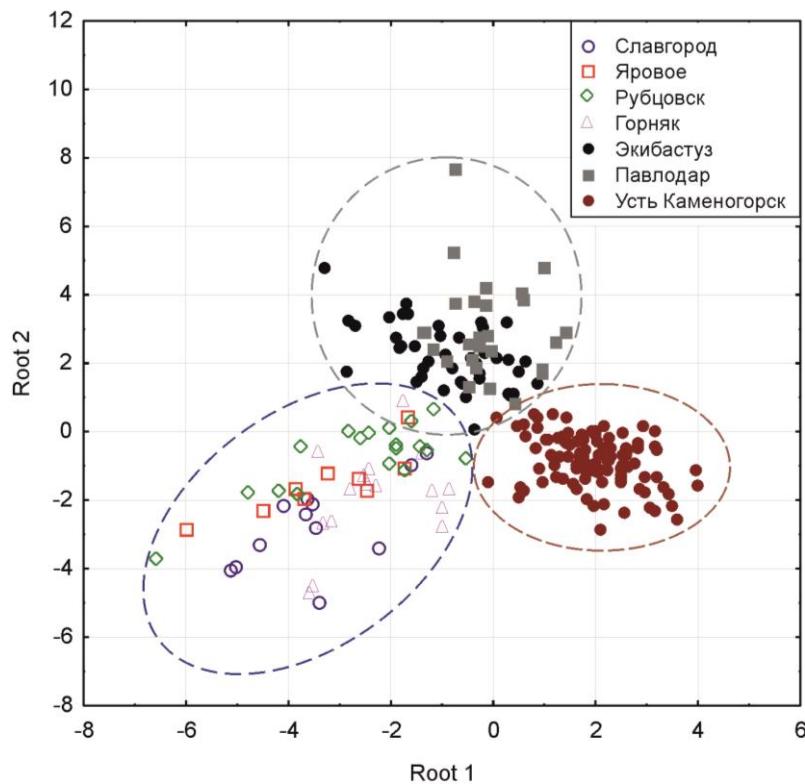


Рис. 4. График рассеяния канонических значений для канонических корней элементного состава золы листьев тополя на территории городов в пределах бромной биогеохимической субпровинции

Fig. 4. Graph of scattering of canonical values for canonical roots of the elemental composition of the ash of poplar leaves in urban areas within the bromine biogeochimical subprovince

Существенно отличаются друг от друга по химическому составу золы листьев тополя три группы городов: 1) Славгород, Яровое, Рубцовск, Горняк; 2) Экибастуз, Павлодар; 3) Усть-Каменогорск. Первая группа расположена на территории Кулундинской бромной биогеохимической области; вторая и третья – на территории Северо-Казахстанской бромной биогеохимической области. Проанализированы и выявлены главные факторы, источники аномальных содержаний Br в каждой из областей.

В границах выделенной нами Кулундинской аномальной бромной области опробованы территории населенных пунктов: Славгород, Яровое, Горняк, Рубцовск, расположенных на юго-западе Алтайского края, в пределах лесостепной и степной ландшафтных зон с semiаридным климатом. В городах Славгород и Яровое в золе листьев тополя установлена значимая (95 %) парная корреляционная связь Br с содержанием As; отрицательная корреляционная связь – с U. В г. Горняк выявлена значимая парная положительная корреляционная связь Br с Na и U; в г. Рубцовск – положительная корреляционная связь с Na, отрицательная – с Zn. Города Славгород и Яровое находятся в пределах Кулундинской степи (аллювиальной равнины), а Горняк и Рубцовск – в пределах Алейской степи (Предалтайской равнины).

Кулундинская степь, занимающая площадь около 100 тыс. км², имеет уникальную природную особенность – обилие (более 3 тыс.) пресных, соленых и горько-соленых бессточных озер, часть которых

представлена крупными озерными месторождениями солей. Промышленные запасы Br сосредоточены в трех месторождениях (млн т): Кучукском (0,079), Кулундинском (0,164) и Большом Яровом (0,040) [31]. Минерализация вод достигает 430 г/л при pH 7,2–9,9; главные их компоненты – хлорид натрия, хлорид магния, сульфат натрия, сульфат магния, карбонат натрия и бром. В озерных водах зафиксированы повышенные содержания (мг/л): Br до 820, В до 78, Li до 3,6, I до 6,3, As до 0,6, U до 4,1 [32]. Рапа оз. Большое Яровое хлоридного натриево-магниевого состава с минерализацией 72,4 г/л. В рапе содержится Br в количестве 154 мг/л. С 1944 г. здесь работает завод по получению бромжелеза, используемого в военной промышленности, а также для фармацевтических предприятий. Основная часть расходного баланса озер приходится на испарение, величина которого в период открытой воды составляет 350–600 мм, что почти в два раза превышает количество атмосферных осадков (250–300 мм) [33]. Этот факт указывает на то, что источником аномальных содержаний Br является природный фактор – рассеивание брома в приземном слое атмосферы под действием климатических условий.

О региональном биогеохимическом влиянии данной области на компоненты природной среды сопредельных территорий говорят опубликованные результаты корреляционного и факторного анализов распределения химических элементов в золе годичных колец лиственницы (*Larix sibirica* Ledeb.) [34].

На территории Западного Алтая выделяется ассоциация химических элементов, которая представлена щелочными металлами и галогенами (Na, Ca, Br и др.). Для нее характерно превышение фоновых концентраций в среднем более чем в 5 раз. В годичных кольцах лиственницы в пространственном распределении выделенных элементов, включая Br, проявлено уменьшение их содержаний в направлении с северо-запада на юго-восток, что, предположительно, указывает на их поступление с пыльными бурями с территории Степного Алтая, возможно, с соленых озер и засоленных почв Кулуундинской равнины.

В границах Северо-Казахстанской аномальной бромной области опробованы территории следующих городов: Экибастуз, Павлодар и Усть-Каменогорск.

На территории г. Экибастуз среднее содержание Br в золе листьев тополя (42 пробы) составляет $186,5 \pm 12,5$ мг/кг, максимальное – 386,3 мг/кг. Среднее содержание Br в золе листьев тополя г. Экибастуз в 3,3 раза выше среднего регионального значения (табл. 1). Кроме того, установлена значимая положительная парная корреляционная связь Br с Sc, Fe, Co, Zn и легкими РЗЭ. Вероятно, источником эмиссии Br в окружающую среду г. Экибастуз являются открытая разработка угля (разрезы Богатырь, Восточный, Северный) и выбросы крупнейших теплоэлектростанций ГРЭС-1 и ГРЭС-2,рабатывающих электроэнергию из углей Экибастузского и Майкубенского бассейнов. Первая станция потребляет угля свыше 9 млн т, вторая – около 4 млн т в год [35]. Угли месторождений высокозольные (более 40 %), с высоким содержанием примесей. Недостаточная очистка выбросов золоулавливающими установками приводит к поступлению значительных объемов мелкодисперсных аэрозолей в атмосферу – 46 % всех выбросов вредных веществ области, из них 94 % приходится на ГРЭС-1 и ГРЭС-2. На расстоянии до 15 км от станций концентрации пыли превышают ПДК в 10 и более раз, газовые компоненты выбросов – SO₂ и NO обнаруживаются на расстоянии 120 км [36].

Город Павлодар расположен в 120 км от г. Экибастуз по направлению преобладающих ветров. Максимальное содержание Br в выборке (27 проб) г. Павлодара составляет 279,8 мг/кг, среднее – $144,1 \pm 12,5$ мг/кг, что в 2,5 раза выше среднего регионального значения (табл. 1). Кроме того, для состава золы листьев тополя с территории этого города установлены значимые отрицательные парные корреляционные связи Br с содержаниями Sc, Cr, Fe, Sb, Th и РЗЭ. Спектр химических элементов указывает на возможное влияние угольных производств Экибастузских ГРЭС-1 и ГРЭС-2 и ферросплавного завода г. Аксу [36]. Косвенным доказательством ветрового переноса является наложение выборок г. Павлодар и

г. Экибастуз в координатах многомерных канонических переменных (рис. 4).

Максимальное содержание Br в выборке (101 проба) г. Усть-Каменогорск составляет 630,9 мг/кг, среднее – $128,7 \pm 8,2$ мг/кг, что в 2,3 раза выше среднего регионального значения (табл. 1). Максимальное и повышенные содержания Br зафиксированы в районе действия титано-магниевого комбината и Согринской ТЭЦ [37]. Установлены значимые положительные парные корреляционные связи Br с содержаниями Na, Co, As и U; отрицательные корреляционные связи – с содержаниями Ca и Ba.

Несмотря на наличие локальных аномалий техногенного генезиса, общей особенностью содержания Br в выборках Северо-Казахстанской бромной области является невысокий коэффициент вариации (44–63 %) при близких значениях средних и медианы (табл. 1), что говорит об относительно однородном распределении элемента. Этот факт свидетельствует о природно-техногенном источнике его нахождения в данной области.

Выводы

1. Средний региональный уровень содержания Br в золе листьев тополей, произрастающих на урбанизированных территориях юго-востока Евразии, по данным ИНАА, составил $56,5 \pm 2,1$ мг/кг, медиана – 30,6 мг/кг. Нижний аномальный уровень содержания Br (с учетом логнормального закона распределения) составляет 103,4 мг/кг.
2. Локальные биогеохимические аномалии Br закартированы на территориях, находящихся в зоне воздействия крупных теплоэлектростанций, вблизи транспортных узлов – автомобильного, железнодорожного и авиационного.
3. Выявлены две сопряженные аномальные бромные биогеохимические области: Кулуундинская – преимущественно природного генезиса и Северо-Казахстанская – природно-техногенного генезиса. По территориальному принципу биогеохимического районирования эти области объединены в бромную биогеохимическую субпровинцию.
4. Полученные данные могут найти применение для мониторинга эколого-геохимического состояния урбанизированных территорий, для изучения закономерностей формирования биогеохимических провинций, а также при обновлении карты биогеохимического районирования России и сопредельных территорий.

Научные исследования выполнены в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров. Обработка данных и интерпретация результатов выполнена в рамках реализации гранта Российского научного фонда (проект № 20-64-47021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: Справочник. В 6 кн. / под ред. Э.К. Буренкова. Кн. 3: Редкие р-элементы. – М.: Недра, 1996. – 352 с.
2. Перельман А.И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. – М.: Недра, 1972. – 288 с.
3. Vainikka P., Hupa M. Review on bromine in solid fuels. P. 1: Natural occurrence // Fuel. – 2012. – № 95. – P. 1–14.
4. Vainikka P., Hupa M. Review on bromine in solid fuels. P. 2: Anthropogenic occurrence // Fuel. – 2012. – № 94. – P. 34–51.
5. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: world averages for trace element contents

- in black shales and coals // International Journal of Coal Geology. – 2009. – № 78. – Р. 135–148.
6. Демаков В.А. Бромированные алкилы как промышленные яды и атмосферные загрязнения: автореф. дис. ... канд. мед. наук. – Пермь, 1975. – 16 с.
 7. Пастухова О.М. Изучение специфического влияния выбросов предприятий галоидорганического синтеза в натурных экспериментах и наблюдениях: автореф. дис. канд. мед. наук. – Оренбург, 1999. – 18 с.
 8. Красовицкая М.Л. Галоидпроизводные углеводородов как атмосферные загрязнители. – Пермь: Кн. изд-во, 1976. – 142 с.
 9. Winid B. Bromine and water quality – selected aspects and future perspectives // Applied Geochemistry. – 2015. – V. 63. – Р. 413–435.
 10. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Ценные элементы-примеси в углях. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 422 с.
 11. Bromine compounds. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry / D. Yoffe, R. Frim, S.D. Ukeles, M.J. Dagani, H.J. Barda, T.J. Benya, D.C. Sanders. – 2013. – 31 p. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/14356007.a04_40.5.pub2 (дата обращения 15.10.2020).
 12. Comparative study on susceptibility to 1-bromopropane in three mice strains / Liu Fang, Ichihara Sahoko, Mohideen Sahabudeen Sheik, Sai Uka, Kitoh Junzoh, Ichihara Gaku // Toxicological Sciences. – 2009. – V. 112. – № 1. – Р. 100–120.
 13. Melatonin pretreatment attenuates 2-bromopropane – induced testicular toxicity in rats / Huang Fen, Ning Huan, Xin QianQuan, Huagn Jong, Wang Hua, Zhang Zhi-Hua, Xu De-Xiang, Ichihara Gaku, Je Dong-Qing // Toxicology. – 2009. – V. 256. – № 1–2. – Р. 75–82.
 14. Regional variation and possible sources of brominated contaminants in breast milk from Japan / Fujii Yukoko, Ito Yoshiko, Harada Kouji H., Hitomi Toshaki, Koizumi Akio, Haraguchi Koichi // Environmental Pollution. – 2012. – № 162. – Р. 269–274.
 15. Carr H.S., Rozenkranz H.S. Mutagenicity of derivatives of the flame retardant tris (2,3-dibromopropyl)phosphate: halogenated-propanols // Mutation Research. – 1978. – V. 57. № 7. – Р. 381–384.
 16. Buchberger W., Holler W., Winsauer K. Effects of sodium bromide on the biosynthesis of thyroid hormones and brominated/iodinated thyronines // J. Trace Elem. and Electrolytes Health and Disease. – 1990. – V. 4. – № 1. – Р. 25–30.
 17. Арбузова Т.П., Пастухова О.М., Демаков В.А. Микроэлементы-галогены и их соединения как загрязнители окружающей среды. Риск для здоровья населения (обзор литературы) // Здоровье семьи - 21 век. – 2013. – № 4 (4). – С. 1–20.
 18. Towards integrating toxicity characterization into environmental studies: case study of bromine in soils / T. Bratec, N. Kirchhübel, N. Baranovskaya, B. Laratte, O Jolliet., L. Rikhvanov, P. Fantke // Environmental Science and Pollution Research. – 2019. – № 26 (19). – Р. 19814–19827. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05244-5> (дата обращения 15.10.2020).
 19. Trace element biomonitoring by leaves of Populus nigra L. from Western Anatolia, Turkey / S. Baslar, Y. Dogan, N. Yenil, S. Karagoz, H. Bag // Journal of Environmental Biology. – 2005. – № 26. – Р. 665–668.
 20. Trace element composition of poplar in Mongolian cities / N.E. Kosheleva, I.V. Timofeev, N.S. Kasimov, T.M. Kiselyova, A.V. Alekseenko, O.I. Sorokina // Biogenic- abiogenic interactions in natural and anthropogenic systems. Lecture Notes in Earth System Sciences / Eds. O.V. Frank-Kamenetskaya et al. – Switzerland: Springer, 2016. – Р. 165–177.
 21. Rare earth elements in poplar leaves as indicators of geological environment and technogenesis / D.V. Yusupov, N.V. Baranovskaya, Yu.V. Robertus, V.V. Radomskaya, L.M. Pavlova, A.F. Sudyko, L.P. Rikhvanov // Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – V. 27. – Р. 27111–27123. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09090-8> (дата обращения 15.10.2020).
 22. Terekhina N.V., Ufimtseva M.D. Leaves of trees and shrubs as bioindicators of air pollution by particulate matter in Saint Petersburg // Geography, Environment, Sustainability. – 2020. – № 13 (1). – Р. 224–232. URL: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2019-65> (дата обращения 15.10.2020).
 23. Ташекова А.Ж., Торопов А.С. Использование листьев растений как биогеохимических индикаторов состояния городской среды // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 114–124.
 24. Goodman G.T., Roberts T.M. Plants and soils as indicators of metals in the air // Nature, Load. – 1971. – № 231. – Р. 287–292.
 25. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. P. IV: Sampling and analysis of needles and leaves / K. Stefan, H. Raitio, U. Bartels, A. Fürst. – Geneva: UN-ECE, ICP Forests, 2000. – 47 р.
 26. ГОСТ 26929-94 Сырье и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 31 р.
 27. Shtangeeva I. Bromine accumulation in some crops and grasses as determined by neutron activation analysis // Communications in soil science and plant analysis. – 2017. – V. 48. – № 19. – Р. 2338–2346. URL: <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1411511> (дата обращения 15.10.2020).
 28. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений / под ред. Л.Н. Овчинников и др. – М.: Недра, 1983. – 191 с.
 29. Yatin M., Tuncel S.G., Tuncel G. Trace element composition of atmospheric aerosols in Ankara, Turkey, determined by instrumental neutron activation analysis // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 1994. – V. 181 (2). – Р. 401–411.
 30. Zikovsky L. An indirect study of air pollution by neutron activation analysis of snow // Journal of Radio analytical and Nuclear Chemistry. – 1986. – V. 114 (1). – Р. 147–153.
 31. Геология СССР. Т. XIV. Западная Сибирь (Кемеровская, Новосибирская, Омская, Томская области, Алтайский край). Полезные ископаемые. Кн. 2 / под ред. В.И. Братова и др. – М.: Недра, 1982. – 196 с.
 32. Uranium in the mineralized lakes of Altai krai / V.P. Isupov, S.S. Shatskaja, N.Z. Lyakhov, M.N. Kolpakova, S.L. Shvartsev, S.V. Borzenko, A.P. Dolgushin, G.M. Arzamasova // Doklady Earth Sciences. – 2016. – V. 470 (2). – Р. 1067–1070.
 33. Гидрохимия и геохимическая типизация соленых озер степной части Алтайского края / М.Н. Колпакова, С.В. Борзенко, В.П. И supov, С.С. Шацкая, С.Л. Шварцев // Вода: химия и экология. – 2015. – № 1. – С. 11–16.
 34. Робертус Ю.В., Рихванов Л.П., Любимов Р.В. Дендрохимическая индикация трансграничных переносов экотоксикантов на территорию Алтая // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 1. – С. 173–177.
 35. Радиоактивные элементы (торий, уран) в листьях тополя на урбанизированных территориях и их индикаторная роль / Д.В. Юсупов, Л.П. Рихванов, А.Ф. Судыко, Н.В. Барановская, Л.А. Дорохова // Разведка и охрана недр. – 2019. – № 2. – С. 61–68.
 36. Биондикация урбоэкосистемы г. Павlodара по содержанию химических элементов в золе листвы тополя черного (*Populus nigra* L.) / Б.Х. Шаймарданова, Г.Е. Асылбекова, Н.В. Барановская, А.Б. Бигалиев, Н.П. Корогод // Вестник Томского государственного университета. – 2010. – № 338. – С. 212–216.
 37. *Populus nigra* L. as a bioindicator of atmospheric trace element pollution and potential toxic impacts on human and ecosystem / A. Yalaltdinova, J. Kim, N. Baranovskaya, L. Rikhvanov // Ecological Indicators. – 2018. – № 95. – Р. 974–983.

Поступила 23.12.2020 г.

Информация об авторах

Юсупов Д.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и природопользования Амурского государственного университета; доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

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

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

Робертус Ю.В., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН.

Радомская В.И., кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института геологии и природопользования ДВО РАН.

Павлова Л.М., кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института геологии и природопользования ДВО РАН.

Дорохова Л.А., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета; младший научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института геологии и природопользования ДВО РАН.

Судыко А.Ф., инженер отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 546.14:581.45:582.681.82:550.42

BROMINE IN THE POPLAR LEAVES OF URBAN AREAS: NATURAL AND ANTHROPOGENIC SOURCES OF SCATTERING

Dmitry V. Yusupov^{1,2},
yusupovd@mail.ru

Leonid P. Rikhvanov²

Natalia V. Baranovskaya²,
nata@tpu.ru

Yuriy V. Robertus³,
ariecol@mail.gorny.ru

Valentina I. Radomskaya⁴,
radomskaya@ascnet.ru

Lyudmila M. Pavlova⁴,
pav@ascnet.ru

Lyubov A. Dorokhova^{2,4},
liubov.ad@yandex.ru

Alexander F. Sudyko²,
sudykoaf@yandex.ru

¹ Amur State University,
21, Ignatievskoe highway, Blagoveshchensk, 675027, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

³ Institute for Water and Environmental Problems SB RAS,
1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russia.

⁴ Institute of Geology and Nature Management FEB RAS,
1, Relochny lane, Blagoveshchensk, 675000, Russia.

Relevance of the work. Bromine is a tollassophilic, organophilic and essential element. The combination of natural and anthropogenic sources of dispersion of this element determines the complexity and multifactorial nature of its entry into the environment, affects the characteristics of halogen accumulation and distribution in natural environments. The main attention in the work is focused on urbanized areas of the local and regional levels of the study with sources of Br emission. The migration routes and biogeochemical accumulation of bromine remain poorly studied issues.

The main aim of the research is to determine the quantitative content of Br in the leaves of woody plants of the genus poplar (*Populus L.*), growing in urbanized areas of South-East Eurasia, and based on the principles of biogeochemical zoning to identify the halos of Br load, determine the main factors of their formation.

Methods. Poplar leaves (*Populus L.*) served as the object of the study. Sampling was carried out in August 2015–2018 on the territory of more than 50 cities along a uniform network with a step of 1×1 and 2×2 km. The average sample size in cities was 30 samples. In total, about 1700 samples of poplar leaves were taken. Leaf ash was carried out by dry mineralization in a muffle furnace at 450 °C for 5 hours. The authors have taken into account the literature data that Br loss in the ash obtained at 400 °C was no more than 20 % of the calculated value. Content of Br and other chemical elements in the ash of poplar leaves was determined by the method of instrumental neutron activation analysis in the nuclear geochemical laboratory at the educational research nuclear reactor (IRT-T) at Tomsk Polytechnic University. The analysis results were processed using descriptive statistics, cluster and discriminant analyzes.

Results. The average Br content in the ash of poplar leaves in urbanized areas was 56,5±2,1 mg/kg, with a range from 0,3 to 1730,1 mg/kg. The median is 30,6 mg/kg. The lower anomalous Br content was 103,4 mg/kg. Two conjugated anomalous bromine biogeochemical regions were revealed: Kulunda – natural genesis and North Kazakhstan – natural and technogenic genesis. Areas are depleted in area in bromine biogeochemical subprovince, first described in this work.

Key words:

Biogeochemical indication, poplar leaves, bromine, instrumental neutron activation analysis, urban areas.

The research was carried out within the Program of enhancement of TPU competitiveness among the leading world's research centers. Data processing and interpretation of the results were performed within the framework of the grant from the Russian Science Foundation (project no. 20-64-47021).

REFERENCES

- Ivanov V.V. *Ekologicheskaya geokhimiya elementov: Spravochnik*. Kn. 3: Redkie p-elementy [Environmental geochemistry of elements. B. 3. Rare p-elements]. Ed. by E.K. Burenkov. Moscow, Nedra Publ., 1996. 352 p.
- Perelman A.I. *Geokhimiya elementov v zone gipergeneza* [Geochemistry of elements in the hypergenesis zone]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 288 p.
- Vainikka P., Hupa M. Review on bromine in solid fuels. P. 1: Natural occurrence. *Fuel*, 2012, vol. 95, pp. 1–14.
- Vainikka P., Hupa M. Review on bromine in solid fuels. P. 2: Anthropogenic occurrence. *Fuel*, 2012, vol. 94, pp. 34–51.
- Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: world averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 2009, vol. 78, pp. 135–148.
- Demakov V.A. *Bromirovannye alkily kak promyshlennye yady i atmosfernye zagryazneniya*. Avtoreferat Diss. Kand. nauk [Brominated alkyls as industrial poisons and atmospheric pollutants. Cand. Diss. Abstract]. Perm, 1975. 16 p.

7. Pastukhova O.M. *Izuchenie spetsificheskogo vliyaniya vybrosov predpriyatiy galoidorganicheskogo sinteza v naturnykh eksperimentakh i nablyudeniyakh*. Avtoreferat Diss. Kand. nauk [Study of the specific effect of emissions from enterprises of organohalide synthesis in field experiments and observations. Cand. Diss. Abstract]. Orenburg, 1999. 18 p.
8. Krasovickaya M.L. *Galoidproizvodnye uglevodorodov kak atmosfernye zagryazniteli* [Halide derivatives of hydrocarbons as atmospheric pollutants]. Perm, Knizhnoe izdatelstvo, 1976. 142 p.
9. Winid B. Bromine and water quality Selected aspects and future perspectives. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 63, pp. 413–435.
10. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Tsennye elementy-primesi v uglyakh* [Valuable trace elements in coals]. Ekaterinburg, UrO RAS Publ., 2006. 422 p.
11. Yoffe D., Frim R., Ukeles S.D., Dagani M.J., Barda H.J., Benya T.J., Sanders D.C. Bromine compounds. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 2013. 31 p. Available at: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/14356007.a04_405.pub2 (accessed 15 October 2020).
12. Liu Fang, Ichihara Sahoko, Mohideen Sahabudeen Sheik, Sai Uka, Kitoh Junzoh, Ichihara Gaku. Comparative study on susceptibility to 1-bromopropane in three mice strains. *Toxicological Sciences*, 2009, vol. 112, no. 1, pp. 100–120.
13. Huang Fen, Ning Huan, Xin Qian Quan, Huagn Jong, Wang Hua, Zhang Zhi-Hua, Xu De-Xiang, Ichihara Gaku, Je Dong-Qing. Melatonin pretreatment attenuates 2-bromopropane – inducend testicular toxicity in rats. *Toxicology*, 2009, vol. 256, no. 1–2, pp. 75–82.
14. Fujii Yukoko, Ito Yoshiko, Harada Kouji H., Hitomi Toshaki, Koizumi Akio, Haraguchi Koichi. Regional variation and porrible sources of brominated contaminants in breast milk from Japan. *Environmental Pollution*, 2012, no. 162, pp. 269–274.
15. Carr H.S., Rozenkranz H.S. Mutagenicity of derivatives of the flame retardant tris (2,3-dibromopropyl) phosphate: halogenated-propanols. *Mutation Research*, 1978, vol. 57, no. 7, pp. 381–384.
16. Buchberger W., Holler W., Winsauer K. Effects of sodium bromide on the biosynthesis of thyroid hormones and brominated/iodinated thyronines. *J. Trace Elem. and Electrolytes Health and Disease*, 1990. vol. 4, no. 1, pp. 25–30.
17. Arbuzova T.P., Pastuhova O.M., Demakov V.A. Trace elements-Halogens and their compounds as pollutants of the environment. The risk to public health (review of literature). *Zdorov'e sem'i – 21 vek*, 2013. vol. 4, no. 4, pp. 1–20. In Rus.
18. Bratec T., Kirchhübel N., Baranovskaya N., Laratte B., Jolliet O., Rikhvanov L., Fantke P. Towards integrating toxicity characterization into environmental studies: case study of bromine in soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, no. 19, pp. 19814–19827. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05244-5> (accessed 15 October 2020).
19. Baslar S., Dogan Y., Yenil N., Karagoz S., Bag H. Trace element biomonitoring by leaves of *Populus nigra* L. from Western Anatolia, Turkey. *Journal of Environmental Biology*, 2005, vol. 26, pp. 665–668.
20. Kosheleva N.E., Timofeev I.V., Kasimov N.S., Kiselyova T.M., Alekseenko A.V., Sorokina O.I. Trace element composition of poplar in Mongolian cities. *Biogenic – abiogenic interactions in natural and anthropogenic systems. Lecture Notes in Earth System Sciences*. Ed. by O.V. Frank-Kamenetskaya. Switzerland, Springer, 2016. pp. 165–177.
21. Yusupov D.V., Baranovskaya N.V., Robertus Yu.V., Radomskaya V.V., Pavlova L.M., Sudyko A.F., Rikhvanov L.P. Rare earth elements in poplar leaves as indicators of geological environment and technogenesis. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, pp. 27111–27123. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09090-8> (accessed 15 October 2020).
22. Terekhina N.V., Ufimtseva M.D. Leaves of trees and shrubs as bioindicators of air pollution by particulate matter in Saint Petersburg. *Geography, Environment, Sustainability*, 2020, vol. 13, no. 1, pp. 224–232. Available at: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2019-65> (accessed 15 October 2020).
23. Tashekova A.Zh., Toropov A.S. Use of plant leaves as biogeochemical indicators of the state of the urban environment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo-Resource Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 114–124. In Rus.
24. Goodman G.T., Roberts T.M. Plants and soils as indicators of metals in the air. *Nature, Load*, 1971, vol. 231, pp. 287–292.
25. Stefan K., Raitio H., Bartels U., Fürst A. *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Part IV: Sampling and analysis of needles and leaves*. Geneva, UN-ECE, ICP Forests, 2000. 47 p.
26. GOST 26929-94. *Syre i produkty pishchevye. Podgotovka prob. Mineralizatsiya dlya opredeleniya soderzhaniya toksichnykh elementov* [State standard 26929-94. Raw materials and food products. Sample preparation. Mineralization for determination of the toxic element contents]. Moscow, IPK standards Publ. house, 2002. 31 p.
27. Shtangeeva I. Bromine accumulation in some crops and grasses as determined by neutron activation analysis. *Communications in soil science and plant analysis*, 2017, vol. 48, no. 19, pp. 2338–2346. Available at: <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1411511> (accessed 15 October 2020).
28. *Instruktsiya po geokhimicheskim metodam poiskov rudnykh mestorozhdeniy* [Instructions on geochemical methods of searching for ore deposits]. Ed. by L.N. Ovchinnikov. Moscow, Nedra Publ., 1983. 191 p.
29. Yatin M., Tunçel S.G., Tunçel G. Trace element composition of atmospheric aerosols in Ankara, Turkey, determined by instrumental neutron activation analysis. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1994, vol. 181, no. 2, pp. 401–411.
30. Zikovsky L. An indirect study of air pollution by neutron activation analysis of snow. *Journal of Radio analytical and Nuclear Chemistry*, 1986, vol. 114, no. 1, pp. 147–153.
31. *Geologiya SSSR. T. XIV. Zapadnaya Sibir (Kemerovskaya, Novosibirskaya, Omskaya, Tomskaya oblasti, Altayskiy kray). Poleznye iskopaemye. Kn. 2* [Geology of the USSR. V. XIV. Western Siberia (Kemerovo, Novosibirsk, Omsk, Tomsk regions, Altai Territory). Minerals]. Ed. by V.I. Bgatov. Moscow, Nedra Publ., 1982. 196 p.
32. Isupov V.P., Shatskaja S.S., Lyakhov N.Z., Kolpakova M.N., Shvartsev S.L., Borzenko S.V., Dolgushin A.P., Arzamasova G.M. Uranium in the mineralized lakes of Altai krai. *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 470, no. 2, pp. 1067–1070.
33. Kolpakova M.N., Borzenko S.V., Isupov V.P., Shatskaya S.S., Shvartsev S.L. Hydrochemistry and geochemical typification of salt lakes in the steppe part of Altai Krai. *Water: chemistry and ecology*, 2015, vol. 1, pp. 11–16. In Rus.
34. Robertus Yu.V., Rihvanov L.P., Lyubimov R.V. Dendrogeochemical indication of transboundary transfers of ecotoxins to the territory of Altai. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no. 1, pp. 173–177. In Rus.
35. Yusupov D.V., Rihvanov L.P., Sudyko A.F., Baranovskaya N.V., Dorohova L.A. Radioactive elements (thorium, uranium) in poplar leaves in urban areas and their indicator role. *Razvedka i ohrana nedor*, 2019, vol. 2, pp. 61–68. In Rus.
36. Shaimardanova B.Kh., Asylbekova G.E., Baranovskaya N.V., Bigaliev A.B., Korogod N.P. Bioindication of urban system of Pavlodar on the content of chemical elements in black poplar leaf ash *Populus nigra* L. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 338, pp. 212–216. In Rus.
37. Yalaltdinova A., Kim J., Baranovskaya N., Rikhvanov L. *Populus nigra* L. as a bioindicator of atmospheric trace element pollution and potential toxic impacts on human and ecosystem. *Ecological Indicators*, 2018, vol. 95, P. 2, pp. 974–983. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.06.021> (accessed 15 October 2020).

Received: 23 December 2020.

Information about the authors

Dmitry V. Yusupov, Cand. Sc., assistant professor, Amur State University; associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

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

Yuriy V. Robertus, Cand. Sc., leading researcher, Institute for Water and Environmental Problems (IWEP SB RAS).

Valentina I. Radomskaya, Cand. Sc., leading researcher, Institute of Geology and Nature Management FEB RAS.

Lyudmila M. Pavlova, Cand. Sc., leading researcher, Institute of Geology and Nature Management FEB RAS.

Lyubov A. Dorokhova, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University; junior researcher, Institute of Geology and Nature Management FEB RAS.

Alexander F. Sudyko, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 62-83:621.313

ОЦЕНКА ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Зюзев Анатолий Михайлович¹,
a.m.zyuzev@urfu.ru

Крюков Олег Викторович²,
o.v.kryukov@mail.ru

Метельков Владимир Павлович¹,
v.p.metelkov@urfu.ru

Михальченко Сергей Геннадьевич³,
msg@ie.tusur.ru

¹ Уральский федеральный университет,
Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

² ООО «ТСН-электро»,
Россия, 603108, г. Нижний Новгород, ул. Электровозная, 7 «А».

³ Томский университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оснащения системами мониторинга основного технологического оборудования компрессорных станций магистральных газопроводов. Эти системы должны обеспечивать достоверную оценку текущего технического состояния компрессорных станций и прогнозировать его динамику на интервале между измерениями. Информации, получаемой с датчиков, не всегда достаточно для такого прогнозирования, что обуславливает необходимость использования подходов, основанных на моделировании.

Цель: выявить возможности мониторинга теплового состояния обмотки статора крупных электродвигателей переменного тока аналитическими методами и методами моделирования с использованием информации, полученной с датчиков температуры.

Объекты: двигатели переменного тока электроприводных газоперекачивающих агрегатов.

Методы: аналитические методы, а также моделирование с использованием термодинамических моделей электродвигателя на основе тепловых схем с сосредоточенными параметрами.

Результаты. Аналитическим путем получены соотношения, позволяющие выполнить приближенную оценку теплового состояния обмотки статора крупных электродвигателей переменного тока на основе трехмассовой тепловой схемы. Приведены результаты моделирования на основе тепловых схем с сосредоточенными параметрами нагрева обмотки статора крупного электродвигателя переменного тока с радиальными каналами охлаждения. Показано, что этот подход позволяет получить распределение температуры вдоль обмотки в аксиальном направлении, что дает возможность сравнительно точно оценить тепловое состояние обмотки, избежав использования очень требовательных к вычислительным ресурсам подходов на основе метода конечных элементов и вычислительной потоковой динамики. Предложено использование остаточного термического ресурса обмотки статора для прогнозирования ориентировочного срока ее службы на основе информации о температуре обмотки, получаемой с термодатчиков или из термодинамической модели.

Ключевые слова:

магистральный газопровод, газоперекачивающий агрегат, компрессорная станция, электродвигатели переменного тока, изоляция обмотки статора, термодинамическая модель, тепловая схема замещения с сосредоточенными параметрами, термический ресурс изоляции.

Введение

Общая протяженность газопроводов в Российской Федерации превышает 170 тыс. км. Это делает очевидной важность задачи обеспечения надежности и эффективности эксплуатации магистральных газопроводов (МГ) [1]. Одним из важнейших элементов в составе систем МГ, являются компрессорные станции (КС) [2], количество которых на территории России превышает четверть тысячи. Эти станции служат управляющими элементами, которые обеспечивают нужный режим функционирования газопровода, а надежность их оборудования в значительной степени влияет на надежность системы МГ в целом.

Совершенствование компьютерных технологий и прогресс в элементной базе систем автоматизации открывают новые возможности для снижения аварийности таких сложных систем, как КС МГ ПАО «Газпром» [3–5]. Задачей автоматизированных систем управления КС является повышение надежности, энергетической эффективности и безопасности функционирования МГ. В этом контексте также следует отметить и то, что все МГ Российской Федерации относятся к промышленным объектам повышенной опасности и требования к обеспечению надежности и безаварийности работы их оборудования, установленные федеральными и отраслевыми нормативно-

техническими документами, с каждым годом становятся все более строгими [6–9].

Все эти обстоятельства заставляют уделять все большее внимание совершенствованию систем мониторинга состояния оборудования КС и создания автоматизированных систем диагностики с использованием современной вычислительной техники [9, 10]. Целый ряд отраслевых нормативных документов содержит прямые требования по оснащению системами мониторинга основного технологического оборудования КС [6, 11, 12]. Эти документы регламентируют реализацию мониторинга работоспособности, надежности и безопасности оборудования КС с помощью технических и программных средств, которые должны обеспечивать диагностику технического состояния оборудования, а также его прогнозирование на интервале времени между измерениями. Причем установка таких систем должна обеспечиваться как при строительстве новых КС, так и в процессе модернизации эксплуатируемых.

В ПАО «Газпром» (в частности, на КС ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород») в ходе модернизации систем автоматики электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) были заменены старые релейные и аналоговые системы автоматического управления на микропроцессорные системы типа КРУГ-2000, САУ КАРАТ-М. Однако эти системы в основном позволяют реализовывать управление и контроль над процессами, происходящими лишь в механической и технологической части ЭГПА, и практически не позволяют обеспечить мониторинг технического состояния приводного высоковольтного электродвигателя ЭГПА. Рассмотрим некоторые вопросы, связанные с тепловым состоянием двигателей ЭГПА.

Особенности тепловых процессов в крупных электродвигателях переменного тока

Важным фактором, влияющим на вероятность выхода двигателя из строя, является температура статорной обмотки, определяющая скорость термического старения изоляции. Для выяснения диапазона колебаний температуры элементов статора в процессе функционирования ЭГПА было проведено измерение температуры при пуске и останове приводного двигателя, а также при изменениях режима работы МГ. На рис. 1 показано, как изменяется температура элементов статора двигателя при пуске и после остановки ЭГПА.

Исследования теплового состояния двигателя ЭГПА, проводившиеся на компрессорных станциях «Починковская» и «Сеченовская», позволили установить, что в летний период колебания температуры статора в основном коррелируют с суточными колебаниями температуры окружающей среды. В зимний период колебания температуры наружного воздуха оказывают слабое влияние на температуру двигателя, в этом случае его тепловое состояние главным образом зависит от количества ЭГПА, одновременно работающих в КС. После останова ЭГПА в течение некоторого интервала времени происходит «тепловой удар» – подъ-

ем температуры меди и стали статора на 10–15 °C, в результате чего температура обмотки может превысить допустимые значения для соответствующего класса изоляции.

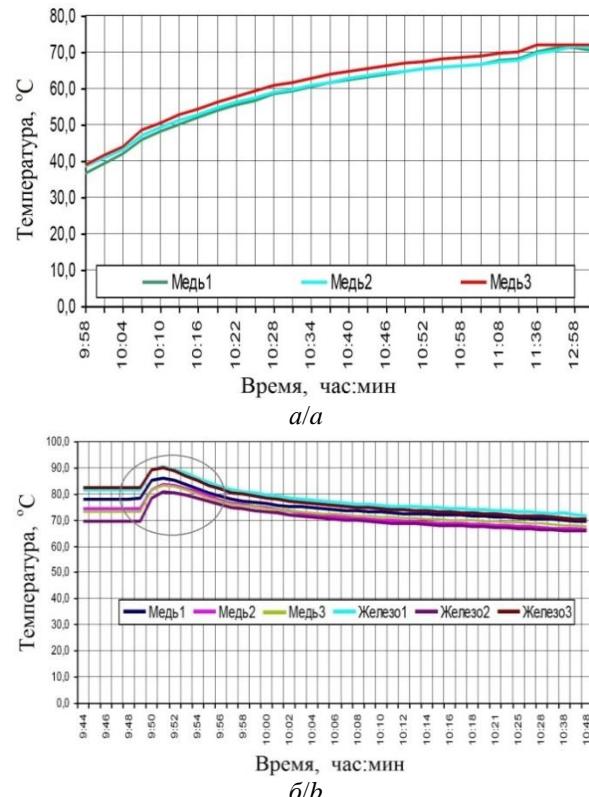


Рис. 1. Процессы изменения температуры статора синхронного двигателя: а) после запуска ЭГПА № 6 компрессорного цеха «Ямбург–Елец-2» КС-25 «Починковская»; б) после останова ЭГПА № 1 компрессорного цеха «Ямбург–Елец-1» КС-25 «Починковская» (овалом выделена область «теплового удара»)

Fig. 1. Synchronous motor stator temperature change: a) at start-up of Electrically-Driven Gas-Pumping Unit (EGPU) No. 6 at compressor manufactory «Yamburg–Elets-2» KS-25 «Pochinkovskaya»; b) after stop of EGPU No. 1 at compressor manufactory «Yamburg–Elets-1» KS-25 «Pochinkovskaya» (the oval marked the area of «heat stroke»)

Поскольку перегрев в данной области, хорошо различимой на графике (рис. 1, б), кратковременный, то наилучшим решением данной проблемы было бы повышение нагревостойкости изоляции, что позволило бы снизить скорость ее термического старения. Как правило, возможности запаса температурной устойчивости изоляции в электромоторе уже находятся на пределе возможного, в этом случае решением могла бы стать принудительная вентиляция ЭГПА. Но и такое решение не везде может быть применено, тогда остается уповать на точность расчета показателей старения и износа изоляции обмоток, что может быть реализовано только при наличии достаточно точной модели температурного состояния электропривода.

При двухсторонней системе вентиляции электродвигателя (как, например, у СТД-12500-2), когда поток охлаждающего воздуха нагнетается в область пазовых частей обмотки, наибольшую температуру имеет ее средняя часть. Это хорошо прослеживается на рис. 2, где показана термограмма статора двигателя работающего ЭГПА № 7 компрессорного цеха «Ямбург–Западная граница» КС «Починковская», полученная с помощью тепловизора «Terma CAM E25».

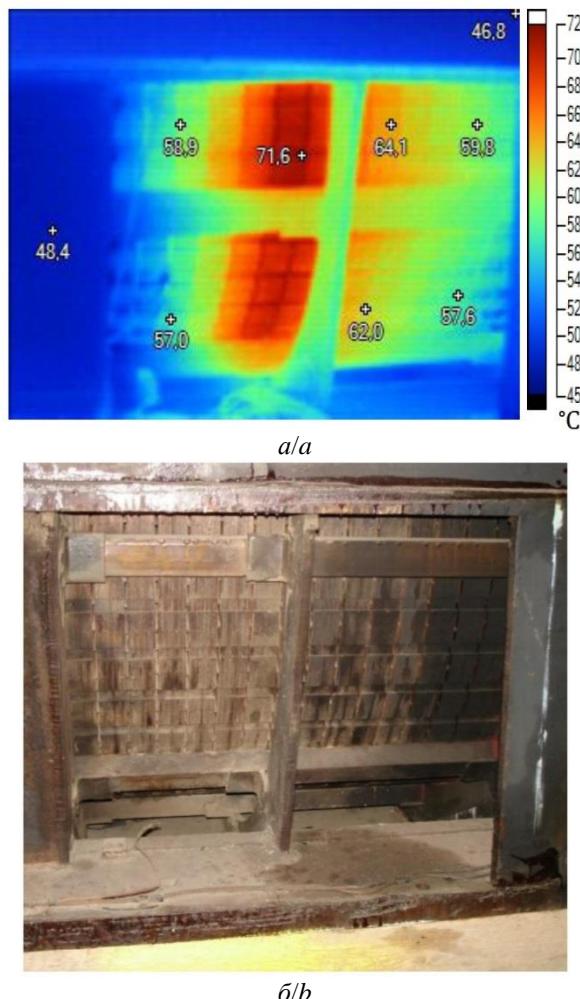


Рис. 2. Статор работающего синхронного двигателя (ЭГПА № 7 МГ «Ямбург–Западная граница»): а) термограмма; б) фотография соответствующей области статора

Fig. 2. Stator of an operating synchronous motor (EGPU No. 7 of the 'Yamburg-Zapadnaya granitsa' trunk gas pipeline): a) thermogram; b) photo of the corresponding stator area

На термограмме видно, что температура средней части статора примерно на 20 °C превышает температуру наиболее холодной области. Аналогичная картина наблюдается и на других электродвигателях ЭГПА. Соотнеся этот факт с тем, что, согласно статистическим данным, около 86 % случаев пробоя изоляции приходится именно на пазовую часть обмотки статора (ближе к середине паза в аксиальном направлении), можно сделать вывод, что именно температу-

ра оказывает наиболее существенное влияние на вероятность пробоя изоляции статорной обмотки приводного двигателя ЭГПА. Отсюда вытекает вывод о важности адекватной оценки теплового состояния обмотки статора этих двигателей.

Высоковольтные синхронные электродвигатели (СД), применяемые в ЭГПА, представляют собой достаточно сложный объект [13]. Можно построить для них модели, которые будут математически описывать их функционирование с различных сторон (тепловое, электромагнитное состояние, механические нагрузки и т. д.). Каждая такая модель может быть применена для прогноза технического состояния двигателя. Средства диагностирования могут быть встроеными в сам объект мониторинга, что позволяет использовать существующие или вновь вводимые датчики электромагнитных и механических величин, характеризующих работу двигателя, а модель состояния исправного двигателя может быть легко реализована с помощью вычислительных средств. Как правило, набор основных параметров, характеризующих состояние электродвигателя начинает изменяться еще до наступления отказа. В этом случае ЭГПА может быть остановлен еще до возникновения аварии. Что важно, при этом можно получить и предысторию развития процесса изменения состояния двигателя.

Природа физических процессов, обуславливающих проявление деградации статорной изоляции, является различной, здесь рассмотрим возможности учета влияния на изоляцию термических факторов в системе мониторинга состояния двигателя ЭГПА.

Нагрев обмотки статора электродвигателя ЭГПА

В настоящее время температура меди и стали статора двигателя ЭГПА контролируется штатными температурными датчиками типа ТСМ-50 (ТСМ-9502). Эти датчики размещаются по три в каждой фазе (рис. 3). Те, которые на дне паза, контролируют температуру «стали», а датчики между слоями обмотки – температуру «меди». Практика эксплуатации ЭГПА свидетельствует о том, что такого набора датчиков слишком мало для получения полной информации о температурном состоянии статора, поскольку соотношение температуры элементов статора и ее пространственное распределение изменяется при изменении режимов работы.

Необходимо иметь в виду, что подробность и точность модели, применяемой для задач диагностирования, всегда определяет глубину и достоверность результатов диагностики состояния объекта. Для мониторинга и прогнозирования температурных режимов изоляции обмотки статора возможно использование одной из тепловых моделей нагрева двигателей переменного тока [14]. В инженерной практике для оценки теплового состояния электродвигателей широкое распространение получила так называемая «одномасовая модель нагрева», в которой электродвигатель рассматривается как однородное тело с единственным источником греющих потерь. Однако такая модель для мощных машин с большими габаритами и существенной неравномерностью пространственного

распределения температуры не обеспечивает адекватные результаты с точки зрения оперативного мониторинга теплового состояния обмотки статора.

Наиболее точные результаты при моделировании теплового состояния двигателя могут быть получены с использованием метода конечных элементов (Finite Element Method – FEM) [15–18] или методов вычислительной потоковой динамики (Computational Fluid Dynamic – CFD) [19–22]. Однако эти методы предъявляют очень высокие требования к вычислительным ресурсам. Это вытекает из того факта, что термодинамические задачи, в отличие от электродинамических, как правило, требуют 3D-моделей. Поэтому такие подходы сложно применять для онлайн мониторинга теплового состояния электрической машины [23–25].

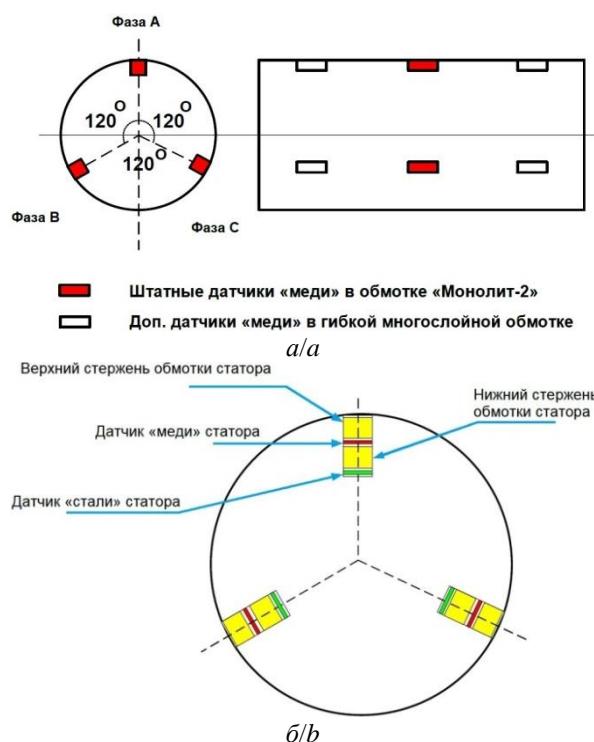


Рис. 3. Расположение датчиков температуры «меди» и «стали» в статоре электродвигателя ЭГПА: а) схема расположения датчиков температуры TSM-50; б) конструкция обмоток статора с датчиками

Fig. 3. Location of temperature sensors of «copper» and «steel» in the stator of the EGPU electric motor: a) layout of the temperature sensors TSM-50; b) design of stator windings with sensors

Термодинамические модели на базе тепловых схем замещения с сосредоточенными параметрами для этих целей значительно более применимы, поскольку обеспечивают гораздо более высокую скорость расчета при меньших требованиях к вычислительным возможностям [26–28]. Существуют достаточно подробные термодинамические модели крупных машин переменного тока такого типа. Так, в [29, 30] представлена термодинамическая модель двигателя АДЧР-1600 (1,6 МВт), тепловая схема ко-

торой содержит 71 узел. Эта модель позволяет визуализировать распределение температуры обмотки статора в аксиальном направлении (рис. 4), обеспечивая при этом весьма небольшое время расчета (порядка одной секунды времени расчета на одну секунду модельного времени). Превышение температуры обмотки статора в средней части паза при работе с名义альной нагрузкой соответствует допустимому по ГОСТ превышению температуры обмотки для изоляции класса F. Обратим внимание, что распределение температуры вдоль обмотки на рис. 4 хорошо согласуется с распределением температуры на рис. 2.

Кратко остановимся на возможностях использования аналитического подхода в задачах оценки теплового состояния электродвигателя ЭГПА. В векторно-матричной форме термодинамическая модель электрической машины может быть представлена в виде уравнения

$$C \frac{d\theta}{dt} = \Delta P + \Lambda \theta, \quad (1)$$

где θ и ΔP – векторы температур узлов модели и мощности потерь в этих узлах; C – диагональная матрица теплоемкостей узлов; Λ – матрица тепловых проводимостей.

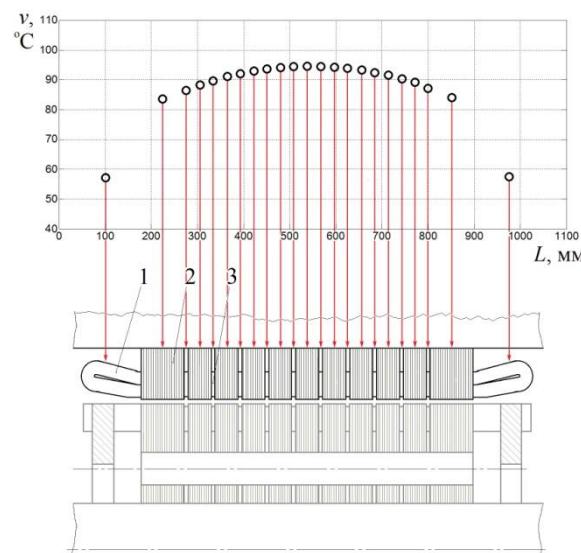


Рис. 4. Превышение температуры обмотки статора двигателя АДЧР-1600 в установившемся режиме при名义альной нагрузке (1 – лобовые части обмотки статора; 2 – сталь статора; 3 – пазовая часть обмотки статора; серым цветом изображены элементы ротора)

Fig. 4. Temperature rise of the ADChR-1600 motor stator winding in steady state at rated load (1 – stator winding end parts; 2 – stator steel; 3 – stator winding slotted part; rotor elements are shown in gray)

Модель (1) предполагает в общем случае использование вычислительной техники и наличие достаточно подробной информации о внутренних параметрах и конструктивных особенностях машины. Поэтому в ряде случаев может быть полезен максимально

упрощенный вариант модели, дающий возможность аналитического исследования. Для получения аналитическим путем некоторых общих выводов об особенностях нагрева синхронного двигателя ЭГПА редуцируем модель (1) до модели третьего порядка. В этом случае приходим к термодинамической модели СД в виде трёх элементов (рис. 5): меди обмотки статора, стали самого статора и корпуса, а также ротора вместе с обмоткой возбуждения, сталью сердечника, валом, подшипниками. На рис. 5 изображена модель СД, где v_1 , v_2 , v_3 – превышения температур обмотки статора, стали статора и ротора над температурой окружающей среды; C_1 , C_2 , C_3 – теплоёмкости обмотки статора, стали статора и ротора; Λ_1 , Λ_2 , Λ_3 – коэффициенты теплоотдачи соответствующих элементов СД в окружающую среду; Λ_{12} , Λ_{21} – коэффициенты теплоизмены между греющимися элементами модели.

Уравнения теплового баланса для такой термодинамической модели третьего порядка выглядят следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} C_1 \frac{dv_1}{dt} + \Lambda_1 v_1 + \Lambda_{12}(v_1 - v_2) + \Lambda_{13}(v_1 - v_3) &= \Delta P_{M1}; \\ C_2 \frac{dv_2}{dt} + \Lambda_2 v_2 + \Lambda_{21}(v_2 - v_1) + \Lambda_{23}(v_2 - v_3) &= \Delta P_{C1}; \\ C_3 \frac{dv_3}{dt} + \Lambda_3 v_3 + \Lambda_{31}(v_3 - v_1) + \Lambda_{32}(v_3 - v_2) &= \Delta P_2, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где Λ_{12} , Λ_{21} – тепловые проводимости между медью и сталью статора через пазовую изоляцию; Λ_{13} , Λ_{31} – тепловые проводимости между обмоткой статора и ротором через пазовую изоляцию и воздушный зазор; Λ_{23} , Λ_{32} – тепловые проводимости между сталью статора и ротором через воздушный зазор; ΔP_{M1} , ΔP_{C1} , ΔP_2 – мощности потерь соответственно в обмотке статора, стали статора и суммарные потери в роторе.

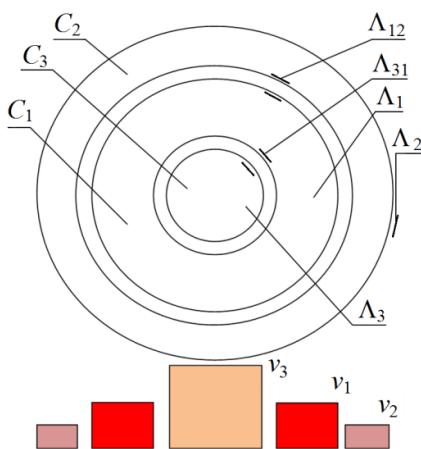


Рис. 5. Термодинамическая модель третьего порядка для синхронного двигателя

Fig. 5. Third-order thermodynamic model for a synchronous motor

В установившемся режиме, когда температура не изменяется, получим

$$\frac{dv_1}{dt} = \frac{dv_2}{dt} = \frac{dv_3}{dt} = 0. \quad (3)$$

С учетом (3) система дифференциальных уравнений (2) вырождается в систему алгебраических уравнений, которая, с учетом температурной зависимости мощности потерь в обмотке статора, может быть записана в виде векторно-матричного уравнения

$$\begin{vmatrix} a_1 & -\Lambda_{12} & -\Lambda_{13} \\ -\Lambda_{21} & a_2 & -\Lambda_{23} \\ -\Lambda_{31} & -\Lambda_{32} & a_3 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \Delta P_{M10} \\ \Delta P_{C1} \\ \Delta P_2 \end{vmatrix}, \quad (4)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \Lambda_1 + \Lambda_{12} + \Lambda_{13} - \alpha I_{1N}^2 R_1; \\ a_2 &= \Lambda_2 + \Lambda_{21} + \Lambda_{23}; \\ a_3 &= \Lambda_3 + \Lambda_{31} + \Lambda_{32}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В выражениях (4) и (5) обозначено: ΔP_{M10} – мощность потерь в обмотке статора в начале нагрева; α – температурный коэффициент меди; I_{1N} – номинальный ток статора; R_1 – сопротивление обмотки статора.

Из системы (4), принимая во внимание выражения (5), можем найти установившиеся значения превышений температуры v :

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= \frac{1}{a_1} \left(\Delta P_{M10} + \Lambda_{12} \frac{b_2}{b_1} + \Lambda_{13} \frac{b_4}{b_3} \right); \\ v_2 &= b_2 / b_1; \\ v_3 &= b_4 / b_3, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{a_1 a_2 - \Lambda_{21} \Lambda_{12}}{\Lambda_{21} \Lambda_{13} - \Lambda_{23} a_1} - \frac{a_1 \Lambda_{32} + \Lambda_{31} \Lambda_{12}}{a_1 a_3 - \Lambda_{31} \Lambda_{13}}; \\ b_2 &= \frac{a_1 \Delta P_{C1} + \Lambda_{21} \Delta P_{M10}}{\Lambda_{21} \Lambda_{13} - \Lambda_{23} a_1} + \frac{a_1 \Delta P_2 + \Lambda_{31} \Delta P_{M10}}{a_1 a_3 - \Lambda_{31} \Lambda_{13}}; \\ b_3 &= - \frac{a_1 a_3 - \Lambda_{31} \Lambda_{13}}{\Lambda_{31} \Lambda_{12} + \Lambda_{32} a_1} - \frac{\Lambda_{21} \Lambda_{13} - \Lambda_{23} a_1}{a_1 a_2 - \Lambda_{21} \Lambda_{12}}; \\ b_4 &= - \frac{a_1 \Delta P_2 + \Lambda_{31} \Delta P_{M10}}{\Lambda_{31} \Lambda_{12} + \Lambda_{32} a_1} - \frac{a_1 \Delta P_{C1} + \Lambda_{21} \Delta P_{M10}}{a_1 a_2 - \Lambda_{21} \Lambda_{12}}. \end{aligned}$$

Анализ результатов, полученных с помощью термодинамической модели третьего порядка, показал, что для двигателя СТД-12500-2:

- превышение температуры стали статора v_2 хорошо коррелирует с превышением температуры обмотки статора v_1 , а превышение температуры ротора v_3 существенно отличается как от v_1 , так и от v_2 . Это объясняется соотношением величин тепловых проводимостей, где $\Lambda_{12} \gg \Lambda_{23} > \Lambda_{13}$;
- превышение температуры обмотки статора СД, полученное с помощью модели (4)–(6), для номинальной нагрузки на валу близко к стандартной рабочей температуре, установленной ГОСТ для обмоток с изоляцией соответствующего класса нагревостойкости.

Оценка ресурса и срока службы изоляции обмоток

Информация с датчиков температуры обмотки или термодинамическая модель машины позволяет выполнить оценку остаточного термического ресурса

изоляции обмотки и прогнозировать ориентировочный срок ее службы.

Срок службы изоляции обмотки статора при температуре θ ($^{\circ}\text{C}$) связан с температурой экспоненциальной зависимостью:

$$T = A e^{-\gamma \theta}, \quad (7)$$

где A, γ – постоянные, зависящие от класса нагревостойкости изоляции.

Расход термического ресурса изоляции за время t_p можно представить как

$$\Delta R_t = \int_0^{t_p} \xi(t) dt, \quad (8)$$

где ξ – скорость термического старения изоляции (величина, обратная T , при этом значении θ).

Тогда остаточный ресурс изоляции обмотки можно определить как $R_{res} = 1 - \Delta R_t$, где ΔR_t рассчитывается по выражению (8) с учетом зависимости (7). Если имеется возможность вычислять или измерять температуру в нескольких точках обмотки, величина остаточного термического ресурса, как и температура, будет векторной величиной. В таком случае минимальная компонента этого вектора и будет определять значение остаточного термического ресурса обмотки.

Следует также упомянуть другое перспективное направление развития систем мониторинга состояния изоляции обмотки статора электрических машин, касающееся возможности построения системы мониторинга на основе емкостных токов утечки, генерируемых фронтами приложенного к обмотке напряжения. В работе [31] показана тесная связь между амплитудой емкостных токов утечки (I_y) и процессом термической деградации свойств изоляции обмотки. Эта зависимость может быть описана убывающей функцией вида

$$I_y = \Delta I_{y,max} e^{-\alpha_y t} + I_{y,0}, \quad (9)$$

где $\Delta I_{y,max}$, α_y и $I_{y,0}$ – постоянные; t – наработка машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пужайло А.Ф. Энергоснабжение и автоматизация энергооборудования компрессорных станций. Т. 2. – Н-Новгород: Вектор ТиС, 2011. – 664 с.
2. Козаченко А.Н. Эксплуатация компрессорных станций. – М.: Нефть и газ, 1999. – 463 с.
3. Репин Д.Г., Крюков О.В. Концепты системы мониторинга технического состояния компрессорных станций // Контроль. Диагностика. – 2017. – № 12. – С. 30–35.
4. Kryukov O.V., Serebryakov A.V. Energy efficient power supply systems of oil and gas pipelines electric drives // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – 2017. – Т. 17. – № 3. – С. 102–110.
5. Kryukov O.V. Scientific background for the development of intelligent electric drives for oil and gas process units // Вестник ЮУрГУ. Энергетика. – 2017. – Т. 17. – № 1. – С. 56–62.
6. Правила эксплуатации магистральных газопроводов // СТО Газпром 2-3.5-454-2010. – М.: ОАО «Газпром», 2010. – 216 с.
7. Применение и перспективы развития электропривода ГПА на объектах реконструкции и нового строительства ОАО «Газпром». Отчет о НИР в 3-х т. – Нижний Новгород: ОАО «Гипрогазцентр», 2012.
8. Программа повышения надежности работы и эффективности компрессорных станций с ЭГПА. – М.: ООО «ВНИИГАЗ», 2002. – 102 с.
9. Аксютин О.Е. Современное состояние газотранспортной системы России // Газовая промышленность. – 2010. – № 10. – С. 8–11.
10. Проблемы мощных электрических машин на сессии СИГРЭ-2008 / Б.А. Алексеев, Ф.А. Поляков, Л.Г. Мамиконянц, Ю.Г. Шакаран // Электричество. – 2009. – № 3. – С. 60–67.
11. Крюков О.В. Оценка эксплуатационных факторов ЭГПА по нормативным требованиям мониторинга // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 10. – С. 50–57.
12. Правила технической эксплуатации магистральных газопроводов. Ведомственный руководящий документ ВРД 39-1.10-006-2000. – М.: ИРЦ Газпром, 2002. – 147 с.
13. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 1994. – 318 с.
14. Крюков О.В. Моделирование термодинамических процессов в системах с мощными электрическими машинами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2018. – № 9. – С. 9–15.
15. De Santiago Ochoa J. FEM analysis applied to electric machines for electric vehicles. PhD Diss. Abstract. – Uppsala, 2011. – 54 p.

На основе зависимости (9) появляется возможность мониторинга текущего состояния изоляции, а главное – оценки ее остаточного ресурса [32, 33]. Поскольку амплитуда емкостных токов при увеличении наработки уменьшается по экспоненциальному закону, можно спрогнозировать значение наработки, при которой величина емкостных токов уйдет ниже некоторого порогового уровня, что и будет свидетельствовать об исчерпании ресурса изоляции. Таким образом становится возможным создание системы мониторинга и прогнозирования состояния изоляции обмотки статора, которая будет представлять одну из подсистем в рамках комплексной диагностической модели системы контроля технического состояния электродвигателя ЭГПА.

Заключение

Практика эксплуатации электроприводных газопрекачивающих агрегатов показывает, что обычно используемого количества датчиков температуры недостаточно для получения полной информации о температурном состоянии обмотки статора. Аналитические выражения на основе термодинамической модели третьего порядка позволяют получить приближенную оценку средней температуры обмотки статора, но для построения системы мониторинга теплового состояния машины требуется моделирование на основе метода тепловых схем. Такой подход позволяет учесть распределение температуры вдоль обмотки и другие особенности нагрева, связанные с учетом способа охлаждения, конфигурацией внешней поверхности машины, теплоотводом через станину, подшипниковые щиты и так далее. Термодинамические модели могут быть верифицированы с использованием информации, полученной с датчиков температуры. Подобные модели, в сочетании с мониторингом состояния изоляции на основе регистрации емкостных токов утечки, позволяют обеспечить оценку остаточного ресурса изоляции обмотки и прогноз ориентированного срока ее службы.

16. Anandkumar S Malipatil, Ravinder Reddy P. Thermal stress analysis of DC motor using finite element method // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2014. – V. 3. – Iss. 9. – P. 283–290.
17. Numerical study on electromagnetics and thermal cooling of a switched reluctance motor / Jer-Huan Jang, Han-Chieh Chiu, Wei-MonYan, M.C. Tsai, Pin-Yuan Wang // Case Studies in Thermal Engineering. – 2015. – V. 6. – P. 16–27.
18. Plejić M., Goričan V., Hribernik B. FEM thermal modeling of an induction motor // Electric and magnetic fields / Eds. A. Nicolet, R. Belmans. – Boston, MA: Springer, 1995. – P. 155–158.
19. CFD analyses of a radial fan for electric motor cooling / E. Galloni, P. Parisi, F. Marignetti, G. Volpe // Thermal Science and Engineering Progress. – 2018. – V. 8. – P. 470–476.
20. CFD study of forced air cooling and windage losses in a high speed electric motor / K.R. Anderson, Jun Lin, Ch. McNamara, V. Magri // Journal of Electronics Cooling and Thermal Control. – 2015. – V. 5. – № 2. – P. 27–44.
21. Borges S.S., Cezario C.A., Kunz T.T. Design of water cooled electric motors using CFD and thermography techniques // Proc. 2008 18th International Conference on Electrical Machines. – Vilamoura, Portugal, 6–9 September 2008. – P. 1–6.
22. Pechánek R., Bouzek L. Analyzing of two types water cooling electric motors using computational fluid dynamics // Conf. Paper of 15th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2012 ECCE Europe. – Novi Sad, Serbia, 4–6 September, 2012. – P. 1–5.
23. Boglietti A., Cavagnino A., Staton D.A. TEFC induction motors thermal models: a parameter sensitivity analysis // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2005. – V. 41. – Iss. 3. – P. 756–763.
24. Chin Y.K., Staton D.A. Transient thermal analysis using both lumped-circuit approach and finite element method of a permanent magnet traction motor // Proc. IEEE Africon. – Gaborone, Botswana, 2004. – P. 1027–1035.
25. Thermal modelling of an alternator for use in a prediction system / J. Graham, R. Dixon, K. Gregory, J. Pearson // Proc. 2012 UKACC International Conference on Control. – Cardiff, UK, 3–5 September, 2012. – P. 455–460.
26. Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines / A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, M. Shanel, M. Mueller, C. Mejuto // IEEE Transactions On Industrial Electronics. – 2009. – V. 56. – Iss. 3. – P. 871–882.
27. Krok R. Electric mine motor thermal models aiding design and setting thermal protections // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences. – 2012. – V. 60. – № 1. – P. 103–110.
28. Experimental and CFD investigation of a lumped parameter thermal model of a single-sided, slotted axial flux generator / C.H. Lim, G. Airolidi, J.R. Bumby, R.G. Dominy, G.I. Ingram, K. Mahkamov, N.L. Brown, A. Mebarki, M. Shanel // International Journal of Thermal Sciences. – 2010. – V. 49. – Iss. 9. – P. 1732–1741.
29. Ziuzev A.M., Metelkov V.P. Research of the start-up modes of multi-stage blower asynchronous drive // Proc. IEEE IX Int. Conf. on Power Drives Systems (ICPDS). – Perm, Russia, October 3–7, 2016. – P. 1–5.
30. Ziuzev A.M., Metelkov V.P. On an estimate of the rotor winding temperature at start-up of high-voltage induction motor // Proc. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017). – Saint-Petersburg, Russia, 16–19 May, 2017. – P. 1–6.
31. On-line capacitance and dissipation factor monitoring of AC stator insulation / K. Younsi, P. Neti, M. Shah, J. Zhou, J. Krahn, K. Weeber, C. Whitefield // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2010. – V. 17. – Iss. 5. – P. 1441–1452.
32. О возможности использования токов утечки для оценки состояния изоляции асинхронного двигателя / В.П. Метельков, М.Ю. Бородин, К.А. Кондаков, К.Е. Нестеров // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – 2019. – Т. 19. – № 1. – С. 67–74.
33. Метельков В.П., Зюзев А.М., Черных И.В. Система оценки остаточного ресурса изоляции обмотки асинхронного двигателя на основе емкостных токов утечки // Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – № 1 (42). – С. 53–58.

Поступила 23.12.2020 г.

Информация об авторах

Зюзев А.М., доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета.

Крюков О.В., доктор технических наук, заместитель директора по науке ООО «ТЧН-электро».

Метельков В.П., доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета.

Михальченко С.Г., доктор технических наук, заведующий кафедрой промышленной электроники Томского университета систем управления и радиоэлектроники.

UDC 62-83:621.313

ESTIMATION OF THERMAL STATE OF AC ELECTRIC MOTORS OF TRUNK GAS PIPELINES COMPRESSOR STATIONS

Anatoliy M. Ziuzev¹,
a.m.ziuzev@urfu.ru

Oleg V. Kryukov²,
o.v.kryukov@mail.ru

Vladimir P. Metelkov¹,
v.p.metelkov@urfu.ru

Sergey G. Mikhalkenko³,
msg@ie.tusur.ru

¹ Ural Federal University,
19, Mira street, Ekaterinburg, 620002, Russia.

² TSN-electro LLC,
7 A, Electrovoznaya street, Nizhniy Novgorod, 603108, Russia.

³ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by the requirements for equipping the main technological equipment of compressor stations of trunk gas pipelines with monitoring systems. These systems should provide a reliable assessment of the current technical condition of the compressor station and predict its dynamics in the interval between measurements. The information received from the sensors is not always sufficient for such prediction, which necessitates the use of modeling-based approaches.

The main aim of the research is to reveal the possibilities of monitoring the thermal state of large AC motors stator winding by analytical methods and modeling methods using information obtained from temperature sensors.

Objects: AC motors of electric drive gas compressor units.

Methods: analytical methods, as well as simulation using thermodynamic models of an electric motor based on thermal circuits with lumped parameters.

Results. The authors have obtained analytically the relations that allow an approximate assessment of large AC motors stator winding thermal state based on a three-mass thermal circuit. The paper introduces the results of modeling based on thermal circuits with lumped parameters of heating the stator winding of a large AC electric motor with radial cooling channels. It is shown that this approach allows one to obtain the temperature distribution along the winding in the axial direction, which makes it possible to relatively accurately estimate the thermal state of the winding, avoiding the use of very computationally demanding approaches based on the finite element method and computational flow dynamics. It is proposed to use the residual thermal resource of the stator winding to predict its approximate service life based on information about the winding temperature obtained from temperature sensors or from a thermodynamic model.

Key words:

Trunk gas pipeline, gas pumping units, compressor station, AC electric motors, stator winding insulation, thermodynamic model, thermal circuits with lumped parameters, thermal insulation resource.

REFERENCES

1. Puzhaylo A.F. *Energosberezhenie i avtomatizatsiya elektrooborudovaniya kompressornykh stantsiy* [Energy-saving electrical equipment and automation of compressor stations]. Nizhny Novgorod, Vektor TiS Publ., 2011. Vol. 2, 664 p.
2. Kozachenko A.N. *Eksploatatsiya kompressornykh stantsiy* [Compressor station operation]. Moscow, Neft i gaz Publ., 1999. 463 p.
3. Repin D.G., Kryukov O.V. Konsepty sistemy monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya kompressornykh stantsiy [Concepts of a monitoring system for the technical condition of compressor stations]. *Kontrol. Diagnostika*, 2017, no. 12, pp. 30–35.
4. Kryukov O.V., Serebryakov A.V. Energy efficient power supply systems of oil and gas pipelines electric drives. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 102–110. In Rus.
5. Kryukov O.V. Scientific background for the development of intelligent electric drives for oil and gas process units. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 56–62. In Rus.
6. *Pravila ekspluatatsii magistralnykh gazoprovodov. STO Gazprom 2-3.5-454-2010* [Rules for the operation of trunk gas pipelines. STO Gazprom 2-3.5-454-2010]. Moscow, JSC Gazprom, 2010. 216 p.
7. *Primenenie i perspektivy razvitiya elektroprivoda GPA na obyektaakh rekonstruktii i novogo stroitelstva OAO Gazprom* [Application and development prospects of the GPU electric drive at the facilities of reconstruction and new construction of JSC Gazprom]. Report on research work in 3 vols. Moscow, JSC Giprogaztsentr, 2012. 327 p.
8. *Programma povysheniya nadezhnosti raboty i effektivnosti kompressornykh stantsiy s EGPA* [The program of increasing operational reliability and efficiency of compressor stations with EGPU]. Moscow, VNIIGAZ LLC, 2002. 102 p.
9. Aksyutin O.E. *Sovremennoe sostoyanie gazotransportnoy sistemy Rossii* [The current state of the gas transmission system in Russia]. *Gazovaya promyshlennost*, 2010, no. 10. pp. 8–11.
10. Alekseyev B.A., Polyakov F.A., Mamikonyants L.G., Shakaran Yu.G. Problems of powerful electric machines at the CIGRE-2008 session. *Elektrичество*, 2009, no. 3, pp. 60–67. In Rus.
11. Kryukov O.V. *Otsenka ekspluatatsionnykh faktorov EGPA po normativnym trebovaniyam monitoringa* [Evaluation of

- operational factors of EGPU according to regulatory monitoring requirements]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2018, no. 10, pp. 50–57.
12. *Pravila tekhnicheskoy eksploatatsii magistralnykh gazoprovodov. Vedomstvenny rukovodyschchiy dokument VRD 39-1.10-006-2000* [Operation Requirements for Trunk Gas Pipeline. Departmental guidance document VRD 39-1.10-006-2000]. Moscow, 2002.
 13. Kopylov I.P. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1994. 318 p.
 14. Kryukov O.V. Modelirovaniye termodinamicheskikh protsessov v sistemakh s moshchnymi elektricheskimi mashinami [Modeling thermodynamic processes in systems with powerful electric machines]. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2018, no. 9, pp. 9–15.
 15. De Santiago Ochoa J. *FEM analysis applied to electric machines for electric vehicles*. PhD Diss. Abstract. Uppsala, 2011, 54 p.
 16. Anandkumar S Malipatil, Ravinder Reddy P. Thermal Stress Analysis of DC Motor using Finite Element Method. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2014, vol. 3, Iss. 9, pp. 283–290.
 17. Jer-Huan Jang, Han-Chieh Chiu, Wei-MonYan, Tsai M.C., Pin-Yuan Wang. Numerical study on electromagnetics and thermal cooling of a switched reluctance motor. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2015, vol. 6, pp. 16–27.
 18. Plejić M., Goričan V., Hribenik B. FEM thermal modeling of an induction motor. *Electric and Magnetic Fields*. Eds. A. Nicolet, R. Belmans. Boston, MA, Springer, 1995. pp. 155–158.
 19. Galloni E., Parisi P., Marignetti F., Volpe G. CFD analyses of a radial fan for electric motor cooling. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018, vol. 8, pp. 470–476.
 20. Anderson K.R., Jun Lin, McNamara Ch., Magri V. CFD study of forced air cooling and windage losses in a high speed electric motor *Journal of Electronics Cooling and Thermal Control*, 2015, vol. 5, no. 2, pp. 27–44.
 21. Borges S.S., Cezario C.A., Kunz T.T. Design of water cooled electric motors using CFD and thermography techniques, *Proc. 2008 18th International Conference on Electrical Machines*. Vilamoura, Portugal, 6–9 September 2008. pp. 1–6.
 22. Pechánek R., Bouzek L. Analyzing of two types water cooling electric motors using computational fluid dynamics. *Paper of 15th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2012 ECCE Europe*. Novi Sad, Serbia, 4–6 September 2012. pp. 1–5.
 23. Boglietti A., Cavagnino A., Staton D.A. TEFC induction motors thermal models: A parameter sensitivity analysis. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, vol. 41, Iss. 3, pp. 756–763.
 24. Chin Y.K., Staton D.A. Transient thermal analysis using both lumped-circuit approach and finite element method of a permanent magnet traction motor. *Proc. IEEE Africon*. Gaborone, Botswana, 5–17 September 2004. pp. 1027–1035.
 25. James Graham, Roger Dixon, Keith Gregory, John Pearson. Thermal modelling of an alternator for use in a prediction system. *Proc. 2012 UKACC International Conference on Control*. Cardiff, UK, 3–5 September 2012. pp. 455–460.
 26. Boglietti A., Cavagnino A., Staton D., Shanel M., Mueller M., Mejuto C. Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, vol. 56, Iss. 3, pp. 871–882.
 27. Krok R. Electric mine motor thermal models aiding design and setting thermal protections *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 2012, vol. 60, no. 1, pp. 103–110.
 28. Lim C.H., Airolidi G., Bumby J.R., Dominy R.G., Ingram G.I., Mahkamov K., Brown N.L., Mebarki A., Shanel M. Experimental and CFD investigation of a lumped parameter thermal model of a single-sided, slotted axial flux generator. *International Journal of Thermal Sciences*, 2010, vol. 49, Iss. 9, pp. 1732–1741.
 29. Ziuzev A.M., Metelkov V.P. Research of the start-up modes of multi-stage blower asynchronous drive. *Proc. IEEE IX Int. Conf. on Power Drives Systems (ICPDS)*. Perm, October 3–7, 2016. pp. 1–5.
 30. Ziuzev A.M., Metelkov V.P. On an estimate of the rotor winding temperature at start-up of high-voltage induction motor. *Proc. 2017 Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017)*. Saint-Petersburg, Russia, 16–19 May, 2017. pp. 1–6.
 31. Younsi K., Neti P., Shah M., Zhou J., Krahn J., Weeber K., Whitefield C. On-line capacitance and dissipation factor monitoring of AC stator insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010, vol. 17, Iss. 5, pp. 1441–1452.
 32. Metelkov V.P., Borodin M.Yu., Kondakov K.A., Nesterov K.E. Using leakage currents to evaluate the induction motor insulation condition. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 67–74. In Rus.
 33. Metelkov V.P., Ziuzev A.M., Chernykh I.V. System for estimating a residual resource of induction motor winding insulation based on capacitive leakage currents. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2019, no. 1 (42), pp. 53–58. In Rus.

Received: 23 December 2020.

Information about the authors

Anatoliy M. Ziuzev, Dr. Sc., professor, Ural Federal University.

Oleg V. Kryukov, Dr. Sc., Deputy Director, TSN-electro LLC.

Vladimir P. Metelkov, Dr. Sc., professor, Ural Federal University.

Sergey G. Mikhalkenko, Dr. Sc., Head of Industry Electronics Department, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

УДК 624.131

РАЙОНИРОВАНИЕ УЧАСТКОВ СТРОИТЕЛЬСТВА ПРУДОВ-ОТСТОЙНИКОВ ЭЛЬГИНСКОГО КАМЕННОУГОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ В ЯКУТИИ

Строкова Людмила Александровна,
sla@tpu.ru

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

Актуальность исследования обусловлена стремительным ростом геологоразведочной и производственной деятельности в районах вечной мерзлоты в России за последние сорок лет. В статье приведена характеристика площадок размещения прудов-отстойников Эльгинского горно-обогатительного комбината в Республике Саха (Якутия). Инженерно-геологическая оценка территории необходима для того, чтобы поддержать процесс принятия решений по размещению сооружений, а также для того, чтобы строительство объектов осуществлялось с меньшим отрицательным воздействием на окружающую среду, сопровождалось снижением опасности и ущерба как для строительства, так и в целом для общества и экономики.

Целью данного исследования является установление уязвимости территории к техногенному загрязнению на основе изучения инженерно-геологических условий площадок размещения прудов-отстойников.

Объектом исследования является геологическая среда площадок размещения прудов-отстойников. Рассмотрены основные природные компоненты, влияющие на планирование и развитие землепользования: литологический состав; геоморфологические и тектонические условия; физико-механические свойства пород, гидрологические, гидрогеологические и мерзлотные условия района.

Методы. Данное исследование включает в себя краткий обзор соответствующей литературы; анализ информации, полученной из фондов изыскательской компании; определение признаков и методики районирования. Все информационные слои о природной среде обрабатывались, затем объединялись для получения единой инженерно-геологической карты.

Результаты. Приведена характеристика инженерно-геологических условий площадок прудов-отстойников Эльгинского угольного комплекса в Республике Саха (Якутия). Разработана карта инженерно-геологического районирования площадок по уязвимости (сильной, средней, слабой, незначительной) геологической среды к техногенному загрязнению.

Ключевые слова:

Пруд-отстойник, карьерная добыча, грунт, уголь, геологический процесс, физико-механические свойства, районирование, уязвимость.

Введение

Реализация крупных энергопроектов в восточных районах России повысила значимость инженерно-геологической оценки этих территорий, а именно, выявление уже на ранних стадиях проектирования тех факторов геологической среды, которые обеспечивают ее устойчивость к техногенной нагрузке, способствуя предотвращению экономического, социального и финансового ущерба [1–6].

Одним из крупнейших проектов, реализуемых в последние годы на Дальнем Востоке, является создание Эльгинского угольного комплекса на основе крупнейшего по запасам и качеству Эльгинского месторождения коксующихся и энергетических каменных углей, расположенного в юго-восточной части Республики Саха (Якутия). Проектная мощность угольного разреза составляет 30 млн т угля в год. Запасы угля составляют 2,078 млрд т, срок службы разреза оценивается в 96 лет. Реализация объекта приведет к трансформации геологической среды: изменению рельефа, образованию значительных массивов техногенных отложений, перестройке гидрографической сети, изменению состава и режима поверхностных и подземных вод, геологических процессов [7–12].

Оценке инженерно-геологических условий при реализации различных проектов в сложных условиях, в т. ч. в криолитозоне, посвящены работы [4, 14–21]. Многочисленные исследования направлены на изуче-

ние влияния земляных работ на поверхностные и подземные воды [7–10], оценку состояния окружающей среды с помощью ГИС-технологий [22–38]. Одним из перспективных методов оценки устойчивости геологической среды при освоении является типологическое инженерно-геологическое районирование территории, технология выполнения которого подробно изложена в работе В.Т Трофимова и Н.С. Красиловой [13]. Этот метод позволяет решать много задач по рациональному использованию территорий, поэтому давно и широко используется в мире.

Целью данного исследования является описание инженерно-геологических условий площадок размещения прудов-отстойников и их районирование по уязвимости геологической среды к техногенному загрязнению.

Характеристика объекта

По административному делению район работ расположен в Нерюнгринском районе Республики Саха (Якутия), в 400 км на восток от г. Нерюнгри. Месторождение расположено на юго-восточной окраине Алданского нагорья, в пределах Токинской впадины, являющейся составной частью Южно-Якутского каменноугольного бассейна.

Южно-Якутский каменноугольный бассейн является природно-технической системой (ПТС) регионального уровня. ПТС Эльгинского ГОКа относится к системе локального уровня, включающей в себя эле-

ментарные ПТС: карьер, обогатительная фабрика, отвалы вскрышных пород, гидротехнические, транспортные сооружения и др. Работы на Эльгинском разрезе приведут к образованию полости в земной коре объемом более 800 млн м³ и площадью несколько десятков км². Отвалы вскрышных пород будут представлены тремя внешними отвалами общим объемом 833,5 млн м³, и внутренним отвалом объемом 579,7 млн м³ [7]. Гидротехнические сооружения представляют собой пруды-отстойники (№ 1–4, К, рис. 1), под которые отведено порядка 80 га, крупнейшим

объектом среди них станет пруд-отстойник карьерных вод (№ 5) площадью 34,6 га. Наполнение данного объекта произойдет после 2021–2023 гг. Основное преобразование природных комплексов при строительстве объектов I очереди связано с частичным перестроением гидрографической сети бассейна р. Укикит, увеличением мутности воды на определенных участках р. Укикит и её притоков. Пруды-отстойники поверхностного стока и карьерных вод располагаются на слабонаклонных участках с отметками поверхности 852–947 м.

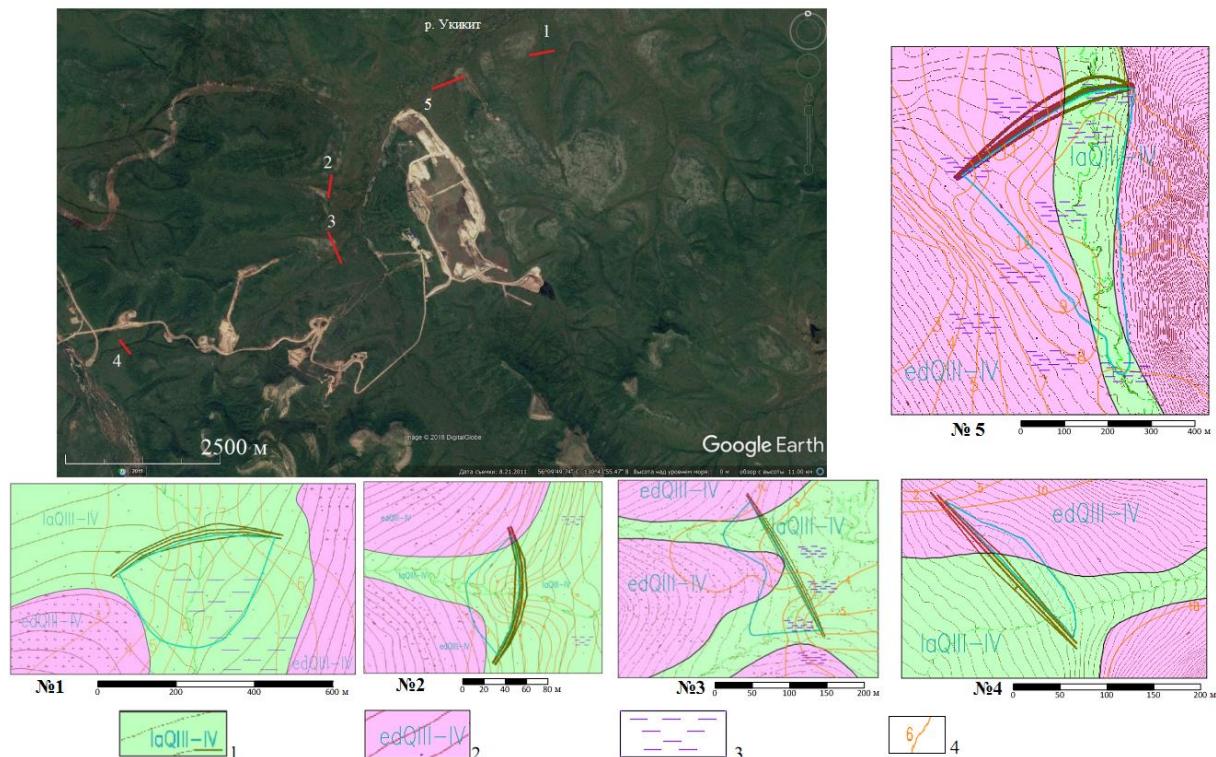


Рис. 1. Местоположение изученных участков на снимке Гугл; схематические геологические карты прудов-накопителей. Условные обозначения: 1 – озерно-аллювиальные отложения; 2 – элювиально-делювиальные отложения; 3 – заболоченность; 4 – изолинии глубины залегания кровли скальных пород

Fig. 1. Location of the studied areas in the Google image; schematic geological maps of settling ponds. Symbols: 1 – lacustrine-alluvial deposits; 2 – eluvial-deluvial deposits; 3 – wetlands; 4 – isolines of the depth of bedrocks

В тектоническом строении территории выделяется четыре структурных этажа. Нижний структурный этаж представляет собой жесткий кристаллический фундамент, сложенный дислоцированными архейскими метаморфитами, насыщенными гранитоидами позднеархейско-протерозойского возраста. Второй – платформенный чехол, сложен рифейскими терригенными и венд-кембрийскими, преимущественно карбонатными отложениями и нижнеюрскими терригенными породами. Третий структурный этаж представлен активизационными структурами мезозойского возраста. Четвертый соответствует этапу неотектонического развития, выраженного глубоким расчленением рельефа, сейсмической активностью района и проявлением трахибазальтового магматизма [39]. По материалам инженерно-геофизических изысканий территория относится к семибалльной сейсмической зоне.

В геологическом строении района принимают участие верхнеюрские отложения нерюнгринской свиты (J₃nr), перекрытые с поверхности верхнечетвертичными и современными отложениями озерно-аллювиального (laQ_{III-IV}) и элювиально-делювиального (edQ_{III-IV}) генезисов [39].

Верхнечетвертичные и современные отложения озерно-аллювиального генезиса (laQ_{III-IV}) имеют широкое распространение по площади, приурочены к долинам водотоков (рис. 1). На площадках прудов-отстойников № 1, 3, 5 первый от поверхности слой с мощностью до 0,4…1,8 м представлен слабо-, среднезаторфованными песками пылеватыми, супесями и суглинками с дресвой, дресвянными, дресвяными и щебенистыми грунтами с песчаным, супесчаным и суглинистым заполнителем, а также торфом бурым среднеразложившимся, подстилаются отложениями

преимущественно аллювиального генезиса. Аллювиальные отложения также залегают первыми от поверхности в центральной части площадок прудов накопителей № 2 и 4. Отложения представлены песками, супесью и суглинками с гравием, гравелистыми, галечниками и гравийными грунтами с песчаным, супесчаным и суглинистым заполнителем, мощностью 0,5…10,2 м. Обломочный материал представлен осадочными, магматическими и метаморфическими породами, плохой, средней и хорошей степени окатанности. Благоприятные условия для образования озерно-аллювиальных отложений обусловлены широким распространением многолетней мерзлоты, боковой эрозией и блужданием русел рек в долинах.

Верхнечетвертичные и современные отложения элювиально-делювиального генезиса (edQ_{III-IV}) имеют широкое распространение, вскрыты с поверхности на склонах водотоков мощностью 0,9…3,7 м. Отложения представлены песками пылеватыми, супесями и суглинками с дресвой, дресвяными, а также дресвяными и щебенистыми грунтами с песчаным, супесчаным и суглинистым заполнителем от 10 до 49 %. Обломочный материал представлен осадочными породами различной прочности.

Верхнеюрские отложения нерюнгриканской свиты (J_{3nr}) имеют повсеместное распространение, залегают под четвертичными отложениями с глубины 0,5…4 м, вскрытой мощностью 0,5…55,0 м. Породы представлены песчаниками и алевролитами различной прочности с пластами и пропластками углей.

В ходе проведенных изысканий 2009–2010 гг. [41] в пределах района освоения Эльгинского угольного месторождения выделены инженерно-геологические элементы (ИГЭ):

ИГЭ-1 Торф бурый, коричневый, среднеразложившийся, имеет локальное распространение по площади, вскрыт с поверхности под почвенно-растительным слоем, мощностью 0,3…0,7 м. На период изысканий грунт находился в мерзлом состоянии, массивной и слоистой криогенной текстуры, при оттаивании средней степени водонасыщения и насыщенный водой.

ИГЭ-2 Суглинок заторфованный бурый, коричневый, серо-коричневый, темно-серый, имеет повсеместное распространение по площади, вскрыт с поверхности под почвенно-растительным слоем и с глубины 3,6 м, мощностью 0,7…2,4 м.

ИГЭ-4 Супесь с дресвой от 1 до 24 %, бурая, темно-серая, серая, темно-коричневая. Грунт имеет повсеместное распространение по площади, вскрыт с поверхности под почвенно-растительным слоем и с глубины 0,5…2,5 м, мощностью 0,7…3,9 м. Обломочный материал представлен песчаником мелкозернистым, от малой до средней прочности.

ИГЭ-7 Дресвянный грунт с супесчаным заполнителем до 33…49 %, имеет повсеместное распространение по площади, вскрыт как с поверхности под почвенно-растительным слоем, так и с глубины 1,0…2,0 м, мощностью 1,2…3,4 м. Обломочный материал представлен алевролитом и песчаником мелкозернистым, серым, малой, средней прочности и прочным.

ИГЭ-9 Супесь гравелистая зеленовато-серого, серовато-коричневого и темно-серого цвета. Грунт имеет ограниченное распространение по площади, вскрыт на глубине 0,6–1,6 м, мощностью 1,6…2,7 м. Обломочный материал представлен магматическими, метаморфическими и осадочными породами различной степени окатанности, от низкой до малой прочности.

ИГЭ-9м Супесь гравелистая твердомерзлая зеленовато-серая, серовато-коричневая и темно-серая. Грунт имеет повсеместное распространение по площади, вскрыт с глубины 2,9…7,0 м, вскрытой мощностью 1,8…5,9 м. Обломочный материал представлен магматическими, метаморфическими и осадочными породами различной степени окатанности, от низкой до малой прочности.

ИГЭ-11 Песок средней крупности серый, зеленовато-серый, желто-коричневый и темно-серый. Грунт имеет ограниченное распространение по площади. Вскрыт с поверхности под почвенно-растительным слоем и с глубины 1,0…3,3 м, мощностью 0,5…1,8 м.

ИГЭ-11м Песок средней крупности, твердомерзлый серый, зеленовато-серый, желто-коричневый и темно-серый. Грунт имеет ограниченное распространение по площади. Вскрыт с глубины 2,6…5,8 м, мощностью 1,1…2,4 м.

ИГЭ-12м Песок гравелистый твердомерзлый серо-коричневый, зеленовато-коричневый, имеет ограниченное распространение по площади, вскрыт с глубины 1,5…5,0 м, мощностью 1,4…1,5 м. Обломочный материал представлен магматическими, метаморфическими и осадочными породами различной степени окатанности, от низкой прочности до малой.

ИГЭ-13 Галечниковый грунт с супесчаным заполнителем до 32…49 % коричневого и коричневато-серого цвета. Обломочный материал представлен магматическими, метаморфическими и осадочными породами различной степени окатанности, от низкой прочности до малой. Грунт имеет локальное распространение по площади, вскрыт с глубины 1,9 м, мощностью 2,1 м.

ИГЭ-13м Галечниковый грунт с супесчаным заполнителем, твердомерзлый. Заполнитель коричневато-серого и коричневого цвета до 31…43 %. Обломочный материал представлен магматическими, метаморфическими и осадочными породами различной степени окатанности, от низкой прочности до малой. Грунт имеет локальное распространение по площади, вскрыт с глубины 2,0…5,0 м, вскрытой мощностью 1,3…5,0 м.

Обобщенные характеристики основных физико-механических свойств грунтов приведены в работе [40].

В геокриологическом отношении территория расположена в зоне сплошного развития многолетнемерзлых пород. Граница сезонного оттаивания составляет четыре метра. Грунты имеют массивную и слоистую криогенную текстуру. Скальные грунты находятся в морозном состоянии. На глубине годовых нулевых амплитуд температура изменяется от минус 0,1 до минус 1,5 °C.

Гидрогеологические условия территории характеризуются развитием надмерзлотных грунтовых вод, вскрытых локально – только на площадке размещения пруда-отстойника № 3 в трех шурфах на глубине 1...2 м. Водовмещающими грунтами являются щебенистые, галечниковые грунты с супесчаным заполнителем и алевролиты «рухляки». Питание грунтовых вод происходит в основном за счёт инфильтрации атмосферных осадков и оттаивания сезонномёрзлых грунтов, водоупором служат вечномерзлые грунты [40]. С прекращением питания атмосферными осадками, наступлением отрицательных температур воздуха, перемерзанием русел водотоков надмерзлотный водоносный горизонт истощается, сокращается и к весне в основном прекращает свое существование. В местах отсутствия плотных мерзлых пород вода по трещинам свободно фильтруется вниз, пополняя запасы нижележащего комплекса пород.

Рельеф территории относится к эрозионно-денудационному типу пологих и средней крутизны склонов плато на осадочных породах юры. Аккумулятивный тип рельефа приурочен к аллювиальным

поймам рек Ундыткан, Укикит, Эльга. По рекам Алгома, Ундыткан и Эльга встречены моренные поверхности муруктинского оледенения. В месте слияния р. Ундыткан в р. Ундытын встречены моренные поверхности сартанского и муруктинского оледенений. Основные морфометрические параметры рельефа, такие как абсолютные отметки, уклон и экспозиция склонов (рис. 2), получены по цифровой модели рельефа SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), загруженной с сайта USGS Earthexplorer. Именно с этими параметрами связан поверхностный сток и дренирование территории, ее теплообеспеченность. Местоположение прудов-отстойников приведено на рис. 2, б.

В целом инженерно-геологические условия района являются достаточно сложными в связи с высокой сейсмической активностью района, наличием многолетней мерзлоты и таких геологических процессов, как поверхностное заболачивание площадки, морозное выпучивание каменного материала на склонах водоразделов, морозное пучение несвязанных грунтов в зимний период и присутствие в разрезе сильнотрешиноватых углей, алевролитов и песчаников «рухляков».

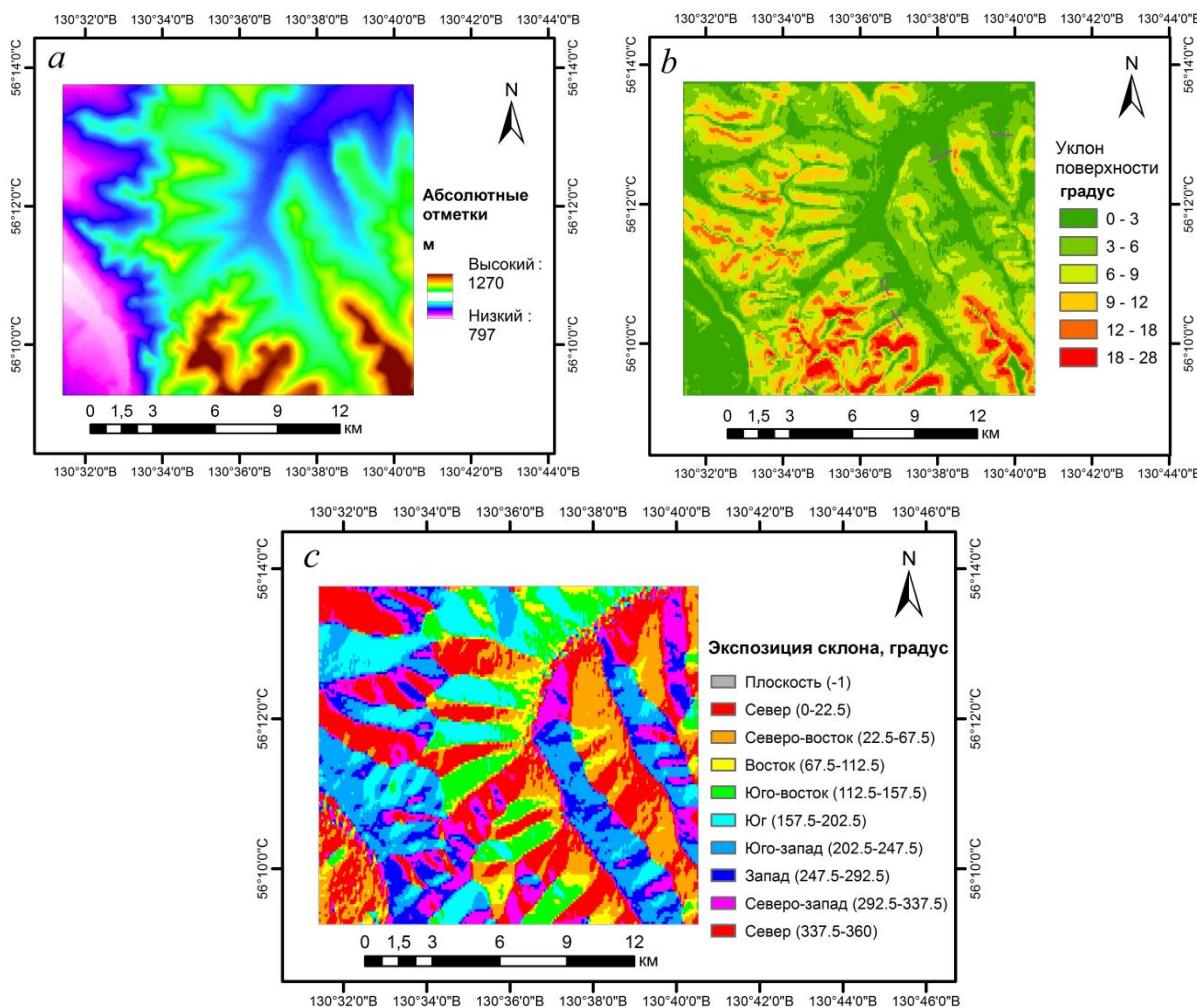


Рис. 2. Характеристика особенностей рельефа района работ

Fig. 2. Characteristics of the features of the study area

Методика работ

Изучение уязвимости геологической среды к техногенному загрязнению требует оценки соотношения водопроницаемых и водоупорных пород в разрезе. Использовать такие распространенные методики по оценке защищенности подземных вод, как ВСЕГИНГЕО [22], DRASTIC, SINTACS, GOD [23], не представляется возможным из-за спорадического распространения надмерзлотных подземных вод, а также неопределенности конструктивных особенностей дамб-накопителей на момент предпроектного изучения территории. Из имеющихся данных по площадкам, отведенным под пруды-отстойники, следует, что площадки неоднородны по мощности покровных отложений, их строению и фильтрационным характеристикам. Анализ и систематизация данных методом последовательного инженерно-геологического районирования площадок размещения прудов-отстойников позволили выделить участки, обладающие определенным набором показателей, оценивающих грунтовую толщу как естественный противофильтрационный барьер.

Результаты

Оценка инженерно-геологических условий послужила основой для составления карты районирования по степени уязвимости геологической среды к техногенному загрязнению (рис. 3). Работы выполнены автором единолично в ТПУ весной 2019 г. с помощью программ MS Excel и Surfer. Вначале в таблицу MS Excel были занесены данные о местоположении скважин (по строкам), их абсолютных отметках, номерах вскрытых скважинами инженерно-геологических элементов, их мощности, глубинах залегания кровли скальных грунтов, кровли многолетнемерзлых пород и уровня подземных вод (по столбцам). Далее для каждой скважины рассчитано приблизительное время инфильтрации загрязняющего фронта до уровня грунтовых вод. Расчет производился согласно методике, разработанной В.М. Гольдбергом [22], с учетом мощности слабопроницаемых пород, коэффициента фильтрации, эффективной пористости пород и напора в хвостохранилище, принятого равным единице. Анализ полученных значений времени инфильтрации и имеющихся публикаций позволил выделить четыре категории по уязвимости, которые также были добавлены к данным по каждой скважине. Следующим шагом стало проставление по каждой скважине – к какому району, подрайону, участку относится ее местоположение. Этот анализ позволил оконтурить в Surfer зоны с разной уязвимостью, обозначенные на карте штриховкой.

При типологическом районировании самые крупные подразделения (районы) выделялись по величине мощности покровных пород: А – при мощности до 2,0 м; Б – от 2,0 до 5,0 м; В – от 5,0 до 10,0 м и Г – при мощности более 10,0 м.

Внутри районов выделены подрайоны по величине коэффициента фильтрации (по ГОСТ 25100):

- а) слабопроницаемые с коэффициентом фильтрации менее 0,3 м/сут;
- б) водопроницаемые с коэффициентом фильтрации в интервале 0,3–3,0 м/сут;
- в) сильноводопроницаемые с коэффициентом фильтрации от 3,0 до 30 м/сут.

Выделенные подрайоны, в свою очередь, подразделялись на участки по литологическому составу грунтовой толщи, физико-механическим свойствам выделенных инженерно-геологических элементов (ИГЭ): 1, 2, 4, 7, 9, 11, 13 [40].

Класс участка на карте обозначается тремя символами: первый символ – заглавная русская буква, соответствующая району, второй – строчная буква русского алфавита, соответствующая подрайону, третий символ – номер инженерно-геологического элемента.

По условиям уязвимости геологической среды к техногенному загрязнению выделяются четыре категории:

I категория характеризуется как *сильно уязвимые* территории. К данной категории относятся участки, сложенные с поверхности элювиально-делювиальным дресвыенным грунтом с супесчаным заполнителем до 31–41 % (ИГЭ-7), мощностью до 5,9 м; а также аллювиальными галечниками грунтами с супесчаным заполнителем (ИГЭ-13) и песками гравелистыми (ИГЭ-11), мощностью 2,5–5,9 м, подстилаемые песчаниками и алевролитами сильновыветрелыми «рухляками» нерюнгринской свиты (участки А-б-7, Б-б-7, Б-б-13, В-в-11). Время продвижения фронта загрязнения на таких участках составляет менее 5 суток.

II категория – *средне уязвимые* территории. К данной категории относятся участки (А-б-9, Б-б-2, Б-б-9, В-б-7, В-б-13, Г-б-7, Г-б-13), сложенные с поверхности супесями гравелистыми (ИГЭ-9), суглинками с дресвой песчаников от 2 до 18 %, мощностью от 2,9 до 4 м. Эти отложения подстилаются аллювиальными крупнообломочными грунтами мощностью до 2,5 м, залегающими на песчаниках, алевролитах малопрочных и средней прочности. Время продвижения фронта загрязнения на таких участках составляет от 5 до 10 суток.

III категория – *слабо уязвимые* территории. К данной категории относятся участки, сложенные с поверхности торфом среднеразложившимся (ИГЭ-1), заторфованными суглинками с включениями дресвы мелкозернистых песчаников (ИГЭ-2), супесью с дресвой от 1 до 24 % (ИГЭ-4), мощностью до 4,6 м. Грунты подстилаются верхнеюрскими песчаниками, алевролитами прочными и средней прочности (А-а-4, А-б-1, Б-а-4, Б-б-1, В-а-4, В-б-1, В-б-2). Время продвижения фронта загрязнения составляет 10–15 суток.

IV категория – *незначительно уязвимые* территории (участки Г-а-4, Г-б-1, Г-б-9). К данной категории относятся участки, сложенные с поверхности в основном глинистыми грунтами мощностью свыше 15 м (ИГЭ-4), подстилаемые верхнеюрскими песчаниками, алевролитами прочными и средней прочности. Время продвижения фронта загрязнения составляет более 15 суток.

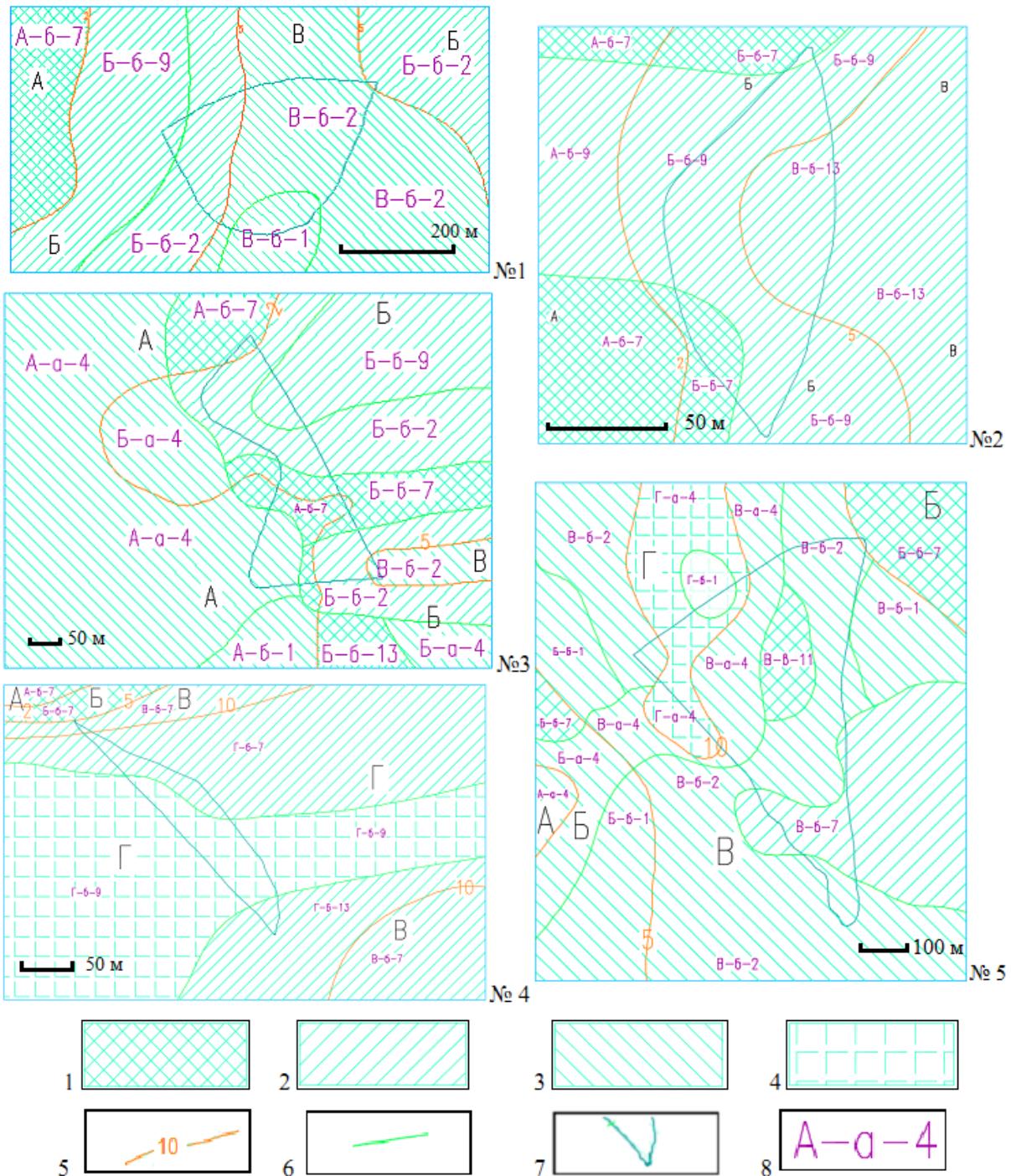


Рис. 3. Карта типологического инженерно-геологического районирования площадок размещения прудов-отстойников по степени уязвимости геологической среды к техногенному загрязнению. Категории участков: 1 – сильно уязвимые; 2 – средне уязвимые; 3 – слабо уязвимые; 4 – незначительно уязвимые; другие обозначения: 5 – границы районов по глубине залегания кровли скальных пород; 6 – границы участков, 7 – границы проектируемых прудов отстойников; 8 – класс участка

Fig. 3. Map of typological engineering and geological zoning of sites for settling ponds by the degree of vulnerability of the geological environment to anthropogenic pollution. Site categories: 1 – highly vulnerable; 2 – moderate vulnerable; 3 – low vulnerable; 4 – negligible vulnerable; other designations: 5 – boundaries of areas based on the depth of the rock roof; 6 – boundaries of sites, 7 – boundaries of projected settling ponds; 8 – site class

Заключение

В статье приведена инженерно-геологическая оценка территории площадок прудов-отстойников с точки зрения литологического состава, рельефа, физико-механических и фильтрационных свойств грунтов. Ав-

тором впервые для района Эльгинского угольного месторождения проведена оценка времени инфильтрации загрязняющего фронта и составлена карта районирования по степени уязвимости геологической среды к возможному техногенному загрязнению. Все информа-

мационные слои о природной среде вначале обрабатывались в MS Excel, затем объединялись для получения единой инженерно-геологической карты в Surfer. На разработанной карте инженерно-геологического районирования выделены участки с разной степенью уязвимости территории к техногенному загрязнению. Дана характеристика выделенных категорий. Районирование территории может служить основой для принятия обоснованных решений при проектировании ин-

женерных сооружений, базой для организации мониторинга, экспертизы. Эффективность рассмотренных в работе критериев следует уточнять путем верификации с натурными данными в рамках системы мониторинга.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасиади Э.И., Абатурова И.В., Тарасевич А.В. Опыт инженерно-геологического районирования территории строительства Воронцовского ГОКа с целью рационального использования и охраны геологической среды // Известия Уральского государственного горного университета. – 2001. – Т. 13. – С. 241–246.
2. Abaturova I.V., Storozhenko I.A., Korolyova I.G. Influence of the components of engineering-geological conditions on the extraction of minerals in the permafrost zone // Mining journal. – 2015. – V. 9. – P. 22–27.
3. Грязнов О.Н. Инженерно-геологические условия Урала: науч. моногр. – Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного горного университета, 2017. – 240 с.
4. Ганова С.Д. Геоэкологические аспекты создания и функционирования природно-технических систем в условиях криолитозоны Западной Сибири // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2017. – № 5. – С. 58–64.
5. Комплексный метод снижения пылевой и газовой опасностей в угольных шахтах / О.В. Скопинцева, С.Д. Ганова, Н.В. Демин, В.И. Патичев // Горный журнал. – 2018. – № 11. – С. 97–100.
6. Voznesenskii E.A., Latypov A., Zharkova N. Seismic fluidification of soil in the bed of the Kazanskaya Riviera Tower // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2016. – V. 53 (4). – P. 257–263.
7. Nikolaeva N.A., Piningin D.D. Формирование геотехнических систем при разработке Эльгинского каменноугольного месторождения // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 8-1. – С. 153–157. URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=38864> (дата обращения: 03.11.2020).
8. Гриб Н.Н., Кузнецов П.Ю. Прогнозирование физико-механических свойств углевмещающих пород на основе данных геофизических исследований скважин и математического аппарата Марковской нелинейной статистики // Уголь. – 2018. – № 1. – С. 68–73.
9. Скоморошко Ю.Н. Оценка устойчивости горных пород в бортах карьеров по результатам геофизических исследований скважин (на примере Эльгинского месторождения): дис. ... канд. техн. наук. – Нерюнгри, 2001. – 181 с.
10. Хоютанов Е.А. Обоснование резервов совершенствования процессов управления зольностью угля при разработке сложноструктурных месторождений (на примере Эльгинского месторождения): дис. ... канд. техн. наук. – Якутск, 2016. – 155 с.
11. Бердюгин В.А. Условия отработки «Эльгинского» месторождения каменных углей и планируемые комплексы оборудования для его разработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдел. выпуск. – 2009. – № 10. – С. 373–379.
12. Nikolaeva N.A., Piningin D.D. Оценка факторов техногенного воздействия на природную среду Эльгинского угольного комплекса // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. URL: www.science-education.ru/119-14545 (дата обращения: 05.11.2020).
13. Трофимов В.Т., Красилова Н.С. Инженерно-геологические карты. – М.: КДУ, Добросвет, 2018. – 383 с.
14. Cheskidov V.V., Manevich A.I. Engineering and geological support for slope stability monitoring as a part of transport infrastructure construction projects // Mining science and technology. – 2016. – № 1. – С. 50–57.
15. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 33. – № 012046. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/33/1/012046> (дата обращения: 05.11.2020).
16. Строкова Л.А., Ермолова А.В. Районирование территории по степени опасности оседания земной поверхности при проектировании магистрального газопровода в южной Якутии // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 10. – С. 59–68.
17. Strokova L.A. Modeling of tunneling-induced ground surface movement Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 24. – 012030. URL: <http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012030> (дата обращения: 05.11.2020).
18. Строкова Л.А., Епифанова Е.А., Коржнева Т.Г. Численный анализ поведения основания опоры моста на старой железнодорожной линии // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 125–139.
19. Епифанова Е.А., Строкова Л.А. Оценка деформаций исторического здания в Томске с помощью комплексного подхода, основанного на сочетании наземного лазерного сканирования и конечно-элементного моделирования // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 5. – С. 27–41.
20. Епифанова Е.А., Строкова Л.А. Анализ деформаций проекционной мачты при помощи наземного лазерного сканирования и метода конечных элементов // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 7–17.
21. Strokova L. Recognition of geological processes in permafrost conditions // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2019. – V. 78 (8). – P. 5517–5530.
22. Гольдберг В.М. Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. – 248 с.
23. Oroji B. Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC and GOD in the Asadabad plain // Journal of Materials and Environmental Sciences. – 2018. – V. 9 (6). – P. 1809–1816.
24. Influence of coal mining on groundwater resources and countermeasures in Shanbei energy and chemical base / M.S. Zhang, Y. Dong, R.J. Du, X.F. Gu // Earth Science Frontiers. – 2010. – V. 17 (6). – P. 235–246.
25. Effects of coal mining on shallow water resources in semiarid regions: a case study in the Shennan mining area, Shaanxi, China / W. Qiao, W.P. Li, T. Li, J.Y. Chang, Q. Wang // Mine Water Environment. – 2017. – V. 36 (1). – P. 104–113.
26. Wang K., Lin Z.B., Zhang R.D. Impact of phosphate mining and separation of mined materials on the hydrology and water environment of the Huangbai River basin, China // Sci. Total Environment. – 2016. – V. 543. – P. 347–356.
27. Research and development of the mine geological environment evaluation system / W.W. Jia, G.D. Bao, X.W. Wu, S.W. Jiang, C. Zhai // Advanced Materials Research. – 2011. – V. 270. – P. 1354–1359.
28. Ullah K.M., Mansourian A. Evaluation of land suitability for urban land-use planning: Case study Dhaka city // Transactions in GIS. – 2016. – V. 20 (1). – P. 20–37.
29. Martínez-Graña A.M., Goy J.L., Zazo C. Engineering geology maps for planning and management of natural parks: «Las Batuecas-Sierra de Francia» and «Quilamas» (Central Spanish System, Salamanca, Spain) // Geosciences. – 2013. – V. 1. – P. 46–62.
30. Variations in the building site categories in the underground mining region of Doubrava (Czech Republic) for land use

- planning / M. Marschalko, I. Yilmaz, M. Bednárik, K. Kubecka // Engineering Geology. – 2011. – V. 122. – P. 169–178.
31. Economic vulnerability and regional implications of a low carbon emissions future / D.A. Fleming-Muñoz, L. Poruschi, T. Measham, J. Meyers, M. Moglia // Australian Journal of Agricultural and Resource Economics. – 2020. – V. 64. – P. 575–604. DOI: 10.1111/1467-8489.12356
32. The multi-risk vulnerability of global coal regions in the context of mine closure / K. Svobodova, J.R. Owen, E. Lebre, M. Edraki, A. Littleboy // Proceedings of the 13th International Conference on Mine Closure / Eds. A.B. Fourie, M. Tibbett. – Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2019. – P. 553–562. DOI: doi.org/10.36487/ACG_rep/1915_45_Svobodova
33. Gupta P.K., Sharma D. Assessment of hydrological and hydrochemical vulnerability of groundwater in semi-arid region of Rajasthan, India // Sustainable Water Resources Management. – 2019. – V. 5. – P. 847–861. URL: <https://doi.org/10.1007/s40899-018-0260-6> (дата обращения: 05.11.2020).
34. A GIS-based modified DRASTIC approach for geospatial modeling of groundwater vulnerability and pollution risk mapping in Korba district, Central India / S.S. Singha, S. Pasupuleti, S. Singha et al. // Environmental Earth Sciences. – 2020. – V. 78. – Article number: 628. DOI: doi.org/10.1007/s12665-019-8640-2
35. Tai X, Xiao W., Tang Y. A quantitative assessment of vulnerability using social-economic-natural compound ecosystem framework in coal mining cities // Journal of Cleaner Production. – 2020. – V. 258. – № 120969. DOI: doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120969.
36. Lv X., Xiao W., Zhao Y., Zhang W., Li S., Sun H. Drivers of spatio-temporal ecological vulnerability in an arid, coal mining region in Western China // Ecological Indicators. – 2019. – V. 106. – No. 105475. doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105475.
37. Mayer A., Smith E.K., Rodriguez J. Concerned about coal: security, dependence, and vulnerability among coal dependent communities in western Colorado // Energy Research & Social Science. – 2020. – V. 70. – № 101680. DOI: doi.org/10.1016/j.erss.2020.101680.
38. Gatto A., Busato F. Energy vulnerability around the world: the global energy vulnerability index (GEVI) // Journal of Cleaner Production. – 2020. – V. 253. – № 118691. DOI: doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118691.
39. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-52 – Томмот. Объяснительная записка / А.В. Радьков, А.В. Молчанов, А.В. Терехов, Е.В. Беленко и др. – СПб.: Картографическая фабрика Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ), 2016. – 276 с.
40. Опыт инженерно-геологического районирования по несущей способности грунтов промплощадки Эльгинского ГОК в Якутии / Л.А. Строкова, С.А. Дмитриева, Н.В. Осьмушкина, А.В. Осьмушкин // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 175–185.
41. Осьмушин А.В., Осьмушкина Н.В. и др. Отчет о производстве инженерно-геологических изысканий на объекте: «Эльгинский горно-обогатительный комплекс. I очередь строительства» на стадии проектная документация. – Неронгри: Неронгристройизыскания, 2010. – 1314 с.

Поступила 24.09.2020 г.

Информация об авторах

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

UDK 624.131

ZONING OF CONSTRUCTION SITES OF THE SETTLING PONDS OF THE ELGA COAL FIELD IN YAKUTIA

Lyudmila A. Strokova,
sla@tpu.ru

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

The study is relevant due to the rapid growth of mining exploration and production activities in the permafrost regions of Russia over the last forty years. This paper presents the characteristics of the soils of the settling ponds of the Elga coal field in the Republic of Sakha (Yakutia) on vulnerability of the geological environment to contamination. An engineering-geological evaluation is necessary in order to prepare decision making on land planning and land use of the area as well as to ensure smaller negative impact of industrial and infrastructure development on environment and reducing hazards and damage to constructions, people and property.

This study aims to establish the vulnerability of the territory to man-made pollution based on the study of engineering and geological conditions of the sites of settling ponds.

Object of research is the geological environment. The paper considers the main natural components, which influence land use planning and development, such as lithology; topography; seismotectonic; geotechnic; hydrology-hydrogeology and permafrost.

This study includes a brief review of relevant literature, and a summary of information obtained from geological survey company files. All information layers about the natural environment were manipulated and combined to produce uniform engineering geological map. We produced a zoning map of the study area that shows zones with different degree of geological environment vulnerability of contamination: high, moderate, low, negligible vulnerability.

Key words:

Settling pond, open-pit mining, soil, coal, geological process, physical and mechanical properties, zoning, vulnerability.

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

REFERENCES

1. Afanasiadi E.I., Abaturova I.V., Tarasevich A.V. Experience of engineering-geological zoning of the territory of construction of Vorontsov GOK for the purpose of rational use of the geological environment protection. *News of the Ural state mining University*, 2001, vol. 13, pp. 241–246. In Rus.
2. Abaturova I.V., Storozhenko I.A., Korolyova I.G. Influence of the components of engineering-geological conditions on the extraction of minerals in the permafrost zone. *Mining journal*, 2015, vol. 9, pp. 22–27. In Rus.
3. Gryaznov O.N. *Inzhenerno-geologicheskie usloviya Urala* [Engineering-geological conditions of the Urals: scientific monograph]. Ekaterinburg, Ural state mining university Publ., 2017. 240 p.
4. Ganova S.D. Geoelectrical aspects of creation and functioning of natural and technical systems in the conditions of the cryolithozone of Western Siberia. *Proceedings of Higher Schools. Geology and exploration*, 2017, no. 5, pp. 58–64. In Rus.
5. Scopinzeva O.S., Ganova S.D., Demin N.V., Papichev V. I. Integrated method of dust and gas hazard reduction in coal mines. *Mining Journal*, 2018, vol. 11, pp. 97–100. In Rus. DOI: 10.17580/gzh.2018.11.18.
6. Voznesenskii E.A., Latypov A., Zharkova N. Seismic Fluidification of Soil in the Bed of the Kazanskaya Riviera Tower. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2016, vol. 53, Iss. 4, pp. 257–263.
7. Nikolaeva N.A., Pinigin D.D. Formation of geotechnical systems in the development of Elgin coal Deposit. *Fundamental research*, 2015, no. 8-1, pp. 153–157. In Rus.
8. Grib N.N., Kuznetsov P.Yu. Prediction of physical and mechanical properties of coal-bearing rocks on the basis of well logging data and mathematical apparatus of Markov nonlinear statistics. *Ugol (Russian Coal Journal)*, 2018, no. 1, pp. 68–73. In Rus.
9. Skomorosko Yu.N. *Otsenka ustoychivosti gornykh porod v bortakh karerov po rezul'tatam geofizicheskikh issledovaniy skvazhin (na primere Elginskogo mestorozhdeniya)*. Dis. Kand. nauk [Evaluation of rock stability in the sides of the quarries on the basis of geophysical studies of wells (on the example of Elga field)]. Cand. Diss.]. Neryungri, 2001. 181 p.
10. Khoyutanov E.A. *Obosnovanie rezervov sovershenstvovanya protsessov upravleniya zolnostyu uglya pri razrabotke slozhostrukturnykh mestorozhdeniy (na primere Elginskogo mestorozhdeniya)*. Dis. Kand. nauk [Substantiation of reserves of improving the management of coal ash in development of complex fields (on the example of the Elga field)]. Cand. Diss.]. Yakutsk, 2016. 155 p.
11. Berdugin V.A. Conditions of mining of the Elga coal field and planned complexes of equipment for its development. *Mining information Bulletin*, 2009, vol. 10, pp. 373–379. In Rus.
12. Nikolaeva N.A., Pinigin D.D. Assessment of factors of technogenic impact on the natural environment of the Elginsky coal complex. *Modern problems of science and education*, 2014, no. 5. In Rus. Available at: www.science-education.ru/119-14545 (accessed 05 November 2020).
13. Trofimov V.T., Krasilova N.S. *Inzhenerno-geologicheskie karty* [Engineering-geological maps]. Moscow, KDU, Dobrosvet Publ., 2018. 383 p.
14. Cheskidov V.V., Manevich A.I. Engineering and geological support for slope stability monitoring as a part of transport infrastructure construction projects. *Mining science and technology*, 2016, no. 1, pp. 50–57. In Rus.
15. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33, 01246. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/33/1/012046> (accessed 5 November 2020).
16. Strokova L.A., Ermolaeva A.V. Zoning according to the hazard level of earth surface subsidence when designing the main gas pipeline in south Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 10, pp. 59–68. In Rus.
17. Strokova L. A. Modeling of tunneling-induced ground surface movement Scientific and Technical Challenges in the Well Drilling Progress. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental*

- Science*, 2015, vol. 24, 012030. Available at: <http://iopscience.iop.org/1755-1315/24/1/012030> (accessed 5 November 2020).
18. Strokova L.A., Epifanova E.A., Korzhneva T.G. Numerical analysis of bridge foundation behaviour on the old railway line. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328 (5), pp. 125–139. In Rus.
 19. Epifanova E.A., Strokova L.A. Evaluation of deformation of a historic building in Tomsk by an Integrated Approach Based on Terrestrial Laser Scanner and Finite Element Modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329 (5), pp. 27–41. In Rus.
 20. Epifanova E.A., Strokova L.A. Numerical analysis of deformations of the lighting mast by ground laser scanning and finite elements method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no 5, pp. 7–17. In Rus.
 21. Strokova L. Recognition of geological processes in permafrost conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78 (8), pp. 5517–5530.
 22. Goldberg V. M. *Vzaimosvyaz zagryazneniya podzemnykh vod i prirodnoy sredy* [The relationship of groundwater pollution and the environment]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1987. 248 p.
 23. Oroji B. Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC and GOD in the Asadabad plain. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 2018, vol. 9 (6), pp. 1809–1816.
 24. Zhang M.S., Dong Y., Du R.J., Gu X.F. Influence of coal mining on groundwater resources and countermeasures in Shanbei energy and chemical base. *Earth Science Frontiers*, 2010, vol. 17 (6), pp. 235–246.
 25. Qiao W., Li W.P., Li T., Chang J.Y., Wang Q. Effects of coal mining on shallow water resources in semiarid regions: a case study in the Shennan mining area, Shaanxi, China. *Mine Water Environment*, 2017, vol. 36 (1), pp. 104–113.
 26. Wang K., Lin Z.B., Zhang R.D. Impact of phosphate mining and separation of mined materials on the hydrology and water environment of the Huangbai River basin, China. *Sci. Total Environment*, 2016, vol. 543, pp. 347–356.
 27. Jia W.W., Bao G.D., Wu X.W., Jiang S.W., Zhai C. Research and development of the mine geological environment evaluation system. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 270, pp. 1354–1359.
 28. Ullah K.M., Mansourian A. Evaluation of land suitability for urban land-use planning: case study Dhaka city. *Transactions in GIS*, 2016, vol. 20 (1), pp. 20–37.
 29. Martínez-Graña A.M., Goy J.L., Zazo C. Engineering geology maps for planning and management of natural parks: «Las Batuecas-Sierra de Francia» and «Quilamas» (Central Spanish System, Salamanca, Spain). *Geosciences*, 2013, vol. 1, pp. 46–62.
 30. Marschalko M., Yilmaz I., Bednárik M., Kubečka K. Variations in the building site categories in the underground mining region of Doubrava (Czech Republic) for land use planning. *Engineering Geology*, 2011, vol. 122, pp. 169–178.
 31. Fleming-Muñoz D.A., Poruschi L., Measham T., Meyers J., Moglia M. Economic vulnerability and regional implications of a low carbon emissions future. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 2020, vol. 64, pp. 575–604. DOI: 10.1111/1467-8489.12356
 32. Svobodova K., Owen J.R., Lebre E., Edraki M., Littleboy A. The multi-risk vulnerability of global coal regions in the context of mine closure. *Proceedings of the 13th International Conference on Mine Closure*. Eds. A.B. Fourie, M. Tibbett. Perth, Australian Centre for Geomechanics, 2019. pp. 553–562. DOI: doi.org/10.36487/ACG_rep/1915_45_Svobodova
 33. Gupta P.K., Sharma D. Assessment of hydrological and hydrochemical vulnerability of groundwater in semi-arid region of Rajasthan, India. *Sustainable Water Resources Management*, 2019, vol. 5, pp. 847–861. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40899-018-0260-6> (accessed 5 November 2020).
 34. Singha S.S., Pasupuleti S., Singha S. A GIS-based modified DRASTIC approach for geospatial modeling of groundwater vulnerability and pollution risk mapping in Korba district, Central India. *Environmental Earth Sciences*, 2019, vol. 78, no. 628. DOI: doi.org/10.1007/s12665-019-8640-2
 35. Tai X., Xiao W., Tang Y. A quantitative assessment of vulnerability using social-economic-natural compound ecosystem framework in coal mining cities. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 258, no. 120969. DOI: doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120969.
 36. Lv X., Xiao W., Zhao Y., Zhang W., Li S., Sun H. Drivers of spatio-temporal ecological vulnerability in an arid, coal mining region in Western China. *Ecological Indicators*, 2019, vol. 106, no. 105475. DOI: doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105475.
 37. Mayer A., Smith E.K., Rodriguez J. Concerned about coal: security, dependence, and vulnerability among coal dependent communities in western Colorado. *Energy Research & Social Science*, 2020, vol. 70, no. 101680. DOI: doi.org/10.1016/j.erss.2020.101680.
 38. Gatto A., Busato F. Energy vulnerability around the world: The global energy vulnerability index (GEVI). *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 253, no. 118691. DOI: doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118691.
 39. Radkov A.V., Molchanov A.V., Terekhov A.V., Belenko E.V. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (trete pokolenie)*. Seriya Aldano-Zabaykalskaya. List O-52 – Tommot [The state geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Series Aldano-Zabaikalskaya. Sheet O-52-Tommot. Explanatory note. St-Petersburg, Map factory VSEGEI Publ., 2016. 276 p.
 40. Strokova L.A., Dmitrieva S.A., Osmushkin A.V., Osmushkin A.V. Experience of engineering-geological zoning on bearing capacity of soils of the industrial site of Elga coal-preparation plant in Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 175–185. In Rus.
 41. Osmushkin A.V., Osmushkina N.V. *Otchet ob inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyah na obekte: «Elginsky gornoobogatitelny kompleks. I ochered stroitelstva» nf stadia proektnaya dokumentatsiya* [Report on the production of engineering-geological surveys at the facility: «Elga mining and processing complex. I stage of construction». The stage of Project Documentation]. Neryungri, Neryungristroyizyskaniya Publ., 2010. 1314 p.

Received: 24 September 2020.

Information about the authors

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

УДК 621.313.282.2

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ДВУХКАТУШЕЧНОЙ СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВИБРОУДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

Нейман Людмила Андреевна¹,
neuman31@gmail.com

Нейман Владимир Юрьевич¹,
nv.nstu@ngs.ru

¹ Новосибирский государственный технический университет,
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

Актуальность исследования обусловлена тем, что силовые электрические импульсные системы, созданные на основе линейных электромагнитных машин ударного и виброударного действия, являются перспективными для применения в технологиях по интенсификации процессов, связанных с поиском, добычей и переработкой георесурсов. В вопросах энергосбережения особый интерес вызывают линейные синхронные электромагнитные машины возвратно-поступательного движения ударного и виброударного действия. Частота ударов бойка в данных машинах синхронно связана с частотой источника промышленной сети переменного тока. К главным достоинствам оборудования, использующего линейные синхронные электромагнитные машины ударного и виброударного действия, относится снижение потребления электрической энергии при работе в резонансных режимах или близких к резонансным режимам. Исследование данных режимов связано с построением точных динамических моделей различных модификаций синхронных электромагнитных машин ударного и виброударного действия, работающих исключительно в переходных режимах.

Цель: разработать обобщенную математическую модель двухкатушечной синхронной машины с электромагнитным приводом для технологических систем виброударного действия, упрощающей процесс математического описания известных вариантов схем машин при проведении динамических расчетов.

Методы: дифференциальные уравнения электрического равновесия и механического взаимодействия, поступательно движущихся масс, уравнение Лагранжа второго рода, методы конечно-элементного моделирования двухмерного магнитного поля и структурного моделирования в программе Matlab Simulink, сопоставление расчетных и экспериментальных характеристик.

Результаты. Предложена обобщенная расчетная схема построения многомассовой двухкатушечной синхронной электромагнитной машины, включающая известные модификации вариантов схем машин ударного действия. На основе расчетной схемы образована система дифференциальных уравнений обобщенной модели, позволяющая выполнять построение математических моделей, отражающих динамическое состояние известных вариантов схем синхронных ударных машин с электромагнитным приводом. Приведен пример реализации динамической модели четырехмассовой двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с упругим реверсом бойка. Приведены результаты имитационного моделирования рабочего режима в виде диаграмм тока катушек, перемещения и скорости бойка, отражающие процессы включения и выхода на квазистабилизировавшийся режим работы. На основе сопоставления значений интегральных характеристик показано, что расхождение результатов расчета и эксперимента составляет 4...6 %, что не превышает общепринятой погрешности для инженерных расчетов. Эффективность применения предложенной обобщенной модели заключается в упрощении математического описания вариантов схем синхронных машин с электромагнитным приводом и сокращении сроков реализации моделей.

Ключевые слова:

Электрическая импульсная система, линейная синхронная машина, синхронная частота, число степеней свободы, обобщенная модель, динамическая модель, моделирование.

Введение

В повышении эффективности интенсификации ряда технологических процессов и производств важную роль играют силовые электрические импульсные системы, способные создавать большие по величине ударные или виброударные воздействия на обрабатываемую среду [1–5].

Высокую долю среди них составляют силовые электромагнитные импульсные системы, содержащие в качестве основного исполнительного механизма ударный или виброударный электропривод на основе различных по конструкции линейных электромагнитных двигателей (ЛЭМД) [6–9]. Генерирование ударных нагрузок в ЛЭМД обеспечивается в результате возвратно-поступательного движения бойка. В самом общем случае подобные структуры, содержащие в своем составе ЛЭМД, устройства для преобразования

и передачи механической энергии и рабочий орган импульсной системы, образуют различные модификации электромагнитных машин ударного действия, которые находят все большее применение в прогрессивных технологиях по повышению интенсификации процессов поиска, добычи и переработки георесурсов [10–12].

Перспективным направлением считается применение электромагнитных машин ударного действия в приводах скважинных виброисточников, оказывающих силовое воздействие в обсадной колонне на уровне продуктивного пласта и повышающих интенсификацию процесса добычи нефти из малодебитных скважин [13, 14]. Их использование существенно повышает эффективность вибросейсмического метода без применения громоздкого наземного оборудования [15].

Установлена эффективность применения электромагнитных машин ударного действия различной мощности для зондирующего воздействия на грунт при сейсморазведке полезных ископаемых, что позволяет повысить точность повторения параметров ударных воздействий, упростить производство работ, обеспечить безопасность их проведения для обслуживающего персонала и окружающей среды [16–18].

Обоснована целесообразность использования линейного электропривода на основе электромагнитных машин для гидротехнического строительства морских стационарных платформ, с помощью которых ведется разработка полезных ископаемых на континентальных шельфах [19, 20].

Практика использования мобильных установок на основе электромагнитных машин ударного действия показала свою эффективность в горнодобывающей отрасли при вторичном разрушении горных пород, а также бурении ударным способом шпуров и скважин в твердых породах [21–23].

Значительным результатом следует считать серийное промышленное применение электромагнитных ударных машин в приводах ручного ударного и ударно-вращательного электроинструмента, широко используемого при монтаже в строительстве и в горном деле [24–26].

Развитие и расширение областей применения электромагнитных машин на основе ЛЭМД, прежде всего, связано с вопросами снижения энергопотребления и совершенствования методов их расчета [27, 28].

В вопросах энергосбережения среди известных вариантов схем электромагнитных машин особый интерес представляют синхронные электромагнитные машины ударного или виброударного действия (СЭМУД). В подобных машинах частота возвратно-поступательного движения бойка синхронно связана с частотой питающей промышленной сети переменного тока [29–31]. Основными преимуществами машин и оборудования на основе СЭМУД является возможность снижения потребления электрической энергии от промышленной сети переменного тока при работе в резонансных режимах или режимах близких к резонансным.

В процессе эволюционирования были созданы различные модификации вариантов схем СЭМУД, выполненные в основном по однокатушечным и двухкатушечным вариантам схем.

Разнообразие в вариантах схем, прежде всего, было вызвано необходимостью повышения их надежности, безопасности, улучшением эксплуатационных характеристик при передаче энергии ударом.

Наиболее широкую известность получили модификации вариантов схем двухкатушечных СЭМУД [29].

Существующие варианты схем имеют различную по сложности динамическую систему, способствующую оптимальному процессу формирования импульса силы и передачи его в деформируемую среду.

Сложность расчета подобных динамических систем заключается в прерывистом и многоступенчатом характере преобразования энергии. За счет импульс-

ного потребления электрической энергии работа выполняется исключительно в переходных режимах.

В циклическом процессе перемещения бойка преобладают динамические процессы, зависящие от многих факторов, таких как свойства деформируемой среды, связи в механической колебательной системе, свойства применяемых магнитных материалов, сил сопротивления движению бойка и т. д. Точность моделей для решения задач анализа и синтеза в существенной степени будет определяться точностью учета взаимосвязанных факторов.

Важным этапом расчетов является построение точных динамических моделей вариантов схем двухкатушечных СЭМУД. Учитывая их разнообразие, возникает целесообразность в построении обобщенной модели, отражающей динамическое состояние известных модификаций вариантов схем.

Цель исследования состоит в разработке обобщенной математической модели двухкатушечной синхронной машины с электромагнитным приводом для технологических систем виброударного действия, упрощающей процесс математического описания известных вариантов схем машин при проведении динамических расчетов.

Построение обобщенной математической модели двухкатушечной СЭМУД

В общем случае в механической системе существующих вариантов схем СЭМУД возникают повторяющиеся динамические процессы, которые сопровождаются взаимным преобразованием потенциальной энергии упругих связей и кинетической энергии движущихся инерционных масс с последующей передачей энергии в деформируемую среду. Данные процессы возникают от действия вынуждающих сил электромагнитного поля, периодически возбуждаемого системой катушек.

Расчетная схема построения обобщенной модели многомассовой двухкатушечной СЭМУД, реализующая известные способы возвратно-поступательного движения бойка, представлена на рис. 1. Характер движения ударной массы бойка и управление катушками рабочего – К1 и обратного – К2 хода в обобщенной схеме устанавливается исходя из принятой модификации варианта схемы СЭМУД, согласно с заданным алгоритмом управления.

Расчетная схема (рис. 1) состоит из механической колебательной системы, имеющей пять степеней свободы. Система содержит боек массой m_1 , который в процессе своего движения периодически взаимодействует с рабочим инструментом массой m_2 и массивным инерционным преобразователем массой m_3 .

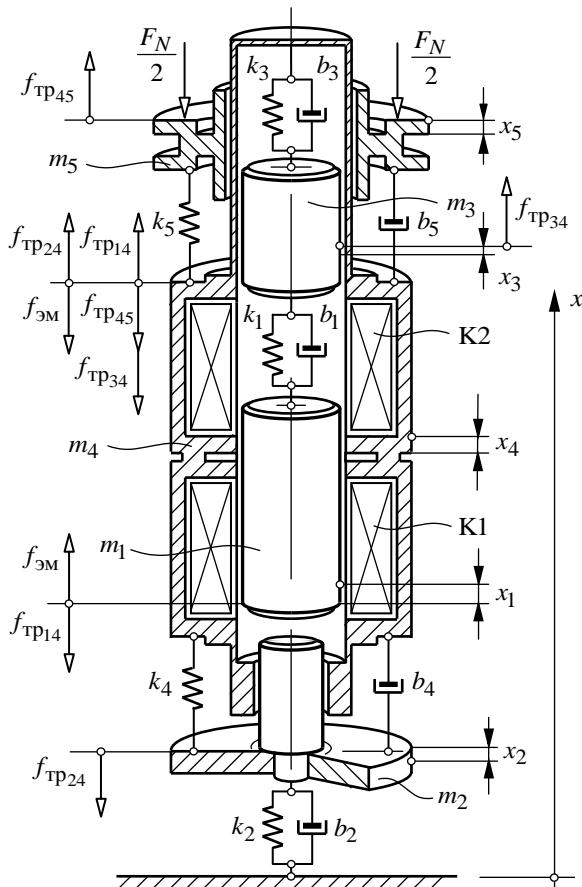
Рабочий инструмент и инерционный преобразователь посредством упругих связей связаны с магнитопроводом и закрепленными внутри катушками с общей массой m_4 . Также механическая колебательная система может содержать дополнительное устройство в форме кольца массой m_5 для крепления СЭМУД и защиты от вибраций.

Применение дополнительного устройства в сочетании с промежуточным упругим звеном обеспечивает

ет защите оператора от вибраций, передаваемых на корпус технологического оборудования. Величина усилия нажатия – F_N , обеспечивает устойчивый контакт динамической системы с рабочим инструментом при передаче энергии посредством удара при контакте с рабочей поверхностью деформируемой среды.

Работа механической колебательной системы сопровождается постоянными процессами поглощения энергии в упругих связях и потерями энергии за счет возникающих сил трения скольжения между соприкасающимися поверхностями.

Рассматриваемая система имеет пять степеней свободы ($N=5$). Выбираем в качестве обобщенных переменных координаты линейных перемещений $x_1 \dots x_5$ центров масс $m_1 \dots m_5$ (рис. 1).



Rис. 1. Расчетная схема обобщенной синхронной машины
Fig. 1. Design diagram of a generalized synchronous machine

При выполнении расчетов полагаем, что массоинерционные элементы механической системы рассматриваются как абсолютно твердые тела, массы которых соответственно равны $m_1 \dots m_5$. Возникающие в системе ударные взаимодействия рассматриваются как мгновенные изменения скоростей соударяющихся тел. Силы вязкого трения пропорциональны скоростям инерционных масс. Вес бойка значительно меньше сил электромагнитного взаимодействия в механической системе.

В схеме на рис. 1 величина знакопеременной электромагнитной силы

$$f_{\text{эм}}(i_{\mu_1}, i_{\mu_2}, x_1) = f_{\text{эм1}}(i_{\mu_1}, x_1) + f_{\text{эм2}}(i_{\mu_2}, x_1)$$

определяется координатой положения бойка x_1 , а также величиной намагничивающего тока катушки рабочего хода i_{μ_1} и катушки обратного хода i_{μ_2} .

Связь электрической и магнитной системы в расчетной схеме может быть учтена с помощью уравнений электромагнитного состояния, предусматривающих насыщение и потери энергии в стальном магнитопроводе на вихревые токи и гистерезис:

$$u_1(t) = i_1 r_1 + \frac{d\psi_1(i_{\mu_1}, x_1)}{dt}, \quad (1)$$

$$u_2(t) = i_2 r_2 + \frac{d\psi_2(i_{\mu_2}, x_1)}{dt}, \quad (2)$$

где $u_1(t), u_2(t), i_1, i_2$ – напряжение и токи в цепях питания катушек; $\psi_1=f(i_{\mu_1}, x_1)$, $\psi_2=f(i_{\mu_2}, x_1)$ – потокосцепление катушек; r_1, r_2 – активные сопротивления катушек рабочего и обратного хода.

Общий вид дифференциальных уравнений, описывающих движение центров масс механической системы относительно обобщенных координат, может быть наиболее просто установлен через формулу уравнений Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_i} = Q_i^{\Pi} + Q_i^{\Phi} + Q_i^B, \quad (3)$$

где T – кинетическая энергия системы; $Q_i^{\Pi}, Q_i^{\Phi}, Q_i^B$ – обобщенные силы, соответствующие потенциальной энергии деформации упругих связей, энергиям рассеяния и внешних воздействий; x_i, \dot{x}_i – обобщенная координата и обобщенная скорость центров поступательно движущихся масс; $i=1,2,3,\dots,N$ – число степеней свободы системы.

Для построения модели динамического состояния СЭМУД необходимо, обращаясь к расчетной схеме на рис. 1, выполнить операции дифференцирования левой части уравнения (3) и определить обобщенные силы системы, входящие в правую часть этого уравнения.

Рассматривая поступательные движения масс, кинетическая энергия системы

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N=5} m_i \dot{x}_i^2 = \\ = \frac{1}{2} [m_1 \dot{x}_1^2 + m_2 \dot{x}_2^2 + m_3 \dot{x}_3^2 + m_4 \dot{x}_4^2 + m_5 \dot{x}_5^2]. \quad (4)$$

Обобщенные силы, вызванные деформацией упругих связей

$$Q_i^{\Pi} = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \sum_{i=1}^{N=5} \frac{1}{2} [k_1 (x_1 - x_3)^2 + k_2 x_2^2 + \\ + k_3 (x_4 - x_3)^2 + k_4 (x_4 - x_2)^2 + k_5 (x_5 - x_4)^2], \quad (5)$$

где Π – потенциальная энергия; $k_1 \dots k_5$ – коэффициенты жесткости упругих связей.

Обобщенные силы, соответствующие энергии рассеивания

$$Q_i^{\Phi} = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i} = -\frac{\partial}{\partial \dot{x}_i} \sum_{i=1}^{N=5} \frac{1}{2} \left[b_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_3)^2 + b_2 \dot{x}_2^2 + b_3 (\dot{x}_4 - \dot{x}_3)^2 + b_4 (\dot{x}_4 - \dot{x}_2)^2 + b_5 (\dot{x}_5 - \dot{x}_4)^2 \right], \quad (6)$$

где Φ – диссипативная функция (функция Рэлея); $b_1 \dots b_5$ – коэффициенты линейного сопротивления, характеризующие диссипативные свойства упругих связей (вязкое трение).

Проекции обобщенной силы, вызванные трением скольжения и внешними воздействиями,

$$\begin{cases} Q_{x_1}^B = f_{\vartheta_M}(i_{\mu_1}, i_{\mu_2}, x_1) - f_{tp_{14}} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt}; \\ Q_{x_2}^B = -f_{tp_{24}} \operatorname{sign} \frac{dx_2}{dt}; \\ Q_{x_3}^B = f_{tp_{34}} \operatorname{sign} \frac{dx_3}{dt}; \\ Q_{x_4}^B = -f_{\vartheta_M}(i_{\mu_1}, i_{\mu_2}, x_1) + \\ + (-f_{tp_{34}} - f_{tp_{45}} + f_{tp_{24}} + f_{tp_{14}}) \operatorname{sign} \frac{dx_4}{dt}; \\ Q_{x_5}^B = f_{tp_{45}} \operatorname{sign} \frac{dx_5}{dt} - F_N, \end{cases} \quad (7)$$

где $f_{tp_{14}}, f_{tp_{24}}, f_{tp_{34}}, f_{tp_{45}}$ – силы сухого трения скольжения в соответствии с рис. 1.

Выражения (4)–(7) совместно с (3) позволяют образовать уравнения динамического состояния механической колебательной системы в виде следующих дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + k_1 (x_1 - x_3) = \\ = f_{\vartheta_M}(i_{\mu_1}, i_{\mu_2}, x_1) - f_{tp_{14}} \operatorname{sign} \frac{dx_1}{dt}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + b_2 \frac{dx_2}{dt} - b_4 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + k_2 x_2 - \\ - k_4 (x_4 - x_2) = -f_{tp_{24}} \operatorname{sign} \frac{dx_2}{dt}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} - b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) - b_3 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) - \\ - k_1 (x_1 - x_3) - k_3 (x_4 - x_3) = f_{tp_{34}} \operatorname{sign} \frac{dx_3}{dt}; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} m_4 \frac{d^2 x_4}{dt^2} + b_3 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + b_4 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) - \\ - b_5 \left(\frac{dx_5}{dt} - \frac{dx_4}{dt} \right) + k_3 (x_4 - x_3) + k_4 (x_4 - x_2) - \\ - k_5 (x_5 - x_4) = -f_{\vartheta_M}(i_{\mu_1}, i_{\mu_2}, x_1) + \\ + (-f_{tp_{34}} + f_{tp_{45}} + f_{tp_{24}} + f_{tp_{14}}) \operatorname{sign} \frac{dx_4}{dt}; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} m_5 \frac{d^2 x_5}{dt^2} + b_5 \left(\frac{dx_5}{dt} - \frac{dx_4}{dt} \right) + k_5 (x_5 - x_4) = \\ = f_{tp_{45}} \operatorname{sign} \frac{dx_5}{dt} - F_N. \end{aligned} \quad (12)$$

Уравнения (8)–(12) рассматривают только колебательные свойства механической системы с потерями энергии.

Дополняя уравнения электрического равновесия (1), (2) и динамического состояния механической системы (8)–(12) условиями, ограничивающими пределы возвратно-поступательного движения бойка, на границах которых возникают ударные взаимодействия, переходим к окончательному процессу формирования динамической модели с учетом рассматриваемой модификации двухкатушечной СЭМУД.

Полученную модель можно использовать для анализа рабочих процессов СЭМУД в переходных и квазистабилизированных режимах.

Процесс решения уравнений относительно принятого конструктивного исполнения СЭМУД должен сопровождаться предварительным расчетом функциональных зависимостей потокосцепления и электромагнитной силы $\Psi_1 = f(i_{\mu_1}, x_1)$, $\Psi_2 = f(i_{\mu_2}, x_1)$, $f_{\vartheta_M} = f(i_{\mu_1}, x_1)$, $f'_{\vartheta_M} = f(i_{\mu_2}, x_1)$ от координаты смещения бойка и намагничивающего тока катушек. Значения указанных функциональных зависимостей в процессе моделирования определяются с помощью интерполяции табличных данных, полученных в результате решения полевой задачи в статике для различных комбинаций положения бойка и протекающего по катушкам намагничивающего тока с использованием современных методов численного расчета двухмерного магнитного поля [32–36].

Реализация динамической модели на примере двухкатушечной СЭМУД с упругим реверсом бойка

Основные этапы использования обобщенной модели рассмотрим на примере реализации динамической модели четырехмассовой двухкатушечной СЭМУД с упругим реверсом бойка, представленной на рис. 2.

Впервые подобный вариант схемы был применен в конструкции ударного узла магнитобура СЦ-2 для бурения ударно-вращательным способом отверстий в бетоне и твердых породах, а также в ударных узлах буровых установок для разрушения горных пород [37].

Вариант схемы СЭМУД (рис. 2) содержит бойек – 1, катушку рабочего хода – 2 и катушку обратного хода – 3. Обе катушки размещены внутри общего магнитопровода – 4, выполненного из листов электротехнической стали. При протекании тока по катушкам создается магнитное поле, с которым взаимодействует бойек и совершает возвратно-поступательные движения. В процессе колебательных движений бойек – 1 поочередно взаимодействует с упругим звеном – 5, выполненным в виде цилиндрической пружины, работающей на сжатие, и с торцевой поверхностью рабочего инструмента – 6. В результате этих

взаимодействий генерируется ударный импульс силы, передаваемый далее в деформируемую среду для совершения полезной работы.

Для гашения вертикальных вибраций применяется вибропоглощающее устройство, состоящее из промежуточной массы – 7 и упругого звена, выполненного в виде цилиндрической пружины – 8, работающей на сжатие. Для устойчивой связи рабочего инструмента с деформируемой средой прилагается внешняя статическая сила нажатия F_N , передаваемая через промежуточную массу инструменту. Питание катушек рабочего и обратного хода выполняется импульсами тока по однополупериодной схеме выпрямления.

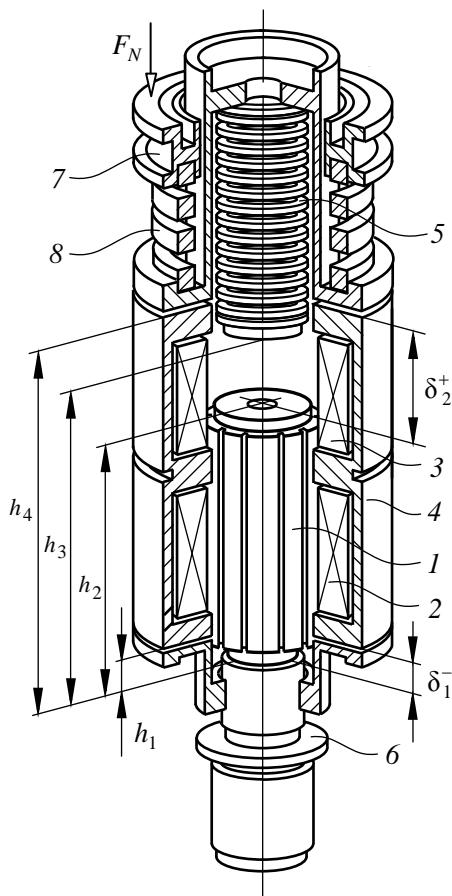


Рис. 2. Вариант схемы двухкатушечной синхронной машины

Fig. 2. Variant of the scheme of a two-coil synchronous machine

За промежуток времени, равный одному периоду напряжения промышленной сети, осуществляется полный рабочий цикл машины. Для частоты сети $f=50$ Гц количество ударов бойка составляет $n_{уд} = 3000$ уд/мин.

Рассматривая механическую колебательную систему рис. 2 и сопоставляя движение инерционных масс с расчетной схемой на рис. 1, следует полагать, что для реализации динамической модели следует принять: $m_3=0$, $k_3=0$, $b_3=0$, $x_3=x_4$, $\dot{x}_3=\dot{x}_4$, $f_{tp34}=0$, $N=4$.

Предварительно объединив на основе равенства обобщенных координат $x_3=x_4$ левые и правые части уравнений (10), (11), а также произведя некоторую

замену, получим уравнения, описывающие динамическое состояние четырехмассовой механической колебательной системы по варианту схемы на рис. 2:

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_4}{dt} \right) + k_1 (x_1 - x_4) = f_{\text{эм}}(i_{\mu_1}, i_{\mu_2}, x_1) - f_{\text{tp}_{14}} \text{sign} \frac{dx_1}{dt}; \quad (13)$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + b_2 \frac{dx_2}{dt} - b_4 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + k_2 x_2 - k_4 (x_4 - x_2) = -f_{\text{tp}_{24}} \text{sign} \frac{dx_2}{dt}; \quad (14)$$

$$m_4 \frac{d^2 x_4}{dt^2} - b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_4}{dt} \right) + b_4 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) - b_5 \left(\frac{dx_5}{dt} - \frac{dx_4}{dt} \right) - k_1 (x_1 - x_4) + k_4 (x_4 - x_2) - k_5 (x_5 - x_4) = -f_{\text{эм}}(i_{\mu_1}, i_{\mu_2}, x_1) + (f_{\text{tp}_{45}} + f_{\text{tp}_{24}} + f_{\text{tp}_{14}}) \text{sign} \frac{dx_4}{dt}; \quad (15)$$

$$m_5 \frac{d^2 x_5}{dt^2} + b_5 \left(\frac{dx_5}{dt} - \frac{dx_4}{dt} \right) + k_5 (x_5 - x_4) = f_{\text{tp}_{45}} \text{sign} \frac{dx_5}{dt} - F_N. \quad (16)$$

Окончательный результат движения бойка необходимо рассматривать как процесс совместного действия вынуждающих электромагнитных сил и ударных импульсов сил, возникающих вследствие периодического взаимодействия бойка с рабочим инструментом.

В качестве ограничительных условий здесь выступают границы пределов поступательного перемещения бойка, гарантирующие его торможение, остановку и реверс в заданных границах. Данные пределы целесообразно рассматривать относительно промежутков рабочих воздушных зазоров δ_1 , δ_2 либо введенных фиксированных промежутков, определяемых расстояниями до ударного сечения h_1 , h_2 , h_3 и h_4 (рис. 2).

Ограничения, вызванные торможением и остановкой бойка согласно рис. 2, могут быть установлены в виде следующей системы равенств:

$$x_1(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } \delta_2^+ = h_4 - h_2; \\ h_4 - h_2 - \delta_2^+, & \text{при } 0 \leq x_1 \leq h_4 - h_2; \\ h_4 - h_2 + |\delta_2|, & \text{при } x_1 > h_4 - h_2, \end{cases} \quad (17)$$

Также важным условием для реализации модели является связь между кинетической энергией бойка, направленной на совершение полезной работы T_1 и возвращаемой обратно в механическую систему T_2 .

Связь этой энергии можно установить через соотношение скоростей ударной массы бойка до удара v_1 и после удара \bar{v}_1 в виде:

$$T_1 = \frac{m_1 v_1^2}{2} (1 - k_{\text{or}}^2); T_2 = \frac{m_1 v_1^2}{2} k_{\text{or}}^2, \quad (18)$$

где $k_{\text{or}} = \bar{v}_1/v_1$ – коэффициент отскока.

Работа упругого звена при взаимодействии с бойком может быть описана следующей системой равенств, содержащих кусочно-линейные функции (рис. 2):

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x_1} = \begin{cases} 0, & \text{при } 0 \leq x_1 < h_3 - h_2; \\ k_1(x_1 - x_4), & \text{при } x_1 \geq h_3 - h_2, \end{cases} \quad (19)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x_1} = \begin{cases} 0, & \text{при } 0 \leq x_1 < h_3 - h_2; \\ b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_4}{dt} \right), & \text{при } x_1 \geq h_3 - h_2, \end{cases} \quad (20)$$

Окончательно принимая во внимание уравнения (1), (2), (13)–(16), с учетом установленных условий и ограничений (17)–(20), математическая модель варианта схемы СЭМУД на рис. 2 может быть представлена в виде системы:

$$\begin{cases} u_1(t) = i_1 r_1 + \frac{d\psi_1(i_{\mu_1}, x_1)}{dt}; \\ u_2(t) = i_2 r_2 + \frac{d\psi_2(i_{\mu_2}, x_1)}{dt}; \\ i_1 = i_{n1} + i_{\mu_1}; \quad i_2 = i_{n2} + i_{\mu_2}; \\ m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = A; \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = B; \\ m_4 \frac{d^2 x_4}{dt^2} = C; \\ m_5 \frac{d^2 x_5}{dt^2} = D. \end{cases} \quad (21)$$

Установленные в системе (21) переменные коэффициенты:

$$A = \begin{cases} \frac{m_1 \bar{v}_1}{\tau_u} + f_{\text{эм}}(i_{\mu_1}, i_{\mu_2}, x_1) - f_{\text{tp14}} \text{sign} \frac{dx_1}{dt}, \\ \text{если } \frac{dx_1}{dt} > 0, \text{ при } 0 \leq x_1 < h_3 - h_2; \\ -\tilde{\lambda}_1 + f_{\text{эм}}(i_{\mu_1}, i_{\mu_2}, x_1) - f_{\text{tp14}} \text{sign} \frac{dx_1}{dt}, \\ \text{если } \frac{dx_1}{dt} > 0, \text{ при } x_1 \geq h_3 - h_2; \\ f_{\text{эм}}(i_{\mu_1}, i_{\mu_2}, x_1) - f_{\text{tp14}} \text{sign} \frac{dx_1}{dt}, \\ \text{если } \frac{dx_1}{dt} < 0, \text{ при } 0 \leq x_1 < h_3 - h_2; \end{cases}$$

$$B = -\frac{m_2 \bar{v}_2}{\tau_u} - \tilde{\lambda}_2 + \tilde{\lambda}_4 - f_{\text{tp24}} \text{sign} \frac{dx_2}{dt};$$

$$C = \begin{cases} -\tilde{\lambda}_3 + \tilde{\lambda}_5 - f_{\text{эм}}(i_{\mu_1}, i_{\mu_2}, x_1) + \\ + (f_{\text{tp14}} - f_{\text{tp24}}) \text{sign} \frac{dx_4}{dt}, \\ \text{при } 0 \leq x_1 < h_3 - h_2; \\ \tilde{\lambda}_1 - \tilde{\lambda}_3 - f_{\text{эм}}(i_{\mu_1}, i_{\mu_2}, x_1) - \\ - (f_{\text{tp14}} - f_{\text{tp24}} + f_{\text{tp45}}) \text{sign} \frac{dx_4}{dt}, \\ \text{при } x_1 \geq h_3 - h_2; \end{cases}$$

$$D = -\tilde{\lambda}_5 + f_{\text{tp45}} \text{sign} \frac{dx_5}{dt} - F_N,$$

где

$$\tilde{\lambda}_1 = k_1(x_1 - x_4) + b_1 \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_4}{dt} \right); \quad \tilde{\lambda}_2 = k_2 x_2 + b_2 \frac{dx_2}{dt};$$

$$\tilde{\lambda}_4 = k_4(x_4 - x_2) + b_4 \left(\frac{dx_4}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right);$$

$$\tilde{\lambda}_5 = k_5(x_5 - x_4) + b_5 \left(\frac{dx_5}{dt} - \frac{dx_4}{dt} \right);$$

$m_1 \bar{v}_1, m_2 \bar{v}_2$ – импульсы сил при ударе; τ_u – время действия импульса; \bar{v}_2 – скорость приобретенная рабочим инструментом; i_{n1}, i_{n2} – токи потерь, обусловленные процессами в стальном магнитопроводе.

Полученная модель в виде системы дифференциальных уравнений (21) позволяет производить всесторонний анализ динамических процессов, происходящих в двухкатушечном СЭМУД с упругим реверсом бойка.

Решение системы (21) выполнялось в соответствии с существующими рекомендациями [38, 39] в программе Matlab Simulink.

При выполнении динамических расчетов использовались параметры модернизированного промышленного варианта СЭМУД «ИЭ-4207»: $m_1=0,394$ кг; $m_2=0,32$ кг; $m_4=3,9$ кг; $m_5=0,2$ кг; $k_1=120 \cdot 10^3$ Н/м; $b_1=8$ Н·с/м; $k_2=12 \cdot 10^6$ Н/м; $b_2=0$; $k_4=16 \cdot 10^3$ Н/м; $b_4=35$ Н·с/м; $f_{\text{tp14}}=3$ Н; $f_{\text{tp24}}=8$ Н; $f_{\text{tp45}}=5$ Н; $F_N=35$ Н.

Для уменьшения потерь магнитопровод выполнен в виде пакетов из электротехнической стали 1212 толщиной 0,35 мм. Боек цельный из стали 40ХС.

Катушки выполнены медным проводником круглого сечения с использованием каркасной намотки. Параметры катушки рабочего хода: $w_1=1290$, $r_1=12,9$ Ом. Параметры катушки обратного хода: $w_2=1540$, $r_2=23,2$ Ом. Обе катушки независимо включены на переменное напряжение $U=220$ В через неуправляемые вентили и поочередно пытаются от полуволн напряжения разной полярности.

Предварительный расчет функциональных зависимостей потокосцеплений и электромагнитных сил $\psi_1=f(i_1, \delta_1)$, $\psi_2=f(i_2, \delta_2)$, $f_{\text{эм1}}=f(i_1, \delta_1)$, $f_{\text{эм2}}=f(i_2, \delta_2)$ от величины воздушного рабочего зазора и тока катушек выполнялся в программе FEMM (Finite Element Method Magnetics) [40].

Полученные по результатам полевого расчета статических параметров трехмерные графики зависимости $\psi_1=f(i_1, \delta_1)$ и $f_{\text{эм}}=f(i_1, \delta_1)$ для катушки рабочего хода, содержащие по 342 опорные точки статических параметров, представлены на рис. 3, 4.

Расчет составляющих токов i_{n1} и i_{n2} выполнялся по методике, изложенной в работе [41].

Результаты имитационного моделирования в виде диаграмм тока катушек, перемещения и скорости бойка, отражающие процесс включения СЭМУД и выхода на квазистабилизированный режим работы, рассмотрены на рис. 5–8.

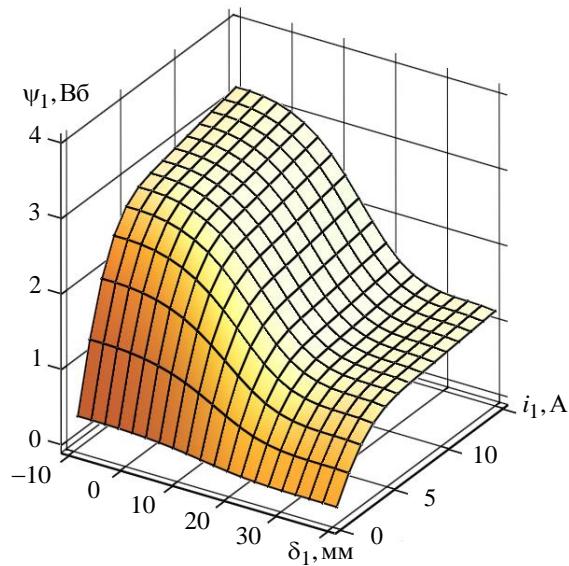


Рис. 3. Трехмерный график расчета потокосцепления $\psi_1=f(i_1, \delta_1)$

Fig. 3. Three-dimensional graph for calculating flux linkage $\psi_1=f(i_1, \delta_1)$

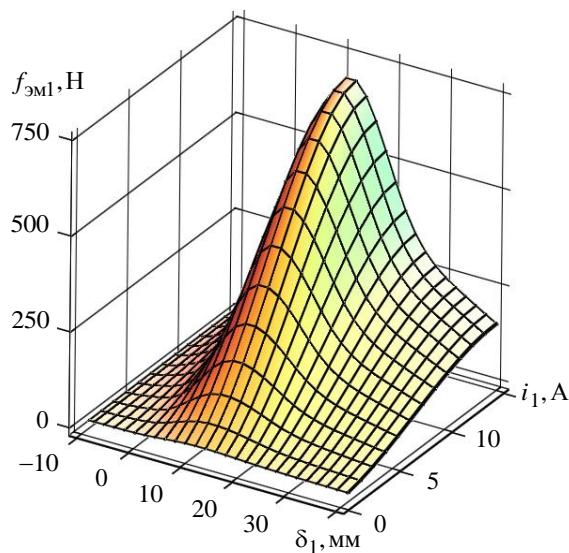


Рис. 4. Трехмерный график расчета электромагнитного усилия $f_{\text{эм}}=f(i_1, \delta_1)$

Fig. 4. Three-dimensional graph for calculating the electromagnetic force $f_{\text{эм}}=f(i_1, \delta_1)$

Диаграммы характеризуются устойчивым периодическим режимом работы двухкатушечной СЭМУД с начальной скоростью при отскеце бойка $\bar{v}_1=0,5$ м/с и коэффициентом отскака $k_{\text{от}}=0,11$.

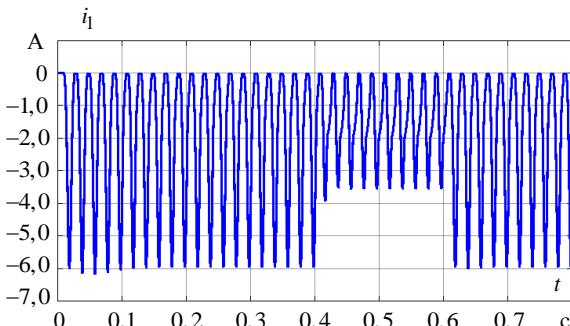


Рис. 5. Диаграмма тока $i_1(t)$ катушки рабочего хода

Fig. 5. Current diagram of the travel coil $i_1(t)$

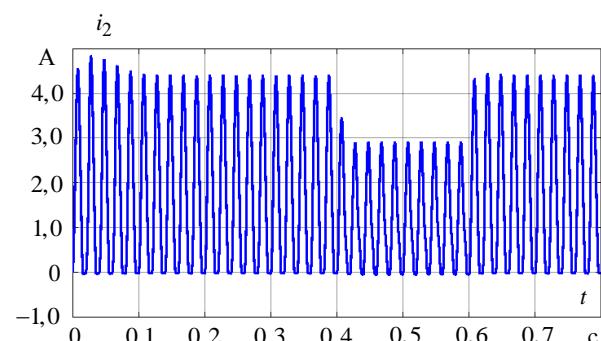


Рис. 6. Диаграмма тока $i_2(t)$ катушки обратного хода

Fig. 6. Current diagram of the reverse coil $i_2(t)$

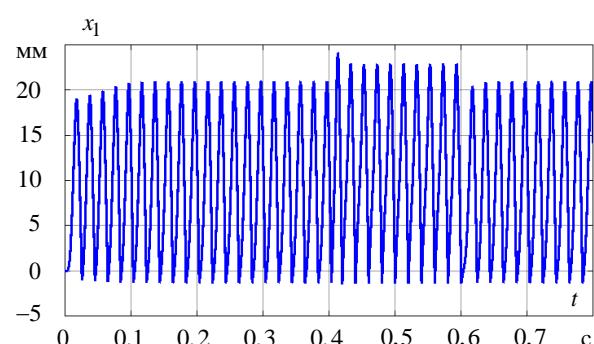


Рис. 7. Диаграмма перемещения бойка $x_1(t)$

Fig. 7. Movement diagram of the striker $x_1(t)$

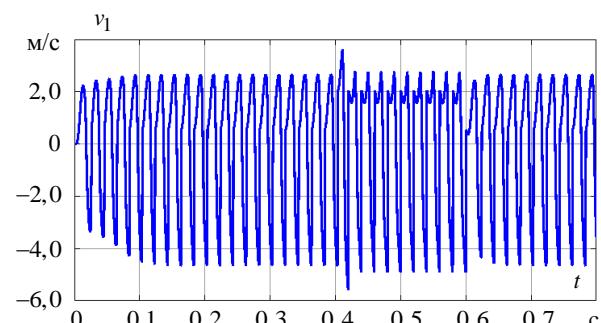


Рис. 8. Диаграмма скорости бойка $v_1(t)$

Fig. 8. Striker speed chart $v_1(t)$

Также на рис. 5–8 отражена реакция модели СЭМУД по восстановлению колебательных свойств вследствие внезапного изменения упругих свойств деформируемой среды на интервале времени $t=0,4\dots0,6$ с.

С увеличением упругих свойств деформируемой среды на указанном интервале времени увеличивается начальная скорость отскока бойка $\bar{v}_1=2,0$ м/с и коэффициент отскока $k_{\text{от}}=0,43$. Заметно повышается амплитуда колебания бойка (рис. 7) при сохранении устойчивого режима работы модели. Максимальная скорость перемещения бойка (рис. 8) практически не изменяется.

Также наблюдается уменьшение амплитуды тока катушки рабочего хода (рис. 5) и катушки обратного хода (рис. 6), что вызывает снижение мощности, потребляемой от источника питания. Данное уменьшение объясняется тем, что с увеличением коэффициента отскока возрастает кинетическая энергия, возвращаемая в механическую систему при обратном ходе бойка. В то время как кинетическая энергия, передаваемая в деформируемую среду, снижается.

Таким образом, частичное снижение полезной мощности и мощности, потребляемой от источника, не нарушают колебательных свойств механической системы. Рабочий процесс характеризуются устойчивым режимом работы без применения специальных средств регулирования.

Таблица. Сравнение результатов

Table. Comparison of results

Интегральный показатель Integral indicator	$A_{\text{им}}$, Дж (J)	I , А (a)	P_1 , Вт (W)	P_2 , Вт (W)	КПД Efficiency, %
Расчет Calculation	4,21	3,54	492	211	41
Эксперимент Experiment	4,18	3,6	536	209	39

Оценивание точности построения модели выполнялось сравнением интегральных значений показателей энергии удара – $A_{\text{им}}$, действующего значения тока на входе – I , активной мощности – P_1 , полезной мощности на выходе машины – P_2 и КПД, полученных в ходе численного расчета с показателями, найденными с помощью физической модели СЭМУД с упругим реверсом бойка (рис. 2). Сравнение результатов рас-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашавский А.М., Вольперт А.Я., Шнейбаум В.С. Силовые импульсные системы. – М.: Машиностроение, 1978. – 200 с.
2. Абрамов А.Д., Тюнукова Т.К., Ижбулдин Е.А. Виброударные технологии для строительно-дорожных машин // Мир транспорта. – 2016. – Т. 14. – № 4 (65). – С. 62–69.
3. Абрамов А.Д., Галай М.С. Перспективы применения машин ударного действия при упрочнении сварных швов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2016. – Т. 2. – № 3. – С. 7–10.
4. Moshkin V.I. Pulsing linear electromagnetic motor mechanical work within the desaturated magnetic system // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM, 2017. – Р. 8076319.
5. Нейман В.Ю. Интегрированные линейные электромагнитные двигатели для импульсных технологий // Электротехника. – 2003. – № 9. – С. 25–30.

чета и физического эксперимента представлено в таблице.

Расхождение результатов расчета (таблица) с результатами, полученными с помощью физической модели модернизированного варианта схемы СЭМУД с упругим реверсом бойка, составляет 4...6 %.

По результатам моделирования установлено, что точность в определении выходных характеристик моделей при выполнении динамических расчетов в значительной степени определяется точностью установки входных параметров моделей. В особенности это относится к точности выбора числа степеней свободы механической системы, обобщенных сил, связанных с энергией рассеивания, а также сил, вызванных трением скольжения и внешними воздействиями. Как правило, это параметры на входе модели, которыми разработчики чаще всего пренебрегают или пытаются существенно их упростить.

Заключение

Предложена обобщенная расчетная схема построения многомассовой двухкатушечной СЭМУД, включающая известные варианты схем машин.

На основе расчетной схемы образована система дифференциальных уравнений, позволяющая при установленных ограничениях относительно существующих модификаций вариантов схем выполнять построение математических моделей двухкатушечных СЭМУД, характеризующихся многосторонними связями в механической системе, существенной нелинейностью электромагнитных тяговых характеристик и потокосцеплений, а также наличием ударной нагрузки и потерями энергии в электрической, магнитной и механической системе.

На примере четырехмассовой конструкции двухкатушечной СЭМУД с упругим реверсом бойка рассмотрен пример реализации математической модели для анализа динамических характеристик. Расхождение расчетных значений интегральных показателей с экспериментальными данными, полученными на физической модели, не превышает погрешности 4...6 %, допустимой для инженерных расчетов.

Эффективность предложенной обобщенной модели заключается в упрощении процесса математического описания вариантов схем СЭМУД при сокращении сроков реализации моделей.

6. Design and analysis of a new down-the-hole electromagnetic hammer driven by tube linear motor / T. Wu, Y. Tang, S. Tang, Y. Li, W. He, E. Chen // IET Electric Power Applications. – 2017. – V. 11 (9). – P. 1558–1565.
7. Electric converters of electromagnetic strike machine with battery power / K.M. Usanov, A.V. Volgin, V.A. Kargin, A.P. Moiseev, E.A. Chetverikov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – V. 327. – P. 052032.
8. Effect of vibroimpact treatment on the physical and mechanical properties of the surface layer of welded joints in rails / V.A. Kargin, L.B. Tikhomirova, A.D. Abramov, M.S. Galai // Welding International. – 2014. – V. 28 (3). – P. 245–247.
9. Neyman L.A., Neyman V.Yu., Shabanov A.S. Vibration dynamics of an electromagnetic drive with a half-period rectifier // The 18 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices: Proc. – Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2017. – P. 503–506.

10. Yednyenov E.K., Lyashkov V. Electromagnetic rock breaker for non-explosive rocks breaking // International Symposium on planning of mining and selection of equipment of MPES 2011. – Almata, 2011. – P. 1002–1012.
11. Павлов В.Е. Исследование режимов работы электромагнитного молота // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 12 (131). – С. 164–173.
12. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Анализ показателей электромагнитных ударных машин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1996. – № 2. – С. 72–80.
13. Экспериментальные исследования эффективности излучения от скважинного импульсного вибростоичника / Б.Ф. Симонов, В.Н. Опарин, А.О. Кордубайло, В.И. Востриков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 8. – С. 180–189.
14. Симонов Б.Ф., Нейман В.Ю., Шабанов А.С. Импульсный линейный электромагнитный привод для скважинного вибростоичника // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 118–126.
15. Simonov B.F., Neyman V.Y., Shabanov A.S. New conception of an electromagnetic drive for a vibration source in hole // The 18 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices: Proc. – Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2017. – P. 507–510.
16. Ивашин В.В., Певчев В.П. Определение перемещений излучателя импульсного электромагнитного источника сейсмических сигналов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – № 4. – С. 51–59.
17. Haines S.S. Design and application of an electromagnetic vibrator seismic source // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 2006. – V. 11 (1). – P. 9–15.
18. Sadovskii V.M., Sadovskaya O.V., Detkov V.A. Analysis of elastic waves generated in frozen grounds by means of the electromagnetic pulse source «Yenisei» // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – V. 193 (1). – P. 012058.
19. Электромагнитные молоты для морского нефтегазопромыслового строительства / Б.Ф. Симонов, В.С. Вовк, Ю.В. Погарский, А.И. Кадышев // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2019. – № 2 (12). – С. 59–65.
20. Ряшенцев Н.П., Симонов Б.Ф., Ильинский Н.К. Электромагнитный молот для погружения свай // Газовая промышленность. – 1984. – № 11. – С. 11–15.
21. Манжесов В.К., Лукутина Н.А., Невенчанная Т.О. Динамика и синтез электромагнитных генераторов силовых импульсов. – Фрунзе: Изд-во Илим, 1985. – 185 с.
22. Едыгенов Е.К. Горные машины с линейным электромагнитным двигателем // Современные проблемы теории машин. – 2019. – № 8. – С. 81–84.
23. Едыгенов Е.К., Васин К.А. Результаты испытаний электромагнитного молота для безвзрывного разрушения горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 5. – С. 80–90.
24. Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М., Фролов А.В. Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, 1970. – 259 с.
25. Ижбулдин Е.А., Абрамов А.Д. Ручной электрический ударный инструмент для реализации вибродеформаций в транспортном машиностроении и строительстве // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 1 (120). – С. 32–39.
26. Strike action electromagnetic machine for immersion of rod elements into ground / K.M. Usanov, A.V. Volgin, E.A. Chetverikov, V.A. Kargin, A.P. Moiseev, Z.I. Ivanova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – V. 87. – P. 032050.
27. Угаров Г.Г., Мошкин В.И. Перспективы развития силовых электромагнитных импульсных систем // Вестник Курганского государственного университета. – 2013. – № 2. – С. 88–90.
28. Гринченко В.П., Большенко И.А., Большенко А.В. Электромагнитный привод с низким энергопотреблением // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2015. – № 5 (541). – С. 50–53.
29. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Линейные синхронные электромагнитные машины для низкочастотных ударных технологий // Электротехника. – 2014. – № 12. – С. 45–49.
30. Zhao, J.H., Zhang, X.F., Zhang, J.H. Field and thrust analysis of tubular permanent magnet linear synchronous motor // Electric Machines and Control – 2010. – V. 22 (3). – P. 60–63.
31. Neyman L.A., Neyman V.Yu., Obukhov K.A. New method of the synchronous vibratory electromagnetic machine mechatronic module control // The 18 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices: Proc. – Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2017. – P. 516–519.
32. Tatevosyan A.S., Tatevosyan A.A., Zaharova N.V. Calculation of non-stationary magnetic field of the polarized electromagnet with the external attracted anchor // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1050 (1). – P. 012086.
33. 2D Finite Element Model for computing the electric field strength-rms generated by overhead power lines / E. Lunca, S. Vornicu, A. Salceanu, O. Bejenaru // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1065. – P. 1–4.
34. Shevchenko V.P., Babiychuk O.B., Boltenkov V.O. Study of current transformers magnetic field by method final elements using the FEMM software complex // Applied aspects of information technology. – 2019. – V. 2 (4). – P. 317–327.
35. Cuce V.I. System of automated formation of calculating models of electric machines for FEMM software environment // Technical electrodynamics. – 2018. – № 4. – P. 74–78.
36. A high torque density outer rotor claw pole stator permanent magnet synchronous motor / J. Liang, A. Parsapour, E. Cosoroaba, M. Wu, I. Boldea, B. Fahimi // IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). – 2018. – P. 389–393.
37. Ряшенцев Н.П., Алаубжев П.М., Никишин Н.И. Ручные электрические машины ударного действия. – М.: Недра, 1970. – 198 с.
38. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
39. Kiyakli A., Hamit S. Modeling of an electric vehicle with MATLAB/Simulink // International journal of automotive science and technology. – 2018. – V. 2 (4). – P. 9–15.
40. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM. – М.: ИЦ «Академия», 2005. – 336 с.
41. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Моделирование динамических процессов в электромагнитных преобразователях энергии для систем генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 4. – С. 154–162.

Поступила 31.08.2020 г.

Информация об авторах

Нейман Л.А., доктор технических наук, профессор кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета.

Нейман В.Ю., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Новосибирского государственного технического университета.

UDC 621.313.282.2

GENERALIZED MODEL OF A TWO-COIL SYNCHRONOUS ELECTROMAGNETIC MACHINE FOR VIBRATORY IMPACT TECHNOLOGICAL SYSTEMS

Lyudmila A. Neyman¹,
neyman31@gmail.com

Vladimir Yu. Neyman¹,
nv.nstu@ngs.ru

¹ Novosibirsk State Technical University,
20, Karl Marks avenue, Novosibirsk, 630073, Russia.

Relevance of the research is explained by the perspective of electric pulse systems based on impact and vibratory impact linear electromagnetic machines application in geological exploration, mining operations and minerals processing technologies. Impact synchronous electromagnetic machines are useful for energy saving. Impact force pulse frequency of these machines is equal to or multiple of the power source frequency. The main advantage of devices and equipment based on impact and vibratory impact synchronous electromagnetic machines is the capability of power consumption decrease in near-resonant modes. These modes study is important for the design of exact dynamic models of different variants of impact synchronous electromagnetic machines operating only in transient modes.

The aim of the research is to develop the generalized mathematical model of a two-coil impact synchronous machine with an electromagnetic drive for vibratory impact technological systems. The model simplifies the mathematical description of known variants machine schemes when carrying out dynamic calculations.

The methods used in the research include differential equations of the electrical equilibrium and mechanical interaction of directly moving masses, Lagrange's equation of the second kind, finite-element methods of magnetic field modeling, methods of structured modeling in Matlab Simulink, design and experimental characteristics comparison.

Results. The authors have proposed the generalized design model of the multi-mass two-coil impact synchronous electromagnetic machine for its known and new variants. The differential equations system were derived for this model. The generalized model is the basis of dynamic models of different variants of impact synchronous electromagnetic machines. The paper considers as an example the dynamic model of the four-mass two-coil impact synchronous electromagnetic machine with the striker elastic reverse. The simulation results stated for the operating mode include the oscillograms of the current in the coils, the striker motion and velocity illustrating switching on and reaching the quasi-stationary operating mode. It follows from integral characteristics comparison that the difference between the design and experimental data is 4...6 % and it is no more than common engineering design error. The proposed generalized model helps effectively to simplify the mathematical description of the impact synchronous electromagnetic motor and decrease the time interval for model implementation.

Key words: Electrical impulse system, linear synchronous machine, synchronous frequency, number of degrees of freedom, generalized model, dynamic model, simulation.

REFERENCES

1. Ashavskiy A.M., Volpert A.Ya., Shneybaum V.S. *Silovye impulsnye sistemy* [Power impulse systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 200 p.
2. Abramov A.D., Tyunukova T.K., Izhbuldin E.A. Vibrodarnyye tekhnologii dlya stroitelno-dorozhnykh mashin [Vibration shock technologies for road-building machines]. *Mir transporta*, 2016, vol. 14, no. 4 (65), pp. 62–69.
3. Abramov A.D., Galay M.S. Perspektivnye primeneniya mashin udarnogo deystviya pri uprochnenii svarynykh shvov [Prospects for the use of impact machines for strengthening welded seams]. *Fundamentalye i prikladnye voprosy gornykh nauk*, 2016, vol. 2, no. 3, pp. 7–10.
4. Moshkin V.I. Pulsing linear electromagnetic motor mechanical work within the desaturated magnetic system. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM*. 2017. pp. 8076319.
5. Neiman V.Y. Integrated linear electromagnetic motors for pulsed technologies. *Russian Electrical Engineering*, 2003, vol. 74, no. 9, pp. 30–35. In Rus.
6. Wu T., Tang Y., Tang S., Li Y., He W., Chen E. Design and analysis of a new down-the-hole electromagnetic hammer driven by tube linear motor. *IET Electric Power Applications*, 2017, vol. 11, no. 9, pp. 1558–1565.
7. Usanov K.M., Volgin A.V., Kargin V.A., Moiseev A.P., Chetverikov E.A. Electric converters of electromagnetic strike machine with battery power. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327, pp. 052032.
8. Kargin V.A., Tikhomirova L.B., Abramov A.D., Galai M.S. Effect of vibroimpact treatment on the physical and mechanical properties of the surface layer of welded joints in rails. *Welding International*, 2014, vol. 28, no. 3, pp. 245–247.
9. Neyman L.A., Neyman V.Yu., Shabanov A.S. Vibration dynamics of an electromagnetic drive with a half-period rectifier. *The 18 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices: proc. Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2017*. pp. 503–506.
10. Edygenov E.K., Lyashkov V. Electromagnetic rock breaker for non-explosive rocks breaking. *International Symposium on planning of mining and selection of equipment of MPES 2011*. Almaty, 2011. pp. 1002–1012.
11. Pavlov V.E. Issledovanie rezhimov raboty elektromagnitnogo molota [Research of operating modes of the electromagnetic hammer]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, vol. 21, no. 12 (131), pp. 164–173.
12. Ugarov G.G., Neiman V.Y. Evaluation of operating conditions for electromagnetic impactors. *Journal of Mining Science*, 1996, vol. 32, no. 4, pp. 305–312. In Rus.
13. Simonov B.F., Oparin V.N., Kordubaylo A.O., Vostrikov V.I. Eksperimentalnye issledovaniya effektivnosti izlucheniya ot skvazhinnogo impulsnogo vibroistochnika [Experimental studies of the efficiency of radiation from a borehole pulsed vibration source]. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)*, 2019, no. 8, pp. 180–189.
14. Simonov B.F., Neiman V.Y., Shabanov A.S. Pulsed linear solenoid actuator for deep-well vibration source. *Journal of Mining Science*, 2017, vol. 51, no. 1, pp. 117–125. In Rus.

15. Simonov B.F., Neyman V.Y., Shabanov A.S. New conception of an electromagnetic drive for a vibration source in hole. *The 18 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices: proc. Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2017.* pp. 507–510.
16. Ivashin V.V., Pevchev V.P. Determining displacements of pulsed electromagnetic source of seismic signals. *Journal of Mining Science*, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 575–581. In Rus.
17. Haines S.S. Design and application of an electromagnetic vibrator seismic source. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2006, vol. 11 (1), pp. 9–15.
18. Sadovskii V.M., Sadovskaya O.V., Detkov V.A. Analysis of elastic waves generated in frozen grounds by means of the electromagnetic pulse source «Yenisei». *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 193 (1), pp. 012058.
19. Simonov B.F., Vovk V.S., Pogarskiy Yu.V., Kadyshev A.I. Elektromagnitnye moloty dlya morskogo neftegazopromyslovogo stroitelstva [Electromagnetic hammers for offshore oil and gas field construction]. *PRONEFT. Professionalno o nefti*, 2019, no. 2 (12), pp. 59–65.
20. Ryashentsev N.P., Simonov BF., Ilinskiy N.K. Elektromagnitny molot dlya pogruzheniya svay [Electromagnetic hammer for driving piles]. *Gazovaya promyshlennost*, 1984, no. 11, pp. 11–15.
21. Manzhosov V.K., Lukutina N.A., Nevenchannaya T.O. *Dinamika i sintez elektromagnitnykh generatorov silovykh impulsow* [Dynamics and synthesis of electromagnetic power pulse generators]. Frunze, Ilim Publ., 1985. 185 p.
22. Edygenov E.K. Gornye mashiny s lineynym elektromagnitnym dvigatelyem [Mining machines with linear electromagnetic motor]. *Sovremennye problemy teorii mashin*, 2019, no. 8, pp. 81–84.
23. Edygenov E.K., Vasin K.A. Rezul'taty ispytaniy elektromagnitnogo molota dlya bezvzryvnogo razrusheniya gornykh porod [Test results of an electromagnetic hammer for non-explosive destruction of rocks]. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)*, 2020, no. 5, pp. 80–90.
24. Ryashentsev N.P., Timoshenko E.M., Frolov A.V. *Teoriya, raschet i konstruirovaniye elektromagnitnykh mashin udarnogo deystviya* [Theory, calculation and design of electromagnetic impact machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1970. 259 p.
25. Izhbuldin E.A., Abramov A.D. Ruchnoy elektricheskiy udarny instrument dlya realizatsii vibroudarnykh tekhnologiy v transportnom mashinostroenii i stroitelstve [Hand-held electric percussion tool for the implementation of vibration shock technologies in transport engineering and construction]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, vol. 21, no. 1 (120), pp. 32–39.
26. Usanov K.M., Volgin A.V., Chetverikov E.A., Kargin V.A., Moiseev A.P., Ivanova Z.I. Strike action electromagnetic machine for immersion of rod elements into ground. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 87, pp. 032050.
27. Ugarov G.G., Moshkin V.I. Perspektivnye razvitiya silovykh elektromagnitnykh impulsnykh sistem [Prospects for the development of power electromagnetic pulse systems]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 2, pp. 88–90.
28. Grinchukov V.P., Bolshenko I.A., Bolshenko A.V. Elektromagnitnyy privod s nizkim energopotreblением [Low power consumption electromagnetic actuator]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2015, no. 5 (541), pp. 50–53.
29. Neiman L.A. Neiman V.Yu. Linear synchronous electromagnetic machines for lowfrequency impact technologies. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol. 85, no. 12, pp. 752–756. In Rus.
30. Zhao J.H., Zhang X.F., Zhang J.H. Field and thrust analysis of tubular permanent magnet linear synchronous motor. *Electric Machines and Control*, 2010, vol. 22 (3), pp. 60–63.
31. Neyman L.A., Neyman V.Yu., Obukhov K.A. New method of the synchronous vibratory electromagnetic machine mechatronic module control. *The 18 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron device: proc. Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2017.* pp. 516–519.
32. Tatevosyan A.S., Tatevosyan A.A., Zaharova N.V. Calculation of non-stationary magnetic field of the polarized electromagnet with the external attracted anchor. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1050 (1), pp. 012086.
33. Lunca E., Vornicu S., Salceanu A., Bejenaru O. 2D Finite Element Model for computing the electric field strength-rms generated by overhead power lines. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1065, pp. 1–4.
34. Shevchenko V.P., Babychuk O.B., Boltenkov V.O. Study of current transformers magnetic field by method final elements using the FEMM software complex. *Applied aspects of information technology*, 2019, vol. 2 (4), pp. 317–327.
35. Cuce V.I. System of automated formation of calculating models of electric machines for FEMM software environment. *Technical electrodynamics*, 2018, no. 4, pp. 74–78.
36. Liang J., Parsapour A., Cosoroaba E., Wu M., Boldea I., Fahimi B. A high torque density outer rotor claw pole stator permanent magnet synchronous motor. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2018, pp. 389–393.
37. Ryashentsev N.P., Alabuzhev P.M., Nikishin N.I. *Ruchnye elektricheskie mashiny udarnogo deystviya* [Manual electric impact machines]. Moscow, Nedra Publ., 1970. 198 p.
38. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotehnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press; St. Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p.
39. Kiyakli A., Hamit S. Modeling of an electric vehicle with MATLAB/Simulink. *International journal of automotive science and technology*, 2018, vol. 2, no. 2, pp. 9–15.
40. Bul O.B. *Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov: Magnitnye tsepi, polya i programma FEMM* [Methods for calculating the magnetic systems of electrical devices: Magnetic circuits, fields and the FEMM program]. Moscow, Akademiya Publ., 2005. 336 p.
41. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Simulation of dynamic processes in electromagnetic energy converters for force effects and lowfrequency vibrations generation systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 154–162. In Rus.

Received: 31 August 2020.

Information about the authors

- Lyudmila A. Neyman**, Dr. Sc., professor, Novosibirsk State Technical University.
Vladimir Yu. Neyman, Dr. Sc., professor, Novosibirsk State Technical University.

УДК 556.34(477)

РОЛЬ СИСТЕМЫ «ВОДА–ПОРОДА» В ПРОЦЕССАХ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА ПРИРОДНЫХ ВОД СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ ГОРОДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

Хващевская Альбина Анатольевна¹,
hvashevskaya@tpu.ru

Новиков Дмитрий Анатольевич^{2,3},
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Копылова Юлия Григорьевна¹,
kyg@tpu.ru

Сметанина Ирина Валерьевна¹,
siv@tpu.ru

Черных Анатолий Витальевич²,
ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

Дульцев Федор Федорович²,
DultsevFF@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, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

³ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

Актуальность исследования связана с получением новых данных по geoхимии природных родников и подземных вод Севастопольской городской агломерации как источников питьевого водоснабжения и оценки их качества с использованием современных аналитических методов.

Цель: выявить роль процессов взаимодействия в системе «вода – горная порода», континентального засоления и антропогенного загрязнения в формировании состава питьевых подземных вод Севастопольской городской агломерации.

Методы. Отбор проб выполнялся в соответствии с общепринятыми методиками. Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ. Теоретические основы к решению поставленных в настоящем исследовании задач разработаны профессором С.Л. Шварцевым в Сибирской гидрогеохимической школе.

Результаты. В 2018–2019 гг. в пределах Севастопольской городской агломерации были проведены полевые работы по изучению особенностей геохимии природных вод с целью оценки перспектив их использования для питьевого водоснабжения. Изученные воды преимущественно слабощелочные с pH от 7,52 до 8,39, характеризуются значительным геохимическим разнообразием по минерализации – от ультрапресных 207,4 до солоноватых 1268,8 мг/дм³, и химическому составу. Применение коэффициентов (Ca/Si, Mg/Si, Na/Si, Si/Na, Ca/Na, Ca/Mg, rNa/rCl и SO₄/Cl) позволило впервые выделить однородные геохимические совокупности по процессам формирования состава питьевых вод. Наряду с ключевой ролью системы «вода–порода» в формировании их состава оказывают существенное влияние процессы континентального засоления и антропогенного загрязнения. Изученные воды находятся на начальных стадиях формирования химического состава с позиции геологической эволюции системы «вода–порода». Состояние равновесия вод с карбонатными минералами достигается уже в маломинерализованных поверхностных водах и насыщенность ими природных вод повышается с увеличением времени взаимодействия с существенно-карбонатными и карбонатно-терригенными образованиями. Состав равновесных минералов в поверхностных водах представлен кальцитом и доломитом. В трещинно-жильных водах и водах зоны региональной трещиноватости карбонатных и карбонатно-терригенных образований он значительно усложняется до насыщения доломитом, кальцитом, сидеритом, рудохрозитом и магнезитом. Равновесие вод с сульфатными минералами прослеживается только в отдельных водопунктах (колодец южный с. Колхозное, источник Фонтан Варналы, источник Струнный) и в водах с антропогенной нагрузкой (с. Колхозное, Инкерманский и Орловский водозаборы).

Ключевые слова:

Подземные воды, гидрогеохимия, система «вода–порода», равновесие, континентальное засоление, антропогенное загрязнение, Севастопольская городская агломерация, Крымский полуостров.

Введение

Проблема питьевого водоснабжения Крыма активно обсуждается научной общественностью, и все единодушны в том, что имеющаяся инфраструктура

нуждается в масштабной реконструкции и развитии. Действующие водохранилища с трудом справляются со снабжением населения чистой водой. Ресурсов Чернореченского водохранилища, снабжающего во-

дой Севастополь и другие населенные пункты агломерации, в будущем может оказаться недостаточно. Среди многих вариантов обеспечения населения питьевой водой необходимого качества предлагалось использовать подземные воды, которыми богато южное побережье Крыма, где расположена область питания основных водоносных горизонтов, в том числе и родники подземных вод. В этой связи актуальными являются гидрогеохимические исследования состояния природных родников и подземных вод Севастопольской городской агломерации (СГА) как источников водоснабжения и оценки их качества с использованием современных аналитических методов анализа и термодинамических расчетов. Поэтому основной целью настоящего исследования является выявление роли процессов взаимодействия в системе «вода – горная порода», континентального засоления и антропогенного загрязнения в формировании состава питьевых подземных вод города федерального значения Севастополь и его агломерации.

Проблема питьевого водоснабжения на планете стоит давно и нарастает с каждым годом в связи с изменением климата. Острый дефицит ресурсов пресных подземных вод для питьевого водоснабжения населения особенно ощущается в странах Азии, Африки, и Латинской Америки. Наиболее интересные результаты опубликованы по вопросам водоснабжения городских агломераций Алжира, Бангладеш, Индии, Израиля, Камеруна, Нигера и других стран [1–22].

Фактический материал и методика исследования

Теоретические основы к решению поставленных в настоящем исследовании задач разработаны профессором С.Л. Шварцевым в Сибирской гидрогеохимической школе [23, 24].

Природные воды рассматриваемого региона изучены крайне слабо [25–37]. В этой связи сотрудниками ИНГГ СО РАН на территории СГА в 2018–2019 гг. проведены полевые гидрогеохимические исследования состава подземных и поверхностных вод, положенные в основу настоящей публикации в связи с характеристикой их химического состава и перспектив использования для питьевого водоснабжения.

Особенности состава вод, используемых для водоснабжения территории СГА, исследованы на примере поверхностных вод (р. Черная, Чернореченское водохранилище, озера) и подземных вод (каптированные и некаптированные родники, колодцы и водозаборных скважин Инкерманского, Орловского и Родниковского водозаборов). Всего на исследуемой территории в 2018–2019 гг. отобрано и проанализировано 52 пробы воды. Схема мест отбора проб представлена на рис. 1, а. Изучение химического состава рассмотренных потенциальных объектов питьевых вод выполнено в ПНИЛ гидрогеохимии ТПУ, зарегистрированной в национальной системе аккредитации «Росаккредитация» методами титриметрии, спектрофотометрии, потенциометрии, пламенно-эмиссионной спектрометрии (инженеры Л.А. Ракул, А.С. Погуца, Н.В. Бублий, О.В. Чеботарева), масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (инженер В.В. Куро-

ская). Анализы проводились по аттестованным методикам, включенным в реестр нормативных документов РФ. Оценка состояния равновесия вод со вторичным минералами проведена по расчету параметра насыщенности [38, 39].

Результаты исследования и обсуждение

Геохимия природных вод

Изученные воды преимущественно слабощелочные – с pH от 7,52 до 8,39, характеризуются значительным геохимическим разнообразием по минерализации от ультрапресных 207,4 до солоноватых 1268,8 мг/дм³ и химическому составу. Однако большинство изученных объектов характеризуется величиной общей минерализации не более 1 г/дм³, что связано с их распространением в сильно закарстованных известняках верхнеюрского возраста. Анионный состав вод характеризуется доминированием гидрокарбонат иона, местами в водах присутствует сульфат-ион от 10 до 38 %-экв и хлорид-ион от 10 до 17 %-экв (рис. 1, б). В катионном составе вод, наряду с доминированием Ca, отмечается высокая доля Na – от 10 до 70 %-экв, и магния – от 10 до 54 %-экв. Названия химических типов вод приводятся по принципу оттенков цвета с величиной равной и превышающей 20 %-экв компонента в формуле Курлова.

Применение коэффициентов (Ca/Si, Mg/Si, Na/Si, Si/Na, Ca/Na, Ca/Mg, rNa/rCl и SO₄²⁻/Cl⁻) позволило впервые выделить однородные геохимические совокупности по процессам формирования состава питьевых вод. Разделение данных на однородные геохимические совокупности по процессам формирования состава с оценкой интенсивности их проявления выполнено на основе соотношения химических элементов в водах. Коэффициенты Ca/Na, Ca/Mg, Ca/Si, Mg/Si, Na/Si использованы для оценки особенностей обогащения вод за счет процессов гидролиза алюмосиликатов; SO₄²⁻/Cl⁻>>1 и rNa+/rCl>>1 – гидролиза алюмосиликатов и окисления сульфидных минералов; эквивалентные соотношения натрия и хлора в водах rNa⁺/rCl=1, SO₄²⁻/Cl⁻<<1 – гидролиза алюмосиликатов с растворением эвaporитов или процессов потенциального смешения подземных и морских вод; пропорциональное увеличение значений SO₄²⁻/Cl⁻=1, rNa⁺/rCl≥1, Ca/Na>0 – испарительного концентрирования.

Состав поверхностных вод (I группа) характеризуется слабощелочной реакцией среды с pH=7,9, низкими концентрациями Si – 0,69 мг/дм³, и малой минерализацией вод 257 мг/дм³, соизмеримыми концентрациями Na и Mg при десятикратном преобладании концентраций Ca и близкими отношениями Mg/Si и Na/Si. Воды Чернореченского водохранилища слабощелочные с pH=8, ультрапресные с минерализацией 212 мг/дм³ HCO₃⁻-Ca состава с 13 %-экв Mg. Сохранению качества водных ресурсов водохранилища способствуют благоприятные условия его расположения на меловых глинистых образованиях его ложа, защищающего от инфильтрации вод в нижележащий горизонт.

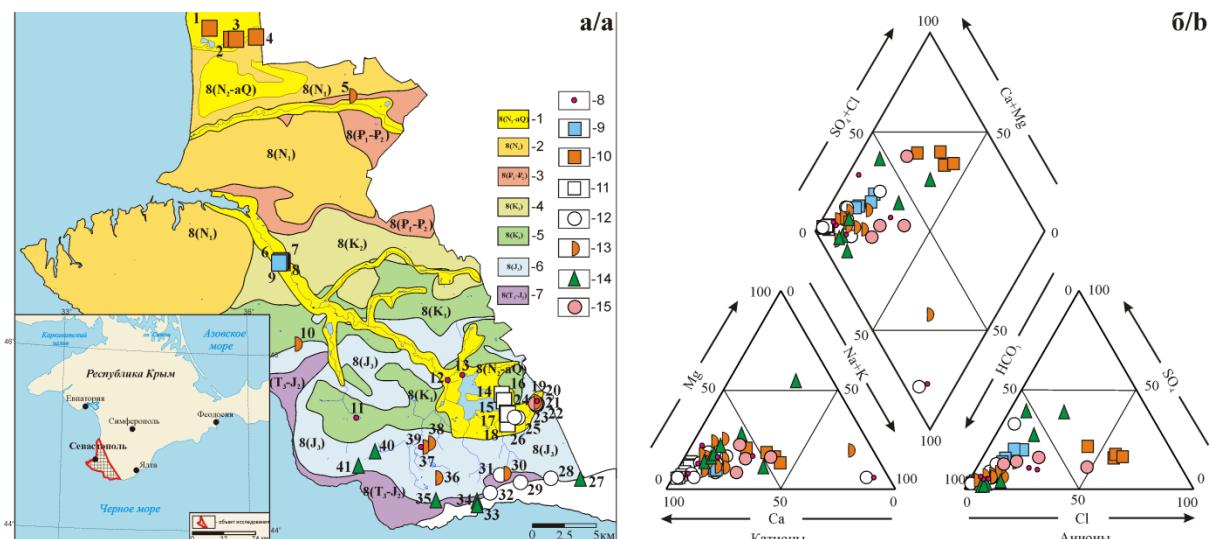


Рис. 1. Местоположение изученных водопунктов (1–41) (а) и диаграмма Пайпера питьевых вод (б) в пределах Севастопольской городской агломерации. Водоносные комплексы (по [32]): 1 – плиоценовых и четвертичных отложений, 2 – миоценовых отложений, 3 – палеоцен-эоценовых отложений, 4 – верхнемеловых отложений, 5 – нижнемеловых отложений, 6 – верхнеюрских отложений, 7 – верхнетриасово-среднеюрских отложений; 8 – Поверхностные воды (I группа): 13 – Чернореченское водохранилище, 12 – р. Черная рядом с мостом, 20 – озеро Узужинское, с. Колхозное; 11 – озеро с. Гончарное; 39 – оз. Конюшня, с. Орлиное; 9 – Аллювиальные воды палеорусла р. Черной, Инкерманский водозабор (II группа): 8 – скв. № 15; 9 – скв. № 5; 7 – скв. № 6; 6 – шахта № 2; 10 – Воды зоны региональной трещиноватости карбонатно-терригенных образований среднемиоценового горизонта, Орловский водозабор (законсервирован) (III группа): 2 – скв. № 10; 1 – скв. № 5574; 3 – скв. № 3; 4 – скв. № 5561, с. Вишневое; 11 – Трецинико-карстовые воды карбонатных образований верхнеюрского горизонта, Родниковский водозабор (IV группа): 16 – скв. № 103; 17 – скв. № 53; 26 – скв. № 55 (5760); 15 – скв. № 5775; 14 – скв. № 5776; 18 – скв. № 5531; 12 – Воды зоны региональной трещиноватости карбонатных образований верхнеюрского горизонта и в зоне их сочленения с карбонатно-терригенными образованиями триас-юрского горизонта (V группа): 24 – источник Скельский, 28 – источник Мердвен-Каясы, 32 – источник Кильсе-Бурунум, 29 – источник Q 044, 31 – колодец Кую-Алан, 25 – колодец Фуска-Чокрак; 13 – Воды зоны региональной трещиноватости карбонатно-терригенных образований триас-юрского горизонта (VI группа): 30 – Чертова лестница, 36 – родник Деспита, 37 – Фонтан Варналы, с. Гончарное, 38 – источник Кара-Агач, 10 – источник Св. Пантелеймона, с. Оборонное, 5 – скв. у часовни Св. Николая Чудотворца, 19 – колодец южный, с. Колхозное; 14 – Трецинико-жильные воды выщелачивания алюмосиликатов и окисления сульфидов (VII группа): 27 – минеральный источник Жабья радость, 34 – Санаторное верхний, 33 – Санаторное нижний, 40 – источник Станный, 41 – колодец возле Ласпинской смотровой площадки, 35 – колодец у храма Воскресения Христова; 15 – Воды зоны региональной трещиноватости преимущественно натриевых алюмосиликатов, подверженные процессам континентального засоления с антропогенным влиянием, с. Колхозное (VIII группа): 23 – северный колодец, 22 – центральный колодец для питья, 21 – центральный колодец для душа

Fig. 1. Location of the studied wells (1–41) (a) and Piper diagram of drinking water (b) within the Sevastopol city. Aquifer complex (according to [32]): 1 – Pliocene and Quaternary, 2 – Miocene, 3 – Paleocene-Eocene, 4 – Upper Cretaceous, 5 – Lower Cretaceous, 6 – Upper Jurassic, 7 – Upper Triassic-Middle Jurassic; 8 – Surface waters (group I): 13 – Chernorechenskoe water storage reservoir, 12 – Chernaya river near the bridge, 20 – Uzuzhinskoe lake, Kolkhoznoe v.; 11 – lake at Goncharnoe v.; 39 – Konyushnya lake, Orlinoe v.; 9 – Alluvial waters of the Chernaya river paleochannel, Inkerman water intake (group II): 8 – well no. 15; 9 – well no. 5; 7 – well no. 6; 6 – open well no. 2; 10 – waters of the zone of regional fracturing of carbonate-terrigenous formations of the Middle Miocene horizon, Orlovsky water intake (conserved) (group III): 2 – well no. 10; 1 – well no. 5574; 3 – well no. 3; 4 – well no. 5561, Vishnevoe v.; 11 – Fracture-karst water of carbonate formations of the Upper Jurassic horizon, Rodnikovsky water intake (IV group): 16 – well no. 103; 17 – well no. 53; 26 – well no. 55 (5760); 15 – well no. 5775; 14 – well no. 5776; 18 – well no. 5531; 12 – waters of the zone of regional fracturing of carbonate formations of the Upper Jurassic horizon and in the zone of their jointing with carbonate-terrigenous formations of the Triassic-Jurassic horizon (group V): 24 – Skelsky spring, 28 – Merdven-Kayasy spring, 32 – Kilse-Burunum spring, 29 – Q 044 spring, 31 – Kuyu-Alan well, 25 – Fuska-Chokrak well; 13 – waters of the zone of regional fracturing of carbonate-terrigenous formations of the Triassic-Jurassic horizon (group VI): 30 – Chertova lestnitsa, 36 – Despit spring, 37 – Varnaly fountain, Goncharnoe v., 38 – Kara-Agach spring, 10 – St. Panteleimon spring, Oboronnoe v., 5 – well at the chapel of St. Nicholas the Wonderworker, 19 – south well, Kolkhoznoe v.; 14 – fissure-vein waters of leaching of aluminosilicates and oxidation of sulfides (group VII): 27 – Zhabya radost mineral spring, 34 – upper well, Sanatornoe v., 33 – lower well, Sanatornoe v., 40 – Stranny spring, 41 – well near Laspinskaya observation deck, 35 – well near the Church of the Resurrection of Christ; 15 – waters of the zone of regional fracturing, predominantly of sodium aluminosilicates, subject to continental salinization processes with anthropogenic influence Kolkhoznoe v. (group VIII): 23 – northern well, 22 – central drinking well, 21 – central shower well

Воды аллювиальных отложений Инкерманского водозабора (II группа) слабощелочные с $\text{pH}=7,7$, пресные с минерализацией от 517 до 646 $\text{мг}/\text{дм}^3$ и содержанием Si в среднем $4,6 \text{ мг}/\text{дм}^3$. По составу воды гидрокарбонатные (с 16 %-экв SO_4 , 11 %-экв Cl и 4 %-экв NO_3), кальциевые (с 18 %-экв Na и до 15 %-экв Mg). Состав вод аллювиальных образований характеризуется соизмеримыми отношениями Na/Si и Ca/Na . Концентрации Ca почти в 4 раза превышают концентрации Na и в 12 раз выше концентрации Mg, а концентрации Na почти в 2 раза выше Mg ($\text{Na/Si}=4,23 > \text{Mg/Si}=1,67$).

Воды зоны региональной трещиноватости карбонатно-терригенных образований среднемиоценового горизонта (Орловский водозабор) (III группа) слабощелочные с $\text{pH } 7,54$, солоноватые с минерализацией $1158 \text{ мг}/\text{дм}^3$, жесткие – $11,3 \text{ мг-экв}/\text{л}$. По химическому составу $\text{HCO}_3\text{-Cl}$ (с 17 %-экв SO_4 и 4 %-экв NO_3) Na-Ca (с 17 %-экв Mg), что обусловлено смешением вод с минерализованными водами сарматского горизонта. Геохимические коэффициенты Ca/Si , Mg/Si и Ca/Mg и Mg/Si характеризуются соизмеримыми значениями, обусловленными процессами гидролиза алюмоシリкатов и близкими к единице значениями эквивалентного отношения tNa/tCl , что подтверждает возможность смешения вод.

Трещинно-карстовые воды карбонатных образований верхнеюрского горизонта Родниковского водозабора (IV группа) слабощелочные с $\text{pH } 7,9$, пресные с минерализацией $446 \text{ мг}/\text{дм}^3$ и средним содержанием Si $2,29 \text{ мг}/\text{дм}^3$, по составу $\text{HCO}_3\text{-Ca}$. В водах скважин 103 и 53 увеличиваются в химическом составе доли Mg до 13 %-экв и NO_3 до 3 %-экв. В пресных водах Родниковского водозабора отношения между компонентами характеризуются соизмеримыми (около двух) низкими значениями ($\text{Na/Si}=1,87$) Na и ($\text{Mg/Si}=2,23$) Mg. Вместе с тем отмечается более чем двадцатикратное превышение содержаний Ca над Na и почти 20-ти кратное его превышение над Mg. Это показывает особенность формирования состава вод при взаимодействии их с существенно карбонатными породами.

В водах зоны региональной трещиноватости карбонатных образований верхнеюрского горизонта в зоне их сочленения с карбонатно-терригенными образованиями триас-юрского горизонта (V группа) сохраняется щелочная реакция среды $\text{pH } 7,88$, минерализация в среднем $429 \text{ мг}/\text{дм}^3$ и содержание Si $3,12 \text{ мг}/\text{дм}^3$, $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ состав с 16 %-экв Mg и до 13 %-экв SO_4 , соизмеримые невысокие значения Mg/Si , Na/Si и более чем десятикратное значение отношения Ca/Mg. Необходимо отметить подверженность этих вод процессам испарительного концентрирования, что сопровождается пропорциональным увеличением концентраций SO_4 и Cl, особенно в колодцах Q 44, Кую-Алан и Фуска-Чокрак. Вместе с этим несколько увеличиваются концентрации Na и Mg.

Воды зоны региональной трещиноватости карбонатно-терригенных образований триас-юрского горизонта (VI группа) слабощелочные с $\text{pH } 7,64$, собственно пресные с минерализацией $668 \text{ мг}/\text{дм}^3$ и содержанием Si $5,87 \text{ мг}/\text{дм}^3$. Эти воды подвержены процессам континентального засоления, что отражается в

пропорциональном поступлении в воды SO_4 и Cl и сопровождается увеличением концентраций Na и Mg. В условиях испарительного концентрирования химических элементов в водах наблюдается превышение концентраций Na над Mg, десятикратное превышение Ca над Mg и восьмикратное над Na. По химическому составу воды HCO_3 с присутствием Cl до 15 %-экв и SO_4 до 13 %-экв (в источниках Чертова лестница, фонтан Варналы) преимущественно Ca с присутствием Mg до 15 %-экв и Na до 12 %-экв. Наибольшее поступление Mg (до 24 %-экв) отмечено в источнике Св. Пантелеимона, где формируются Mg-Ca воды. Воды этого источника содержат высокие концентрации Si= $6,12 \text{ мг}/\text{л}$, характеризуются повышенными значениями $\text{Na/Si}=3,93$ и $\text{Mg/Si}=3,12$ отношений, уменьшением $\text{Ca/Si}=16$ отношения и близкими значениями Ca/Na и Ca/Mg отношений. Длительное взаимодействие этой системы приводит к увеличению Na (до 71 %-экв) в водах и формированию содовых вод с $\text{pH}=8,33$ и содержанием Si= $7,83 \text{ мг}/\text{дм}^3$, которые вскрыты скважиной у часовни Св. Николая Чудотворца.

В трещинно-жильных водах выщелачивания алюмоシリкатов (VII группа) в условиях длительного взаимодействия системы «вода–порода» и возможного смешения с морскими водами происходит их обогащение Cl, Na и Mg и Si. При этом формируются слабощелочные, с $\text{pH } 7,93$, собственно пресные воды с минерализацией $729 \text{ мг}/\text{дм}^3$ и содержанием Si $6,34 \text{ мг}/\text{дм}^3$, гидрокарбонатные воды (с 14 %-экв Cl) магниево-кальциевые, содержащие до 18 %-экв Na. Средние концентрации Na составляют $31,8 \text{ мг}/\text{дм}^3$, Mg – $25 \text{ мг}/\text{дм}^3$, Cl – $36,6 \text{ мг}/\text{дм}^3$ и SO_4 – $9,8 \text{ мг}/\text{дм}^3$. Наиболее ярко эти процессы проявляются на примере родника Жабья радость, что сопровождается увеличением Na, Mg и Cl и уменьшением отношения SO_4/Cl при $\text{pH } 7,35$ и минерализации $865 \text{ мг}/\text{дм}^3$ и содержании Si $6,52 \text{ мг}/\text{дм}^3$, появлением HCO_3 Mg-Ca вод с 18 %-экв Na. Воды находятся в состоянии равновесия с каолинитом, насыщения по отношению к доломиту, кальциту, иногда сидериту и родахрозиту.

Взаимодействие трещинно-жильных вод и алюмоシリкатов с вкраплениями сульфидов характеризуется повышением значений SO_4/Cl и увеличением концентраций Mg и Na. В условиях слабощелочных вод происходит осаждение карбоната кальция, что показывает уменьшение концентраций Ca и значений Ca/Na и Ca/Mg. Это можно проследить на примере колодца возле храма Воскресения Христова в щелочных водах при $\text{pH}=8,39$ и минерализации $1040 \text{ мг}/\text{дм}^3$. С увеличением минерализации вод происходит изменение химического состава вод от $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$ в источнике Странном до $\text{Cl}\text{-HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na-Ca}$ в колодце возле Ласпинской смотровой площадки и $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Na-Mg}$ состава с 7 %-экв K в колодце храма Воскресения Христова. Сложный анионный состав этих вод может быть связан с влиянием природных и антропогенных факторов.

Антропогенное влияние на воды зоны региональной трещиноватости карбонатно-терригенных образований селитебных районов можно проследить на

примере с. Колхозного (VIII группа). При высокой антропогенной нагрузке на подземные воды колодцев центральных («для питья» и «для душа») наблюдается снижение pH до 7,36, увеличение концентраций Na до 113 мг/дм³, Cl до 197 мг/дм³, SO₄ до 111 мг/дм³, NO₃ до 180 мг/дм³, повышается общая жесткость до 11,4 мг-экв/л. Этими обстоятельствами определяется появление солоноватых вод с общей минерализацией до 1269 мг/дм³. Благодаря дополнительному поступлению компонентов, в частности бария и сульфат-иона в воды, изменяются химические типы вод – от фоновых HCO₃ Ca в колодце южном до NO₃-HCO₃-Cl Na-Mg-Ca в колодце центральном для душа.

Выделенные геохимические разновидности вод по процессам формирования их химического состава могут быть использованы как возможные потенциальные источники обеспечения населения питьевой водой необходимого качества. С этих позиций воды Чернореченского водохранилища могут рассматриваться как соответствующие высшей категории качества, прежде всего по степени минерализации вод, содержаниям основных компонентов, и расцениваются как национальное достояние с заботой о сохранении их качества. Трещинно-карстовые воды карбонатных образований верхнеюрского горизонта Родниковского водозабора соответствуют первой категории качества питьевых вод.

Равновесие вод с вмещающими горными породами

Выделенные геохимические разновидности вод находятся на начальных стадиях формирования химического состава с позиции геологической эволюции системы «вода–порода».

Преимущественно карбонатный состав водовмещающих пород определяет главенствующую роль процессов растворения хемогенных образований и, прежде всего, карбонатов в обогащении вод химическими элементами и формировании их химического состава. Состояние равновесия вод с карбонатными минералами достигается уже в маломинерализованных поверхностных водах, и насыщенность ими природных вод повышается с увеличением времени взаимодействия с существенно-карбонатными и карбонатно-терригенными образованиями. Состав равновесных минералов усложняется от кальцита и доломита в поверхностных водах до их насыщенности в водах зоны региональной трещиноватости карбонатных и карбонатно-терригенных образований – по отношению к кальциту, доломиту, сидериту, редко родохрозиту, а в трещинно-жильных водах – доломиту, кальциту, сидериту, иногда родохрозиту и магнезиту (рис. 2).

Для системы «вода–алюмосиликаты» в поверхностных водах характерно состояние равновесия с гиббситом. С каолинитом равновесны воды озера Конюшня с pH=7,56, минерализацией 756 мг/дм³ и содержанием Si=4 мг/дм³. В трещинно-карстовых водах Родниковского водозабора, а также в водах зоны региональной трещиноватости карбонатных образований и в зоне сочленения карбонатно-терригенных и карбонатных образований с содержанием Si от 1,5 до 3,7 мг/дм³ наблюдается равновесие вод с каолинитом.

С увеличением времени взаимодействия вод с карбонатно-терригенными образованиями происходит их насыщение по отношению к каолиниту, Ca- и Mg-монтмориллонитам при среднем содержании Si=5,88 мг/дм³ и минерализации 675 мг/дм³. Трещинно-жильные воды терригенно-карбонатных образований находятся на стадии насыщения по отношению к каолиниту, Ca- и Mg-монтмориллонитам, достигают состояния равновесия вод с кальцитом и карбонатными минералами (доломитом и сидеритом).

Более высокая стадия эволюционного развития и формирования состава вод с достижением равновесия с сульфатами отмечается только в отдельных водопунктах, в водах которых отмечается состояние равновесия вод с баритом (колодец южный с. Колхозное, источник Фонтан Варналы, источник Странный и Ласпинский) и в водах с антропогенной нагрузкой (с. Колхозное, Орловский и Инкерманский водозаборы).

На Инкерманском и Орловском водозаборах, отличающихся повышенной минерализацией вод и средним содержанием Si 5,29 мг/дм³, наряду с насыщенностью вод по отношению к каолиниту, Ca- и Mg-монтмориллонитам, равновесием вод с карбонатами, достигается состояние равновесия и насыщенности вод по отношению к бариту. Этому обстоятельству, наряду с природными процессами, способствует поступление в воды селитебных районов высоких концентраций сульфат-иона и бария.

Наибольшая степень насыщения вод по отношению к вторичным минералам выявлена в водах колодца у храма Воскресения Христова и скважины у часовни Св. Николая Чудотворца: каолиниту, Ca-, Mg- и Na-монтмориллонитам и кальциту при взаимодействии вод с алюмосиликатами, а также доломиту, кальциту, сидериту, родохрозиту, стронцианиту и магнезиту при взаимодействии вод с карбонатными образованиями.

Заключение

Выделенные геохимические разновидности вод находятся на начальных стадиях формирования химического состава с позиции геологической эволюции системы «вода–порода». Рассмотренные как потенциальные источники водоснабжения, природные воды подвержены процессам испарительного концентрирования и распространены в породах преимущественно карбонатного состава. В этой связи определяющим процессом формирования состава вод Севастопольской городской агломерации является взаимодействие их с карбонатными образованиями. Благодаря щелочным условиям геохимической среды достигается состояние равновесия природных вод с кальцитом, доломитом, сидеритом, родохрозитом, иногда стронцианитом, магнезитом и баритом.

Стадия насыщения вод по отношению к кальциту при их взаимодействии с алюмосиликатами достигается в водах выщелачивания в условиях длительного взаимодействия системы и отмечается в трещинно-жильных водах колодцев Санаторное и Q 044, Воскресения Христова и скважины у часовни Св. Николая Чудотворца при насыщении вод по отношению к каолиниту, Ca-, Mg- и Na-монтмориллонитам.

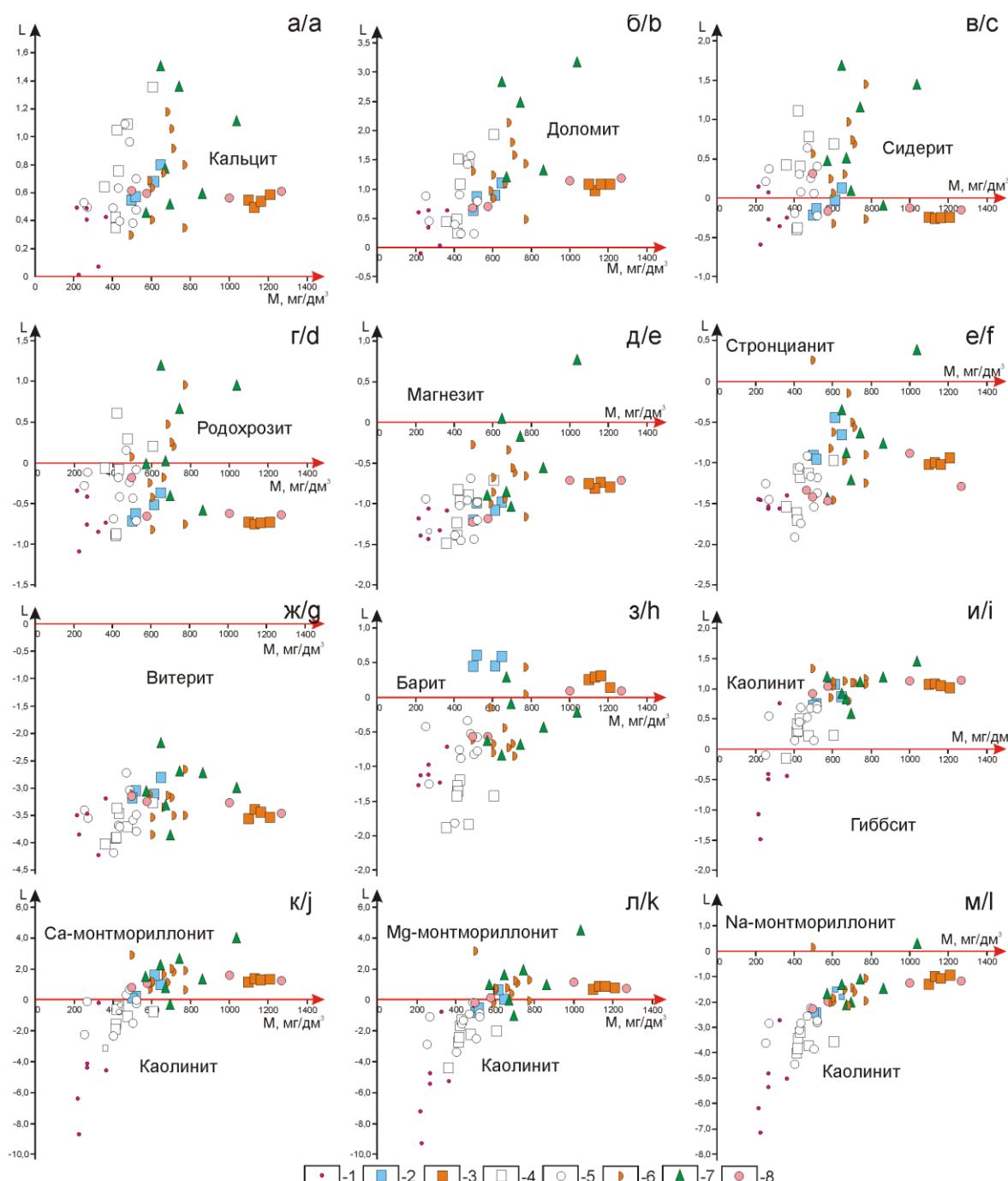


Рис. 2. Расчетная степень насыщения (L) питьевых вод Севастопольской городской агломерации карбонатными (а–з) и алюмосиликатными минералами (и–м) при стандартных условиях. Условные обозначения – на рис. 1

Fig. 2. Calculated degree of saturation (L) of drinking water of the Sevastopol city with carbonate (a–h) and aluminosilicate minerals (i–l) under standard conditions. For legend see Fig. 1

Равновесие вод с сульфатными минералами проявляется только в отдельных водопунктах, в водах которых отмечается состояние равновесия вод с баритом (колодец южный, с. Колхозное, источник Фонтан Варналы, источник Странный и Ласпинский) и в водах с антропогенной нагрузкой (с. Колхозное, Орловский и Инкерманский водозаборы).

Выделенные геохимические разновидности природных вод с позиции качества питьевых вод могут рассматриваться как соответствующие высшей (поверхностные воды Чернореченского водохранилища) и пер-

вой категориям качества (подземные воды Родниковского водозабора). Воды зоны региональной трещиноватости карбонатно-терригенных образований триас-юрского горизонта подвержены процессам континентального засоления, в связи с чем необходимо проведение мероприятий по улучшению качества питьевых вод.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025, Российского фонда фундаментальных исследований и города Севастополь в рамках гранта № 18-45-920032 р_а и Государственного Задания РФ «Наука» в рамках проекта № FSWW-0022-2020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Groundwater beneath the urban area of Khan Younis City, southern Gaza Strip (Palestine): assessment for multi-domestic purposes / M.S. Abu Jabal, I. Abustan, M.R. Rozaimy, H. El Najar // Arabian Journal of Geosciences. – 2017. – V. 10. – P. 257–272.
2. Aloni A., Brenner A. Use of cotton as a carbon source for denitrification in biofilters for groundwater remediation // Water. – 2017. – V. 9. – P. 714–725.
3. Asadi P., Ataei-Ashtiani B., Beheshti A. Vulnerability assessment of urban groundwater resources to nitrate: the case study of Mashhad, Iran // Environmental Earth Sciences. – 2017. – V. 76. – P. 41–56.
4. Mass balance of emerging contaminants in the water cycle of a highly urbanized and industrialized area of Italy / S. Castiglioni, E. Davoli, F. Riva, M. Palmiotti, P. Camporini, A. Manenti, E. Zuccato // Water Research. – 2018. – V. 131. – P. 287–298.
5. Hydrochemical characteristics and the impact of anthropogenic activity on groundwater quality in suburban area of Urmia city, Iran / M. Chitsazan, N. Aghazadeh, Y. Mirzaee, Y. Golestan // Environment, Development and Sustainability. – 2017. – V. 21 (4) – P. 1–21.
6. Spatial analysis and health risk assessment of heavy metals concentration in drinking water resources / R.A. Fallahzadeh, M.T. Ghaneian, M. Miri, M.M. Dashti // Environmental Science and Pollution Research. – 2017. – V. 24. – P. 24790–24802.
7. Impacts of a large Sahelian city on groundwater hydrodynamics and quality: example of Niamey (Niger) / A.B. Hassane, C. Leduc, G. Favreau, B.A. Bekins, T. Margueron // Hydrogeology Journal. – 2016. – V. 24. – № 2. – P. 407–423.
8. Jangam C., Pujari P. Impact of on-site sanitation systems on groundwater sources in a coastal aquifer in Chennai, India // Environmental Science and Pollution Research. – 2017. – V. 26 (10). – P. 1–10.
9. Combined hydrogeological and nitrate modelling to manage water resources of the Middle Soummam Aquifer, Northeast of Algeria / F. Kessasra, M. Mesbah, Z. Khemissa, N. Bouab, S. Khaled-Khodja, H. Lamari // Arabian Journal of Geosciences. – 2017. – V. 10. – P. 368–388.
10. Lasagna M., De Luca D.A. Evaluation of sources and fate of nitrates in the western Po plain groundwater (Italy) using nitrogen and boron isotopes // Environmental Science and Pollution Research. – 2017. – V. 26 (3). – P. 1–16.
11. Lins-de-Barros F.M. Integrated coastal vulnerability assessment: a methodology for coastal cities management integrating socioeconomic, physical and environmental dimensions – case study of Região dos Lagos, Rio de Janeiro, Brazil // Ocean & Coastal Management. – 2017. – V. 149. – P. 1–11.
12. Nitrate-nitrogen contamination in groundwater: spatiotemporal variation and driving factors under cropland in Shandong Province, China / J. Liu, L.H. Jiang, C.J. Zhang, P. Li, T.K. Zhao // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – V. 82. – 012059.
13. Passive sampling as a tool for identifying micro-organic compounds in groundwater / N. Mali, S. Cerar, A. Koroša, P. Auersperger // Science of the Total Environment. – 2017. – V. 593–594. – P. 722–734.
14. Occurrence of chemical contaminants in peri-urban agricultural irrigation waters and assessment of their phytotoxicity and crop productivity / A. Margenat, V. Matamoros, S. Díez, N. Cañameras, J. Comas, J.M. Bayona // Science of the Total Environment. – 2017. – V. 599–600. – P. 1140–1148.
15. Hydrogeochemical and isotopic signature of surface and groundwater in a highly industrialized sector of the Rio de la Plata coastal plain (Argentina) / L. Santucci, E. Carol, G. Borzi, M.G. García // Marine Pollution Bulletin. – 2017. – V. 120. – P. 387–395.
16. Selvakumar S., Chandrasekar N., Kumar G. Hydrogeochemical characteristics and groundwater contamination in the rapid urban development areas of Coimbatore, India // Water Resources and Industry. – 2017. – V. 17. – P. 26–33.
17. Spatial and seasonal variations of surface and groundwater quality in a fast-growing city: Lubango, Angola / M.M.V.G. Silva, E.M.C. Gomes, M. Isaías, J.M.M. Azevedo, B. Zeferino // Environmental Earth Sciences. – 2017. – № 76. – P. 790–817.
18. Evaluation of groundwater quality and health risks from contamination in the north edge of the Loess Plateau, Yulin City, Northwest China / H. Su, W. Kang, Y. Xu, J. Wang // Environmental Earth Sciences. – 2017. – V. 76. – P. 467–488.
19. Weaver J.W., Murray A.R., Kremer F.V. Estimation of the proximity of private domestic wells to underground storage tanks: Oklahoma pilot study // Science of the Total Environment. – 2017. – V. 609. – P. 1589–1599.
20. Wilson D.C. Potential urban runoff impacts and contaminant distributions in shoreline and reservoir environments of Lake Havasu, southwestern United States // Science of the Total Environment. – 2018. – V. 621. – P. 95–107.
21. Wyman D.A., Koretsky C.M. Effects of road salt deicers on an urban groundwater – fed kettle lake // Applied Geochemistry. – 2018. – V. 89. – P. 265–272.
22. Assessing risks at a former chemical facility, Nanjing City, China: an early test of the new remediation guidelines for waste sites in China / Y. Zhang, S. Ye, J. Wu, R.G. Stahl Jr. // Water. – 2017. – V. 9. – P. 657–672.
23. Шварцев С.Л. Прогрессивно самоорганизующиеся абиогенные диссипативные структуры в геологической истории Земли // Литосфера. – 2007. – № 1. – С. 65–89.
24. Шварцев С.Л. Взаимодействие воды с алюмосиликатными горными породами. Обзор // Геология и геофизика. – 1991. – № 12. – С. 16–50.
25. Амеличев Г.Н. Скельская пещера: состояние изученности, проблемы охраны и использования // Спелеология и карстология. – 2008. – № 1. – С. 94–99.
26. Гидрохимический режим и микрэлементный состав вод Чернореченского водохранилища в 1991–2004 гг. / В.М. Артеменко, Ю.П. Ильин, В.С. Кучеренко, А.И. Рябинин, С.А. Боброва, А.Н. Гуцалюк, Ю.А. Мальченко, Л.В. Салтыкова // Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу: Зб. наук. пр. – 2005. – № 12. – С. 129–149.
27. Изотопный состав атмосферных осадков и карстовых источников северо-западного склона Крымских гор / Ю.В. Дублянский, А.Б. Климчук, Г.Н. Амеличев, С.В. Токарев, К.Шпетль // Спелеология и карстология. – 2012. – № 9. – С. 14–21.
28. Миньковская Р.Я., Ингеров А.В. Гидрохимическая характеристика рек севастопольского региона // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2010. – № 22. – С. 265–281.
29. Новиков Д.А., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф. Особенности гидрогеологии верхнеюрских отложений юго-западных районов Крымского полуострова // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. – 2018. – Т. 4 (70). – № 4. – С. 268–288.
30. Особенности гидрохимии эксплуатируемых водоносных горизонтов Севастопольской городской агломерации / Д.А. Новиков, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев, И.И. Юрчик, А.Ф. Сухорукова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – Т. 2. – С. 81–91.
31. Новиков Д.А., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф. Оценка качества подземных вод верхнеюрских отложений юго-западных районов Крымского полуострова для целей питьевого и сельскохозяйственного водоснабжения // Экология и промышленность России. – 2019. – Т. 23. – № 4. – С. 52–57.
32. Новиков Д.А., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф. Новый взгляд на гидрохимические условия города федерального значения Севастополь // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 8. – С. 105–122.
33. Geochemistry of natural waters of the Baydar valley (Crimean Peninsula) / L.A. Nichkova, D.A. Novikov, A.V. Chernykh, F.F. Dultsev, G.A. Sigora, T.Yu. Khomenko // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 98. – № 01036.
34. Distribution of the stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, δD и $\delta^{13}\text{C}$) in natural waters of the Baydar valley (Crimean Peninsula) / D.A. Novikov, L.A. Nichkova, A.V. Chernykh, F.F. Dultsev, A.N. Pyryaev, G.A. Sigora, T.Yu. Khomenko // E3S Web of Conferences – 2019. – V. 98. – № 01038.
35. Новые изотопно-гидрохимические данные по составу природных вод Байдарской долины (Крымский полуостров) / Новиков Д.А., Копылова Ю.Г., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф., Пыряев А.Н., Хва-

- щевская А.А., Ничкова Л.А., Сигора Г.А., Яхин Т.А. // Геология и геофизика. – 2020. – DOI: 10.15372/GiG2020137.
36. Геохимические типы природных вод Байдарской долины (Крымский полуостров) / Д.А. Новиков, Ю.Г. Копылова, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев, А.А. Хващевская // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2020. – № 17. – С. 401–405.
37. Новиков Д.А., Корнеева Т.В. Поведение природных радионуклидов в водах Байдарской долины (Крымский полуостров) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: Материалы XVI международной научной конференции. – Новосибирск, 20–24 апреля 2020. – С. 165–178.
38. Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения для решения гидрогеологических задач // Известия ТПУ. – 2002. – Т. 305. – № 6. – С. 348–366.
39. Букаты М.Б. Рекламно-техническое описание программного комплекса HydroGeo «Инженерные, гидродинамические и гидрохимические расчеты, моделирование». Номер гос. регистрации алгоритмов и программ во Всероссийском научно-техническом информационном центре (ВНТИЦ) № 50200500605. – М.: ВНТИЦ, 2005. – 7 с.

Поступила 17.08.2020 г.

Информация об авторах

Хващевская А.А., кандидат геолого-минералогических наук, заведующая Проблемной научно-исследовательской лабораторией гидрогеохимии, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Новиков Д.А., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа и кафедры общей и региональной геологии Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

Копылова Ю.Г., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Сметанина И.В., ведущий инженер Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Черных А.В., научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

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

UDK 556.34(477)

THE ROLE OF THE «WATER–ROCK» SYSTEM IN FORMATION OF NATURAL WATER COMPOSITION OF THE SEVASTOPOL CITY

Albina A. Khvashchevskaya¹,
hvashhevskaya@tpu.ru

Dmitry A. Novikov^{2,3},
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Yulia G. Kopylova¹,
kyg@tpu.ru

Irina A. Smetanina¹,
siv@tpu.ru

Anatoliy V. Chernykh²,
ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

Fedor F. Dultsev²,
DultsevFF@ipgg.sbras.ru

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

² Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB of RAS,
3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

³ Novosibirsk State University,
1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the research consists in obtaining data on the geochemistry of springs and groundwater of the Sevastopol area as sources of drinking water supply and assessing their quality using modern analytical methods.

The aim of the research is to reveal the role of interaction in the «water–rock» system, processes of continental salinization and anthropogenic pollution in formation of drinking water composition in the Sevastopol urban agglomeration.

Methods. Sampling was carried out in accordance with generally accepted techniques. The laboratory study of the chemical composition by methods of titrimetry, ion chromatography, mass spectrometry with inductively coupled plasma, was carried out at the Problem Research Laboratory of Hydrogeochemistry of the Engineering School of Natural Resources of the Tomsk Polytechnic University. The theoretical foundations for solving the assigned tasks in this study were developed by professor S.L. Shvartsev at the Siberian Hydrogeochemical School.

Results. During 2018–2019, field work was carried out on the territory of the Sevastopol city agglomeration to study the geochemistry of natural waters in order to assess the prospects for their use for drinking water supply. The studied waters are predominantly slightly alkaline (pH from 7,52 to 8,39), characterized by significant geochemical diversity in mineralization (from ultra-fresh 207,4 to brackish 1268,8 mg/dm³) and chemical composition. The application of the coefficients (Ca/Si, Mg/Si, Na/Si, Ca/Na, Ca/Mg, Si/Na, rNa/Cl and SO₄/Cl) made it possible to identify homogeneous geochemical groups according to the formation of drinking water composition. The formation of their composition is influenced not only by the «water–rock» system, but also by the processes of continental salinization and anthropogenic pollution. The formation of the chemical composition from the perspective of the geological evolution of the water-rock system is in the initial stages.

The equilibrium state of waters with carbonate minerals is achieved already in low-mineralized surface waters and the saturation of natural waters increases with the time of interaction with carbonate and carbonate-terrigenous formations. The composition of equilibrium minerals varies from calcite and dolomite in surface waters to their saturation in fissure-vein waters. For the waters of the regional fracture zone of carbonate and carbonate-terrigenous formations, the composition of the equilibrium minerals includes dolomite, calcite, siderite, rhodochrosite and magnesite. The equilibrium of waters with sulfate minerals can be traced only in some water points (the southern well in Kolkhoznoe, the Varnaly Fountain source, Stranny spring) and in waters with anthropogenic effect (Kolkhoznoe, Inkermansky and Orlovskii water intakes).

Key words: Groundwater, hydrogeochemistry, «water–rock» system, equilibrium, continental salinity, anthropogenic pollution, Sevastopol area, Crimean peninsula.

The research was financially supported by the FSR no. 0331-2019-0025, the Russian Foundation for Basic Research and Sevastopol within the research project no. 18-45-920032 and State Assignment of the Russian Federation «Science» within the project no. FSWW-0022-2020.

REFERENCES

1. Abu Jabal M. S., Abustan I., Rozaimy M. R., El Najar H. Groundwater beneath the urban area of Khan Younis City, southern Gaza Strip (Palestine): assessment for multi-domestic purposes. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, vol. 10, pp. 257–272.
2. Aloni A., Brenner A. Use of cotton as a carbon source for denitrification in biofilters for groundwater remediation. *Water*, 2017, vol. 9, pp. 714–725.
3. Asadi P., Ataei-Ashtiani B., Beheshti A. Vulnerability assessment of urban groundwater resources to nitrate: the case study of Mashhad, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 2017, vol. 76, pp. 41–56.
4. Castiglioni S., Davoli E., Riva F., Palmiotto M., Camporini P., Manenti A., Zuccato E. Mass balance of emerging contaminants in the water cycle of a highly urbanized and industrialized area of Italy. *Water Research*, 2018, vol. 131, pp. 287–298.
5. Chitsazan M., Aghazadeh N., Mirzaee Y., Golestan Y. Hydrochemical characteristics and the impact of anthropogenic activity on groundwater quality in suburban area of Urmia city, Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 2017, vol. 21 (4), pp. 1–21.
6. Fallahzadeh R.A., Ghaneian M.T., Miri M., Dashti M.M. Spatial analysis and health risk assessment of heavy metals concentration in drinking water resources. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, pp. 24790–24802.
7. Hassane A.B., Leduc C., Favreau G., Bekins B.A., Margueron T. Impacts of a large Sahelian city on groundwater hydrodynamics and quality: example of Niamey (Niger). *Hydrogeology Journal*, 2016, vol. 24, no. 2, pp. 407–423.
8. Jangam C., Pujari P. Impact of on-site sanitation systems on groundwater sources in a coastal aquifer in Chennai, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, no. 10, pp. 1–10.
9. Kessasra F., Mesbah M., Khemissa Z., Bouab N., Khaled – Khodja S., Lamari H. Combined hydrogeological and nitrate modelling to manage water resources of the Middle Soummam Aquifer, Northeast of Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, vol. 10, pp. 368–388.
10. Lasagna M., De Luca D.A. Evaluation of sources and fate of nitrates in the western Po plain groundwater (Italy) using nitrogen and boron isotopes. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 26, no. 3, pp. 1–16.
11. Lins-de-Barros F.M. Integrated coastal vulnerability assessment: a methodology for coastal cities management integrating socioeconomic, physical and environmental dimensions – case study of Região dos Lagos, Rio de Janeiro, Brazil. *Ocean & Coastal Management*, 2017, vol. 149, pp. 1–11.
12. Liu J., Jiang L.H., Zhang C.J., Li P., Zhao T.K. Nitrate-nitrogen contamination in groundwater: spatiotemporal variation and driving factors under cropland in Shandong Province, China. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 82, 012059.
13. Mali N., Cerar S., Koroša A., Auersperger P. Passive sampling as a tool for identifying micro – organic compounds in groundwater. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 593–594, pp. 722–734.
14. Margenat A., Matamoros V., Diez S., Cañameras N., Comas J., Bayona J.M. Occurrence of chemical contaminants in peri-urban agricultural irrigation waters and assessment of their phytotoxicity and crop productivity. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 599–600, pp. 1140–1148.
15. Santucci L., Carol E., Borzi G., García M.G. Hydrogeochemical and isotopic signature of surface and groundwater in a highly industrialized sector of the Rio de la Plata coastal plain (Argentina). *Marine Pollution Bulletin*, 2017, vol. 120, pp. 387–395.
16. Selvakumar S., Chandrasekar N., Kumar G. Hydrogeochemical characteristics and groundwater contamination in the rapid urban development areas of Coimbatore, India. *Water Resources and Industry*, 2017, vol. 17, pp. 26–33.
17. Silva M.M.V.G., Gomes E.M.C., Isaias M., Azevedo J.M.M., Zeferino B. Spatial and seasonal variations of surface and groundwater quality in a fast-growing city: Lubango, Angola. *Environmental Earth Sciences*, 2017, no. 76, pp. 790–817.
18. Su H., Kang W., Xu Y., Wang J. Evaluation of groundwater quality and health risks from contamination in the north edge of the Loess Plateau, Yulin City, Northwest China. *Environmental Earth Sciences*, 2017, vol. 76, pp. 467–488.
19. Weaver J.W., Murray A.R., Kremer F.V. Estimation of the proximity of private domestic wells to underground storage tanks: Oklahoma pilot study. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 609, pp. 1589–1599.
20. Wilson D.C. Potential urban runoff impacts and contaminant distributions in shoreline and reservoir environments of Lake Havasu, southwestern United States. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 621, pp. 95–107.
21. Wyman D.A., Koretsky C.M. Effects of road salt deicers on an urban groundwater – fed kettle lake. *Applied Geochemistry*, 2018, vol. 89, pp. 265–272.
22. Zhang Y., Ye S., Wu J., Stahl Jr. R.G. Assessing risks at a former chemical facility, Nanjing City, China: an early test of the new remediation guidelines for waste sites in China. *Water*, 2017, vol. 9, pp. 657–672.
23. Shvartsev S.L. Progressively self-organizing abiogenic dissipative structures in the geological history of the Earth. *Lithosphere*, 2007, no. 1, pp. 65–89. In Rus.
24. Shvartsev S.L. Interaction of water with aluminosilicate rocks. Review. *Russian Geology and Geophysics*, 1991, no. 12, pp. 16–50. In Rus.
25. Amelichev G.N. Skelskaya peshchera: sostoyanie izuchenosti, problemy okhrany i ispolzovaniya [Skelskaya cave: state of knowledge, problems of protection and use]. *Speleologiya i karstologiya*, 2008, no. 1, pp. 94–99.
26. Artemenko V.M., Ilyin Yu.P., Kucherenko V.S., Ryabinin A.I., Bobrova S.A., Gutsalyuk A.N., Malchenko Yu.A., Saltykova L.V. Gidrokhimicheskiy rezhim i mikroelementnyy sostav vod Chernorechenskogo vodokhranilishcha v 1991–2004 gg. [Hydrochemical regime and microelement composition of the waters of the Chernorechensky reservoir in 1991–2004]. *Ekologichna bezpeka priberezhnoi ta shelfovoi zon ta kompleksne vikoristannya resursiv shelfu: Zb. nauk. pr.*, 2005, no. 12, pp. 129–149.
27. Dublyansky Yu.V., Klimchuk A.B., Amelichev G.N., Tokarev S.V., Shpötl K. Izotopnyy sostav atmosfernnykh osadkov i karstovykh istochnikov severo-zapadnogo sklona Krymskikh gor [Isotopic composition of precipitation and karst sources on the northwestern slope of the Crimean Mountains]. *Speleologiya i karstologiya*, 2012, no. 9, pp. 14–21.
28. Minkovskaya R.Ya., Ingerov A.V. Gidrokhimicheskaya kharakteristika rek sevastopolskogo regiona [Hydrochemical characteristics of the rivers of the Sevastopol region]. *Ekologicheskaya bezopasnost priberezhnoi i shelfovoy zon morya*, 2010, no. 22, pp. 265–281.
29. Novikov D.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F. Features of the hydrogeology of the Upper Jurassic deposits of the southwestern regions of the Crimean peninsula. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*, 2018, vol. 4 (70), no. 4, pp. 268–288. In Rus.
30. Novikov D.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Yurchik I.I., Sukhorukova A.F. Features of hydrogeochemistry of exploited aquifers of the Sevastopol urban agglomeration. *Interexpo Geo-Siberia*, 2018, vol. 2, pp. 81–91. In Rus.
31. Novikov D.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F. Groundwater quality assessment of Upper Jurassic sediments in the southwestern districts of the Crimean Peninsula for drinking and agricultural water supply. *Ecology and Industry of Russia*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 52–57. In Rus.
32. Novikov D.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F. New look at hydrogeological conditions of the federal city of Sevastopol. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 8, pp. 105–122. In Rus.
33. Nichkova L.A., Novikov D.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Sigora G.A., Khomenko T.Yu. Geochemistry of natural waters of the Baydar valley (Crimean Peninsula). *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 98, no. 01036.
34. Novikov D.A., Nichkova L.A., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Pyryaev A.N., Sigora G.A., Khomenko T.Yu. Distribution of the stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, δD и $\delta^{13}\text{C}$) in natural waters of the Baydar valley (Crimean Peninsula). *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 98, no. 01038.

35. Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Pyryaev A.N., Khvashchevskaya A.A., Nichkova L.A., Sigora G.A., Yakhin T.A. New isotope-hydrogeochemical data on the composition of natural waters of the Baydar Valley (Crimean Peninsula). *Russian Geology and Geophysics*, 2020. DOI: 10.15372/GiG2020137.
36. Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Khvashchevskaya A.A. Geochemical types of natural waters of the Baidar valley, Crimean Peninsula. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTS RAN*, 2020, no. 17, pp. 401–405. In Rus.
37. Novikov D.A., Korneeva T.V. Povedenie prirodnykh radionuklidov v vodakh Baydarskoy doliny (Krymskiy poluostrov) [Behaviour of natural radionuclides in the waters of the Baydar valley (the Crimean peninsula)]. *Interespo GEO-Sibir. Nedropolzovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh. Ekonomika. Geokologiya. Materialy XVI mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Interespo GEO-Sibir. Subsurface management. Mining. Directions and techniques of searching, exploration and development of mineral deposits. Economics. Geocology. Proc. of XVI International scientific conference]. Novosibirsk, 20–24 April 2020. pp. 165–178.
38. Bukaty M.B. Development of software for solving hydrogeological problems. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2002, vol. 305, no. 6, pp. 348–366. In Rus.
39. Bukaty M.B. *Reklamno-tehnicheskoe opisanie programmnogo kompleksa HydroGeo «Inzhenernye, gidrodinamicheskie i gidrogeokhimicheskie raschety, modelirovaniye» № 50200500605* [Advertising and technical description of the HydroGeo software package «Engineering, hydrodynamic and hydrogeochemical calculations, modeling». State registration number of algorithms and programs in the All-Russian Scientific and Technical Information Center (VNTIC) No. 50200500605]. Moscow, VNTIC Publ., 2005. 7 p.

Received: 17 August 2020.

Information about the authors

Albina A. Khvashchevskaya, Cand Sc., head of the laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.

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

Yulia A. Kopylova, Cand Sc., senior researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

Irina A. Smetanina, chief engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anatoliy V. Chernykh, researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

Fedor F. Dultsev, researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

УДК 620.171.2:620.179.18:624.154.1:550.8.052

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ «СВАЯ–ГРУНТ» НА ДИНАМИЧЕСКИЕ АТРИБУТЫ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Чуркин Алексей Андреевич¹,
chaa92@mail.ru

Капустин Владимир Викторович²,
1391854@mail.ru

Лозовский Илья Николаевич³,
i.n.lozovsky@yandex.ru

Жостков Руслан Александрович⁴,
shageraxcom@yandex.ru

¹ ООО «ЭГЕОС»,
Россия, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 8, стр. 3.

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1.

³ Центр геоэлектромагнитных исследований, филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Россия, 108840, г. Москва, г. Троицк, а/я 30.

⁴ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Россия, 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности применения неразрушающих методов контроля качества свайных фундаментов. Основные направления исследований в данной области сосредоточены на изучении возможностей и ограничений существующих методик контроля и разработке новых, позволяющих получить дополнительные сведения о техническом состоянии конструкций. Надежная оценка сплошности и несущей способности свай, выполненная до ввода фундамента в эксплуатацию, минимизирует последующие риски капитальных затрат на устранение аварийных последствий. Распространенные геофизические методики контроля качества фундаментов предназначены для изучения состояния материала конструкций. Описанная в публикации модификация сейсмоакустического метода предлагает использовать дополнительную информацию, извлекаемую из акустических сигналов, для сравнительной оценки контактных условий свай. Это позволяет выполнить требования ГОСТ 5686-2012 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями» по выбору характерных мест для проведения статических испытаний, повысить прогностическую эффективность комплекса полевых испытаний в капитальном строительстве.

Цель: изучение изменений динамических атрибутов сигналов, зарегистрированных сейсмоакустическим методом, в зависимости от параметров системы «свая–грунт».

Объекты: железобетонные сваи и другие фундаменты глубокого заложения.

Методы: поверхностный сейсмоакустический метод; атрибутный анализ акустических сигналов; численное моделирование процессов распространения упругих волн.

Результаты. Предложена методика сравнительной оценки контактных условий сваи с вмещающим грунтом, основанная на анализе сигналов сейсмоакустического метода с использованием динамических атрибутов нормированной площади спектра и средневзвешенной частоты. Составлено девять серий численных моделей, описывающих характеристики системы «свая–грунт». Выполнено трехмерное численное моделирование, для полученных синтетических сигналов рассчитаны атрибуты и построены атрибутные диаграммы. Сделаны выводы о влиянии изменений параметров системы «свая–грунт» на поведение динамических атрибутов отклика.

Ключевые слова:

Испытания свай, сейсмоакустический метод, акустическое излучение, акустический контакт, несущая способность, численное моделирование, неразрушающий контроль.

Введение

Повышение эффективности использования геофизических методов для изучения природно-технических систем – актуальный вопрос в области капитального строительства. Изучение взаимодействия фундаментов и вмещающих грунтов затрагивает ряд смежных вопросов: анализ несущей способности и долговечности конструкции, уточнение информа-

ции инженерно-геологических изысканий, оценка экономической рентабельности выбранной технологии производства работ и др.

Для проверки соответствия железобетонных свай характеристикам, заложенным на этапе проектирования, проводят комплекс полевых испытаний. Сплошность бетона и длина свай определяются с применением косвенных геофизических методов [1], а их не-

сущая способность – в результате проведения более дорогостоящих и трудоемких прямых методов испытаний свай статической или динамической нагрузкой.

В соответствии с требованиями п. 4.4 ГОСТ 5686-2012 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями» места проведения статических испытаний должны быть наиболее характерными для площадки проектируемого свайного фундамента и одна из испытуемых свай должна находиться в месте с предположительно наихудшими грунтовыми условиями.

На практике сведения об инженерно-геологических условиях строительной площадки не всегда являются достаточно подробными и достоверными. Кроме того, данный пункт ГОСТ не учитывает возможные отклонения свойств материала и геометрических характеристик изготовленных свай от установленных проектом. Проблемы, вызванные нарушениями контакта свай с вмещающими грунтами, часто невозможно обнаружить вплоть до ввода сооружения в эксплуатацию. Методы контроля за изготовлением конструкции *in situ* (инклинометрия скважин, лабораторные испытания бетона, надзор за бурением и бетонированием и т. п.) не позволяют упредить возникновение дефектов и снижение адгезии между железобетонным монолитом и грунтом [2].

Большой интерес представляет разработка методики, позволяющей выполнять экспресс-оценку контактных условий и выделять в фундаменте сваи с потенциально сниженной несущей способностью для последующего их испытания прямыми методами.

Поверхностный сейсмоакустический метод контроля качества свай

Контроль сплошности свай поверхностным сейсмоакустическим методом (low strain impact method, sonic) основан на изучении распространения в теле сваи упругих волн, возбужденных в результате удара молотком по поверхности оголовка. Испытания проводятся оперативно и отличаются небольшим объемом подготовительных работ. Метод позволяет оценить длину конструкции и наличие в ее теле значительных дефектов [3].

В 70-х гг. ХХ в. была предложена модификация сейсмоакустического метода, получившая название метода переходной характеристики/метода устойчивой частотной характеристики (transient response method/steady-state frequency response method) [4, 5]. Методика основана на изучении резонансных явлений, возникающих при возбуждении в свае упругих волн (с использованием вибрационного источника или молотка с регистрирующим силовую характеристику удара тензодатчиком) путем анализа зарегистрированных сигналов в частотной области. Поведение получаемой частотной характеристики, т. н. кривой мобильности/спектра мобильности (mobility spectrum), определяется как параметрами сваи, так и характером ее контакта с вмещающим грунтом [6].

При этом опыт применения метода с целью получения информации о контакте сваи с грунтом выявил значительные ограничения области его применения. Чем больше параметры системы «свая–грунт» отли-

чаются от модели «тонкого стержня в однородном полупространстве» (лежащей в основе классической теории сейсмоакустического контроля свай), тем больше возрастает неоднозначность интерпретации данных метода [7].

Предложенная в работе [8] методика оценки контактных условий предлагает рассмотреть распространение акустического сигнала в системе «свая–грунт» с точки зрения поглощения энергии колебаний, количественно характеризуемого набором динамических атрибутов.

Связь контактных условий системы «свая–грунт» и параметров акустического сигнала

Возможность реализации контроля качества свай поверхностным сейсмоакустическим методом обусловлена повышенной акустической жесткостью материала сваи относительно вмещающего грунта – свая является волноводом, по которому распространяется большая часть энергии возбужденных упругих волн. При этом потери энергии сигнала, связанные с излучением колебаний в грунт, зависят как от конtrаста акустических жесткостей сваи и грунта, так и от свойств контакта между ними [8].

Определим отклик системы «свая–грунт» на ударное воздействие как акустический сигнал $V(t)$, регистрируемый сейсмоприемником в течение временного интервала ΔT : $(0, t_k)$. Его спектр Фурье $S(j\omega)$ может быть представлен в виде:

$$S(j\omega) = A_{\max} \cdot S_0(j\omega), \quad (1)$$

где A_{\max} – максимальная спектральная амплитуда, а $S_0(j\omega)$ – спектр, нормированный по величине его максимальной амплитуды.

Возбуждаемые молотками волны имеют малую интенсивность, поэтому поглощение энергии колебаний можно считать линейно зависящим от частоты процессом, на который оказывает пренебрежимо малое воздействие сила удара. Для исследования данных свойств акустического сигнала был проведен ряд полевых экспериментов, результаты которых подтвердили основные положения предлагаемой методики [8]. Тогда для характеристики спектра отклика (1) допустимо пренебречь его амплитудой и анализировать нормированный спектр $S_0(j\omega)$, зависящий от свойств колебательной системы и условий возбуждения/регистрации сигнала.

Значительный вклад в отклик вносит техническое состояние оголовка сваи. Массивные арматурные выпуска, шламовый бетон, микротрешины, влияние зоны аэрации на формирующийся материал, изменения сечения в верхней части сваи складываются в т. н. объемный фактор [9]: при возбуждении импульса с широким частотным диапазоном на его параметры оказывает влияние наиболее неоднородная (не считая возможных дефектов) часть конструкции.

Особенностью предложенной методики анализа динамических атрибутов акустических сигналов является анализ относительных изменений их значений и выделение аномальных показателей для свай в составе одного свайного поля.

Таким образом, область применения поверхностного сейсмоакустического метода для оценки контактных условий ограничена конструкциями, удовлетворяющими следующим требованиям:

- 1) сваи, изготовленные из бетона одного класса прочности и имеющие одинаковые геометрические параметры;
- 2) сваи, изготовленные в грунтах, сохраняющих свои свойства по латерали;
- 3) сваи, в которых не были обнаружены дефекты;
- 4) сваи с одинаковым состоянием оголовков.

В общем случае для свай, удовлетворяющих перечисленным требованиям, выполняется условие: чем

хуже контакт, тем выше энергия отклика. При хорошем контакте сваи с грунтом (рис. 1, a) в возбужденном колебании участвует большая «присоединенная масса» (в которую входит свая и объем грунта, в который излучается акустический сигнал), благодаря этому собственная частота колебательной системы «свая–грунт» снижается [10]. При нарушении контакта (рис. 1, b), когда энергия возмущения тратится на отражение и переотражение сигнала внутри исследуемой конструкции, – растет собственная частота колебаний и снижается излучение энергии во внешнюю среду.

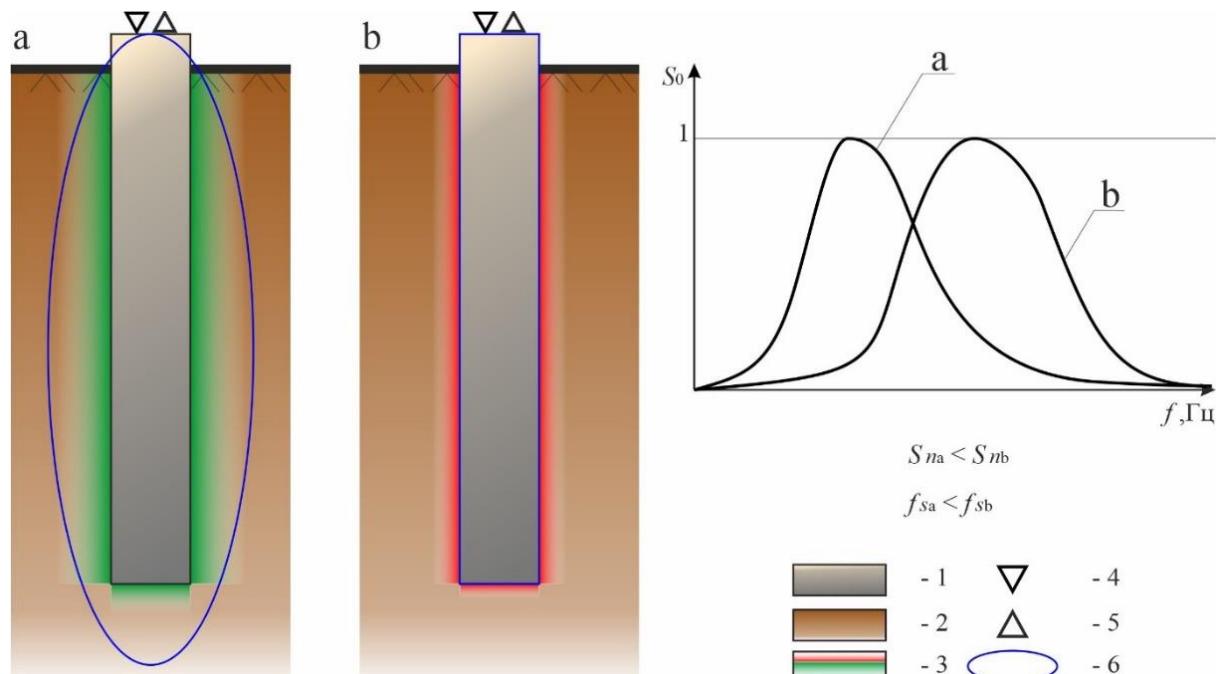


Рис. 1. Общий принцип методики: a) хороший контакт, b) плохой контакт: 1 – бетон; 2 – грунт; 3 – контакт «свая–грунт»; 4 – ударный источник; 5 – приемник; 6 – «присоединенная масса» грунта

Fig. 1. General principle of the technique: a) good contact, b) poor contact: 1 – concrete; 2 – soil; 3 – «pile–soil» contact; 4 – impact source; 5 – receiver; 6 – «attached mass» of soils

Кинетические параметры сигнала, с которыми работает стандартная методика анализа данных сейсмоакустического метода (времена регистрации характерных импульсов на зарегистрированном сигнале), используются для контроля длины и сплошности сваи. Однако они мало чувствительны к изменению физико-механических свойств системы. Динамические параметры (амплитуда и частотный диапазон) сигнала определяются множеством факторов, в которые входят упругие и поглощающие свойства среды, через которую распространяются колебания.

Поэтому для изучения поглощающих свойств системы «свая–грунт» предлагается использовать параметры, численно характеризующие интенсивность и спектральный состав $S_0(j\omega)$ – атрибуты площади нормированного спектра S_n и средневзвешенной частоты f_s , связь которых с поглощением акустического сигнала подтверждена на основе большого количества эмпирических данных [11, 12]:

$$S_n = \sum_i S_0(i) \cdot df, \quad (2)$$

$$f_s = \frac{\sum_i (S(i) f(i))}{\sum_i S(i)}, \quad (3)$$

где $df = \frac{\Delta f}{2(n-1)}$, Δf – частота дискретизации; n – количество отсчетов в спектре; $i = 1, 2 \dots n$; $S_0(i)$ – значение нормированного спектра в i -й точке; $t = 0, \dots t_k$, $f(i)$ – значение частоты в i -й точке.

Интерес для практического применения методики представляет изучение поведения атрибутов в зависимости от изменений свойств вмещающих грунтов и формы/материала сваи. Это даст представление об устойчивости предлагаемых сравнительных показателей к изменениям свойств системы «свая–грунт». Для решения данной задачи было выполнено трех-

мерное численное моделирование распространения упругих волн в сваях для набора характерных, распространенных на практике случаев.

Параметры численных моделей

В качестве объектов моделирования выбраны бетонные цилиндрические сваи диаметром 0,4 м, длиной 6,0 м. Вмещающие сваю грунты окружены идеально согласованным поглощающим слоем со слабо-отражающим условием на внешней границе.

Источник и приемник упругих волн располагались соосно свае на поверхности оголовка и представляли

собой круги диаметрами 0,4 и 0,03 м соответственно. Возбуждение сигнала задавалось гауссовым импульсом, модулированным окном Ханнига. Период импульса источника – 1 мс.

Физические свойства материалов приведены в табл. 1, подбор значений плотности и скорости распространения упругих волн осуществлялся исходя из результатов предыдущих экспериментов по численному моделированию сейсмоакустических методов [13] и справочных значений [14]. Соотношение V_s/V_p принято равным 0,2 для Грунта 1 и 0,3 для Грунта 2.

Таблица 1. Свойства материала сваи и изменение свойств вмещающих грунтов

Table 1. Properties of the pile material and changes in the properties of the enclosing soils

Характеристика Characteristics	Бетон Concrete					Шлам Sludge				
Плотность, ρ , кг/м ³ Density, kg/m ³	2300					2000				
Скорости V_p и V_s , м/с P-wave (V_p) and S-wave (V_s) velocity, m/s	4000; 2442					2800; 1350				
Грунт 1/Soil 1										
№ модели в серии Model no.	*.1	*.2	*.3	*.4	*.5	*.6	*.7	*.8	*.9	*.10
Плотность, ρ , кг/м ³ Density, kg/m ³	1500	1500	1550	1550	1600	1600	1650	1650	1700	1700
Скорости V_p и V_s , м/с P-wave (V_p) and S-wave (V_s) velocity, m/s	600; 120	720; 144	840; 168	960; 192	1080; 216	1200; 240	1320; 264	1440; 288	1560; 312	1680; 336
Грунт 2/Soil 2										
Плотность, ρ , кг/м ³ Density, kg/m ³	2200	2200	2250	2250	2300	2300	2350	2350	2400	2400
Скорости V_p и V_s , м/с P-wave (V_p) and S-wave (V_s) velocity, m/s	2700; 810	2835; 850	2970; 890	3105; 930	3240; 970	3375; 1010	3510; 1050	3645; 1090	3780; 1130	3915; 1170

С учетом международного опыта численного моделирования сейсмоакустического метода [15–17] было принято решение не учитывать затухание сигнала в материале сваи и во вмещающих грунтах, так как для поставленной задачи принципиален не характер поглощения энергии сигнала в грунте, а потери энергии на излучение из сваи в грунт, определяющиеся контрастом акустических жесткостей и контактными условиями.

Численные модели были разделены на 4 группы (рис. 2).

Группа 1. Свай без дефекта (1.1) и свая с дефектом (1.2) в однородном грунте.

Свай погружена в Грунт 1, контраст акустических жесткостей сваи и грунта плавно снижается от модели к модели (табл. 2). В качестве дефекта в серии моделей 1.2 задано сужение ствола сваи до половины площади ее поперечного сечения в пределах отметок 2–3 м (относительно верха сваи).

Группа 2. Свая, опирающаяся на плотные грунты (2.1), и свая, пересекающая слой плотных грунтов (2.2).

Модель 2.1 представляет сваю во вмещающем Грунте 1.1, нижний торец которой заглублен в залегающий ниже Грунт 2 на 0,3 м. Свойства Грунта 2 плавно меняются, его акустическая жесткость приближается к значению акустической жесткости бетона сваи (табл. 2). В модели 2.2 свая последовательно прорезает три геологических слоя: Грунт 1.1, Грунт 2 (в пределах отметок 2–4 м относительно верха сваи) и Грунт 1.1.

Группа 3. Свая с уширением (3.1) и шламовым слоем (3.2) в верхней части.

В моделях 3.1 и 3.2 свая погружена в Грунт 1. В модели 3.1 верхний метр сваи имеет диаметр 0,6 м – в 1,5 раза больше номинального диаметра. В модели 3.2 верхние 0,4 м сваи представлены не бетоном, а шламовым материалом.

Таблица 2. Отношение акустических жесткостей материала сваи и вмещающих грунтов

Table 2. Ratio of acoustic stiffness of the pile material and enclosing soils

№ модели в серии Model no. in series	*.1	*.2	*.3	*.4	*.5	*.6	*.7	*.8	*.9	*.10
$\frac{\rho_{cb} \cdot Vp_{cb}}{\rho_{rp1} \cdot Vp_{rp1}}$	10,2	8,5	7,1	6,2	5,3	4,8	4,2	3,9	3,5	3,2
$\frac{\rho_{cb} \cdot Vp_{cb}}{\rho_{rp2} \cdot Vp_{rp2}}$	1,5	1,5	1,4	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0

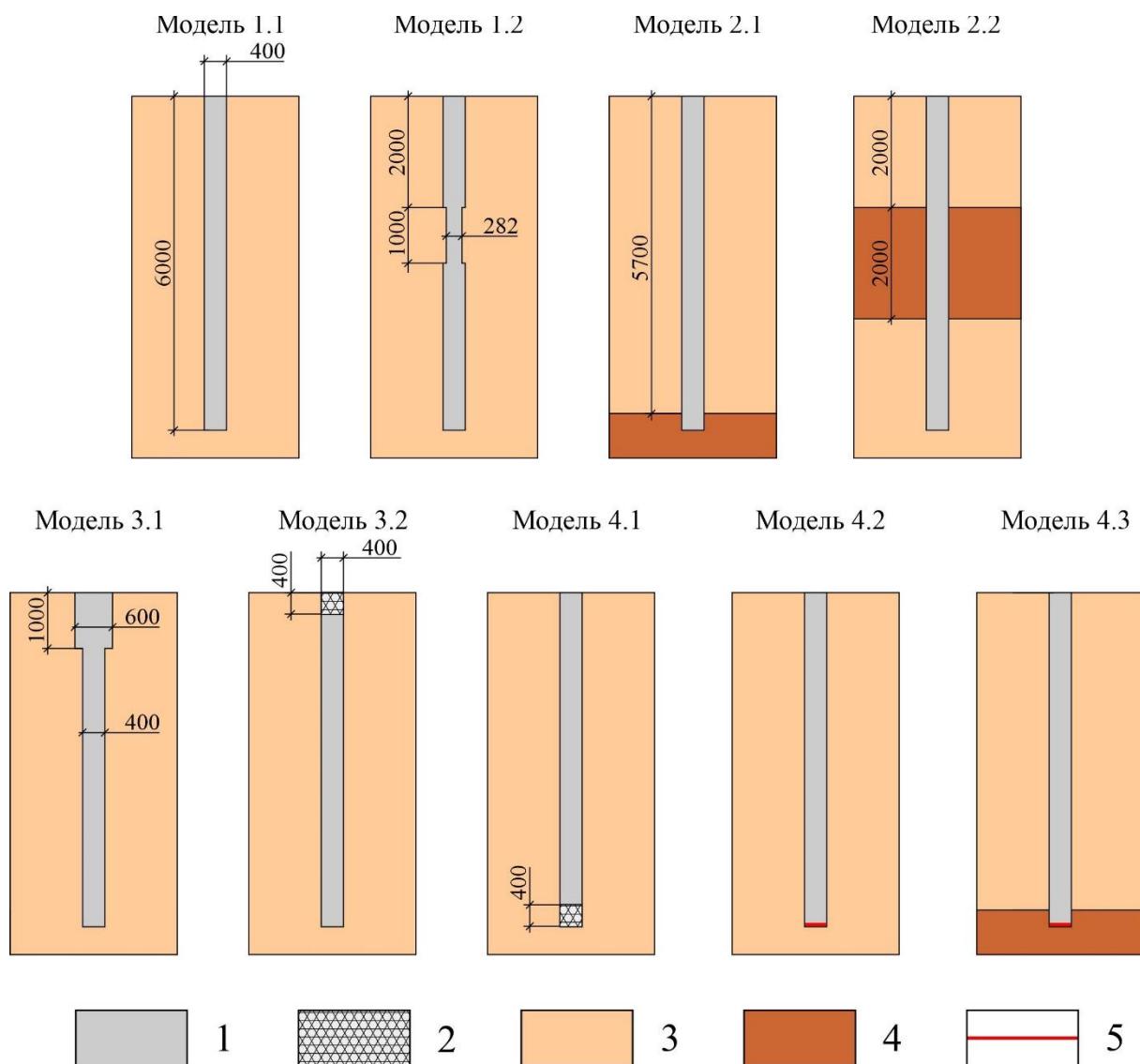


Рис. 2. Схемы моделей (размеры даны в миллиметрах): 1 – бетон; 2 – шлам; 3 – Грунт 1; 4 – Грунт 2; 5 – отражающая граница

Fig. 2. Model schemes (dimensions are given in millimeters): 1 – concrete; 2 – sludge; 3 – Soil 1; 4 – Soil 2; 5 – reflective boundary

Группа 4. Свая с дефектом у ее забоя (4.1) и свая с нарушением контакта по нижнему торцу, опирающаяся на слабый (4.2) или плотный грунт (4.3).

В сериях моделей 4.1 и 4.2 свая находится во вмещающем Грунте 1. Модель 4.1 симулирует дефект «слабого основания»/«soft bottom» [18, 19], моделируемый с помощью шламового материала у нижнего конца сваи мощностью 0,4 м. Модель 4.2 имитирует случай нарушения контакта, возникающий при «полировке» забоя скважины буровым инструментом [20]. «Полированный забой» имитируется за счет полностью отражающей границы между нижним торцом сваи и грунтом. Модель 4.3 повторяет параметры модели 2.1 с добавлением полностью отражающей границы на нижний торец сваи.

Результаты моделирования

Трехмерное численное моделирование методом конечных элементов выполнено в программном ком-

плексе COMSOL Multiphysics 5.4 (модули Structural Mechanics и Acoustics, лицензия № 9600341). Результаты представлены в виде графиков зависимости вертикальной компоненты скорости смещения частиц оголовка сваи от времени (рис. 3). Для полученных синтетических сигналов по формулам (2) и (3) рассчитаны динамические атрибуты. На рис. 4 представлены значения атрибутов в зависимости от номера модели в серии. Абсолютные значения атрибутов изменяются нелинейно с изменением акустических свойств вмещающих грунтов.

Представленные результаты позволяют наглядно проиллюстрировать положение о большей чувствительности динамических параметров к изменениям физико-механических свойств среды, нежели кинетических (табл. 3).

Изменения формы сигнала, приводящие к незначительному разбросу определяемых времен прихода целевых отраженных импульсов (от нижнего конца

сваи, дефектов сечения, геологических границ), не превышающему первых процентов, наблюдаются для моделей с обладающим высокой акустической жесткостью Грунтом 2. Для сигналов, полученных при ва-

рировании характеристик Грунта 1, заметные изменения кинематических параметров отсутствуют, в отличие от значений динамических атрибутов, относительные изменения которых достигают 20 %.

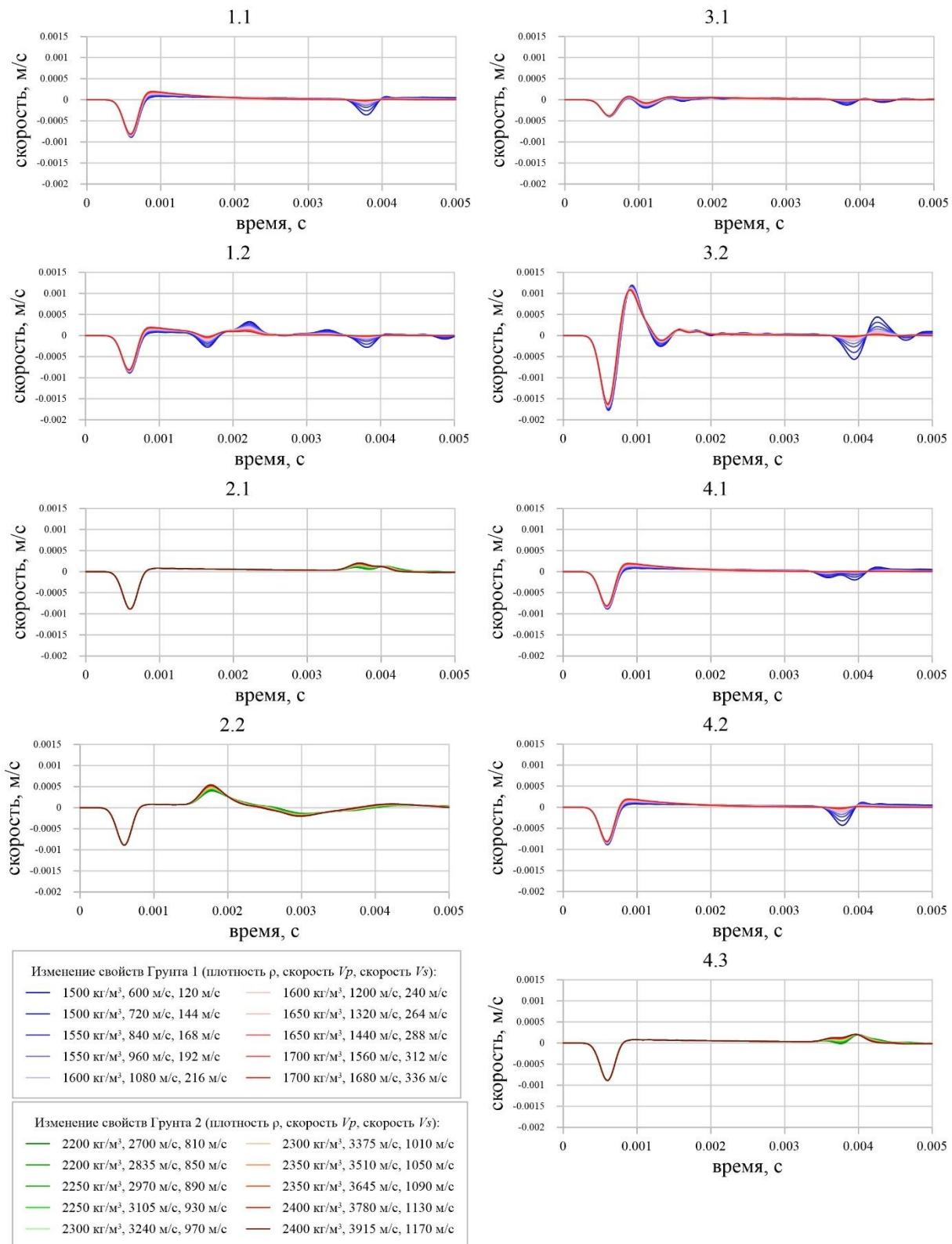


Рис. 3. Синтетические сигналы, полученные в результате моделирования

Fig. 3. Synthetic signals obtained as a result of numerical simulation

Таблица 3. Изменение кинематических и динамических параметров сигналов в зависимости от свойств вмещающих грунтов

Table 3. Kinematic and dynamic parameters of signals depending on soil properties

Серия моделей Model series	1.1			2.2		
	Параметр Parameter	Отражение от нижнего конца свай, мс Refraction from pile toe, ms	f_s , Гц Hz	Отражение от верхней границы Грунта 2, мс Refraction from Soil 2 upper boundary, ms	f_s , Гц Hz	
*.1	3,79	1355	3148	1,80	944	2548
*.2	3,79	1488	3114	1,80	942	2555
*.3	3,79	1637	2974	1,80	942	2562
*.4	3,79	1745	2875	1,79	928	2568
*.5	3,79	1866	2793	1,79	903	2575
*.6	3,78	1927	2762	1,78	886	2581
*.7	3,78	1977	2751	1,78	866	2587
*.8	3,78	2007	2776	1,78	852	2591
*.9	3,78	2037	2803	1,77	837	2598
*.10	3,78	2054	2823	1,77	826	2602
Коэффициент вариации Coefficient of variation Cv, %	0	14	5	1	5	1

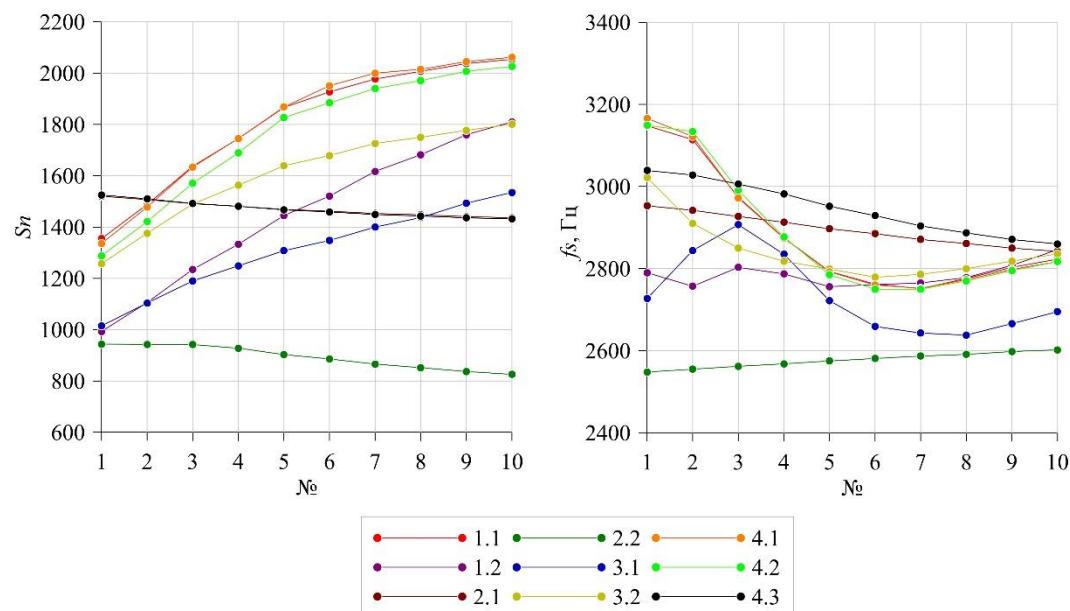


Рис. 4. Значения динамических атрибутов для наборов численных моделей
Fig. 4. Dynamic attributes for numerical model series

Обсуждение результатов моделирования

Выделим несколько групп моделей, исходя из их особенностей и наблюдаемого поведения атрибутов. Изменение отклика иллюстрируется с помощью корреляционных диаграмм (Sn ; f_s), наиболее представительных для анализа поглощения в системе «свая–грунт». Серия моделей 1.1 присутствует во всех группах для сравнения атрибутов с показателями модели, наиболее приближенной к случаю «тонкого стержня в однородном полупространстве», лежащему в основе классической теории сейсмоакустического метода.

1. Сваи с изменяющейся площадью излучающей поверхности (серии 1.1, 1.2, 3.1).

Поведение атрибутов (рис. 5, a) соответствует теоретическому представлению – нормированная площадь спектра Sn для свай с сужением и уширением сечения снижена относительно $Sn_{1.1}$ на 25–30 % для свай с уширением оголовка и на 20–25 % для свай

с сужением ствола (табл. 4). Разница в значениях средневзвешенной частоты f_s снижается по мере увеличения акустической жесткости вмещающего грунта. Для серии моделей 3.1 нормированная площадь спектра значительно снижена относительно модели 1.1 вне зависимости от значений $\rho_{\text{гр}} \cdot Vp_{\text{гр}}$.

Изменение сечения в верхней части конструкции влияет на атрибуты отклика сильнее изменения сечения, заданного на удалении от оголовка, и меньше зависит от акустических свойств вмещающего грунта.

2. Сваи, изготовленные в разрезе с плотными грунтами (серии 1.1, 2.1, 2.2).

Динамический отклик сваи, опирающейся на (модель 2.1) или пересекающей (модель 2.2) слой плотных грунтов, ведет себя принципиально иначе (рис. 5, b), чем отклик сваи, расположенной в контрастном по акустическим свойствам грунте. Акустическая жесткость Грунта 2 изменяется вплоть до совпадения с акустической жесткостью материала сваи – это соот-

вествует практическим случаям свай, опирающейся на скальные грунты (для модели 2.1), или свай, устроенной в геологическом разрезе с чередованием слоев с различными прочностными характеристиками, например в моренных отложениях (для модели 2.2).

Абсолютные значения атрибутов отклика для серий 2.1 и 2.2 меняются незначительно (табл. 5) – можно сделать вывод о том, что в случае заделки свай в плотные грунты динамические параметры сигнала устойчивы к плавным изменениям свойств данных грунтов.

3. Сваи со шламовым слоем (изменением свойств материала сваи) (серии 1.1, 3.2, 4.1).

Поведение отклика серий 1.1 и 4.1 практически не отличается – слой шлама у основания не оказал заметного влияния на абсолютные значения атрибутов (рис. 5, c). Это можно связать с тем, что основной вклад в затухание энергии даже в случае моделей се-

рии 1.1 дает излучение через боковую поверхность свай во внешнюю среду. На малый по площади поверхности нижний торец приходится незначительная часть излучения. Превышающее ожидания излучение свай через боковую поверхность может указывать на недостатки используемых параметров моделирования и требует дополнительных уточнений.

Тем не менее малое изменение свойств основания конструкции, погруженной в контрастные по акустическим свойствам грунты, не оказалось заметного влияния на поведение отклика, которое можно было бы выделить на фоне изменений свойств грунта.

Поведение атрибутов в моделях со шламовым материалом в оголовке (серия 3.2) схоже с их поведением в моделях с уширением сечения в верхней части – снижение Sn и уменьшающаяся по мере роста $\rho_{tp1} \cdot Vp_{tp1}$ разница средневзвешенных частот $f_{s3.2}$ и $f_{s1.1}$ (табл. 4).

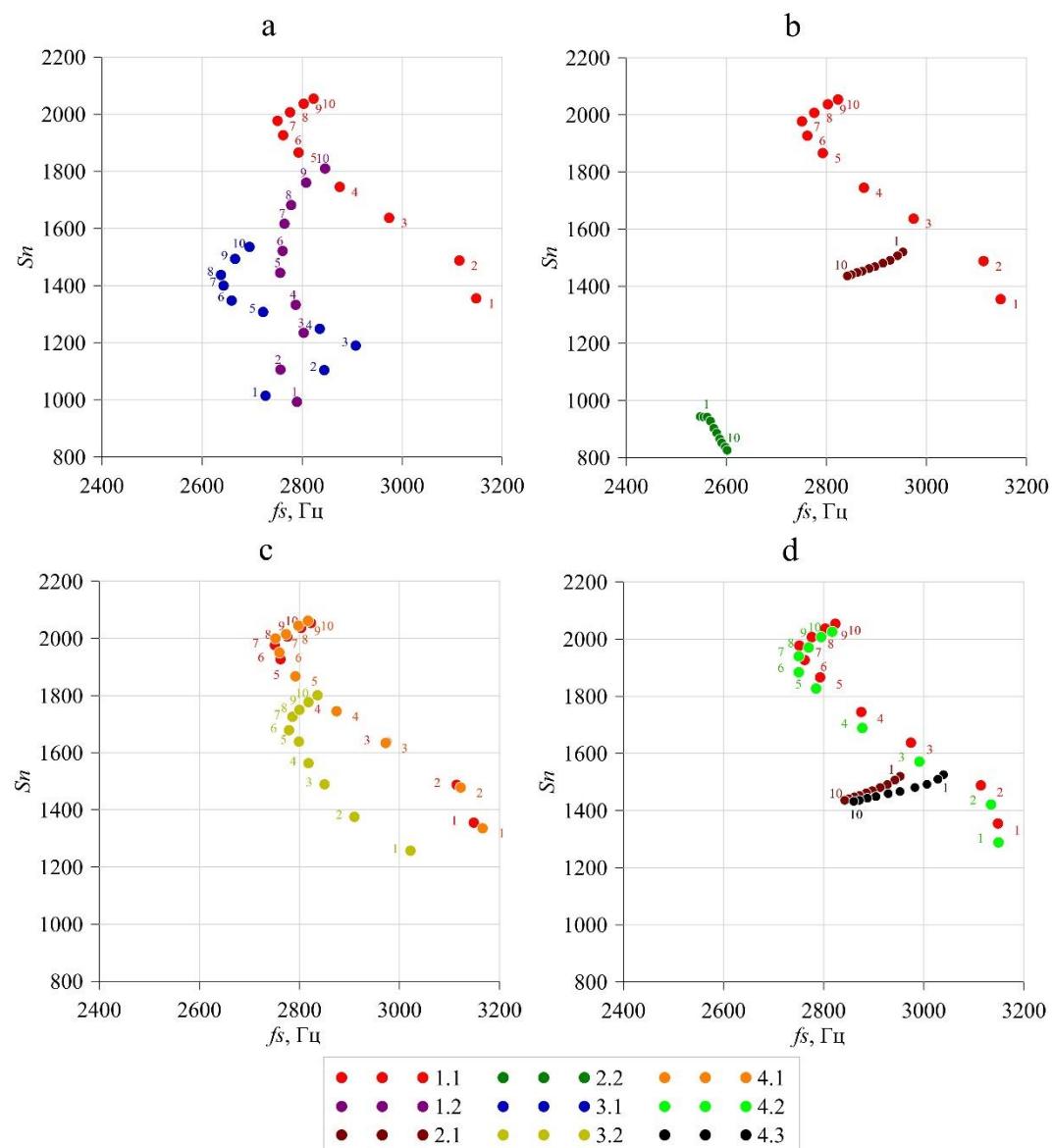


Рис. 5. Атрибутные диаграммы для серий численных моделей
Fig. 5. Attribute charts for numerical model series

Можно сделать вывод, что неоднородности в верхней части сваи, независимо от их физической природы (изменение геометрии или свойств бетона), действуют на отклик в качестве кажущегося «улучшения контакта», т. е. работают в качестве «демпфера» для ударного импульса.

4. Сваи с нарушением контакта по нижнему торцу (серии 1.1, 2.1, 4.2, 4.3).

Наличие полностью отражающей границы симулирует ухудшение контактных условий, которое может быть вызвано обводнением грунта основания или «полировкой» забоя буровым инструментом [18, 20].

Сравнение атрибутов для серий 1.1 и 4.2 (рис. 5, d) показывает, что нарушение контакта не оказало заметного влияния на поведение отклика сваи, погруженной в контрастный по акустическим свойствам грунт. Это может быть объяснено приведенными выше соображениями о полученном по данным моделирования большем влиянии излучения через боковую поверхность на значения атрибутов.

По поведению атрибутов серий 2.1 и 4.3 можно сделать вывод, что при заделке основания сваи в «скальные» грунты дефект контакта по торцу более выражен, чем при заделке в «рыхлые» грунты. При практически неизменной Sn значения fs заметно от-

личаются (разница снижается по мере увеличения акустической жесткости Грунта 2), в сравнении с более стабильным поведением атрибутов для серий моделей 2.1 и 2.2.

При заделке сваи в плотные грунты плохой контакт основания влияет на поведение атрибута средневзвешенной частоты сильнее малых изменений свойств грунта, однако это различие выражено в случаях, когда грунт основания имеет меньшую акустическую жесткость в сравнении с бетоном сваи.

Таблица 4. Соотношение атрибутов серий 1.2, 3.1, 3.2 с серией 1.1

Table 4. Ratio of attributes of series 1.2, 3.1, 3.2 with series 1.1

№	$Sn_{1.2}/Sn_{1.1}$	$fs_{1.2}/fs_{1.1}$	$Sn_{3.1}/Sn_{1.1}$	$fs_{3.1}/fs_{1.1}$	$Sn_{3.2}/Sn_{1.1}$	$fs_{3.2}/fs_{1.1}$
*.1	0,73	0,89	0,75	0,87	0,93	0,96
*.2	0,74	0,89	0,74	0,91	0,92	0,93
*.3	0,75	0,94	0,73	0,98	0,91	0,96
*.4	0,76	0,97	0,72	0,99	0,90	0,98
*.5	0,77	0,99	0,70	0,97	0,88	1,00
*.6	0,79	1,00	0,70	0,96	0,87	1,01
*.7	0,82	1,01	0,71	0,96	0,87	1,01
*.8	0,84	1,00	0,72	0,95	0,87	1,01
*.9	0,86	1,00	0,73	0,95	0,87	1,01
*.10	0,88	1,01	0,75	0,95	0,88	1,00

Таблица 5. Коеффициенты вариации Cv атрибутов Sn и fs, %

Table 5. Coefficients of variation Cv of attributes Sn and fs, %

Серия Series	1.1		1.2		2.1		2.2		3.1		3.2		4.1		4.2		4.3	
Атрибут Attribute	Sn	fs																
Cv	14	5	19	1	2	1	5	1	13	3	11	3	14	5	15	5	2	2

Выводы

Результаты выполненного моделирования можно обобщить в нескольких наблюдениях:

1. Наглядно показана чувствительность динамических параметров акустического сигнала к изменению физико-механических свойств изучаемой колебательной системы (акустических свойств вмещающих грунтов и контактных условий). При этом кинематические параметры сигнала не изменяются или изменяются очень слабо.
2. Излучение через боковую поверхность и, следовательно, контактные условия по боковой поверхности влияют на поведение атрибутов отклика сильнее, чем излучение через нижний торец сваи.
3. Неоднородности в верхней части сваи так же, как и сужение ее поперечного сечения, приводят к изменению атрибутов отклика, интерпретируемому в качестве кажущегося улучшения контактных условий, вне зависимости от характера неоднородности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О техническом регулировании неразрушающего контроля сплошности свай / А.А. Мухин, В.В. Капустин, А.А. Чуркин, И.Н. Лозовский // Геотехника. – 2019. – Т. 11. № 2. – С. 80–89.
2. Мангушев Р.А., Пономарев А.Б. К вопросу контроля качества изготовления и приемки бурованабивных свай // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 3. – С. 88–111.
3. Возможности сейсмоакустических и ультразвуковых методов при контроле качества свайных фундаментов / В.В. Капустин, А.А. Чуркин, И.Н. Лозовский, А.В. Кувалдин // Геотехника. – 2018. – Т. 10. – № 5–6. – С. 62–71.

4. При наличии в геологическом разрезе слоя плотных грунтов динамические параметры сигнала становятся устойчивыми к плавным изменениям акустических свойств вмещающих грунтов.
5. В случае опирания сваи на слой плотных грунтов атрибут средневзвешенной частоты более чувствителен к нарушению контактных условий, чем атрибут нормированной площади спектра.

Дальнейшее усложнение моделей (частичное или полное нарушение контактных условий по боковой поверхности и т. п.) позволит продолжить изучение зависимости динамических параметров сигнала от характеристик системы «свая–грунт».

Полученные по результатам моделирования выводы удовлетворяют общим теоретическим представлениям о распространении акустических волн в сваях и ограничениях предлагаемой методики, но нуждаются в проверке результатами полевых испытаний, сопровождающихся использованием прямых методов контроля.

скогого национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 3. – С. 88–111.

4. Davis A.G., Dunn C.S. From theory to field experience with the non-destructive vibration testing of piles // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. – 1974. – V. 57. – P. 571–593.
5. Chan H.F.C. Non-destructive testing of concrete piles using the sonic echo and transient shock methods: a thesis for the Degree of Doctor of Philosophy. – Edinburgh, 1987. – 282 p. URL: https://www.era.lib.ed.ac.uk/bitstream/handle/1842/13349/Chan1987_001.Pdf (дата обращения 18.08.2020).
6. Jianlei L., Meng M. Analysis of the dynamic stiffness and bearing capacity for pile foundations // Vibroengineering PROCEDIA. – 2015. – V. 5. – P. 134–139.
7. Liang L., Beim J. Effect of soil resistance on the low strain mobility response of piles using impulse transient response method // Proc. of the 8th International Conference on Application of Stress Wave Theory to Piling. – Lisbon, 2008. – P. 435–441. URL: <http://www.pile.com/wp-content/uploads/2017/03/CH-7-066-001.pdf> (дата обращения 18.08.2020).
8. Капустин В.В., Чуркин А.А. Применение динамических атрибутов акустического сигнала для оценки контакта свай с вмещающими грунтами // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2020. – № 3. – С. 126–137.
9. Капустин В.В., Кувалдин А.В. Применение комплекса геофизических методов при исследовании фундаментных плит // Технологии сейсморазведки. – 2015. – № 1. – С. 99–105.
10. Хохлов В.К., Кандидатов И.А. Исследование влияния свойств грунта на характеристики сейсмических сигналов // Вестник МГТУ им. Баумана, сер. «Машиностроение». – 2013. – № 1. – С. 23–37.
11. Заалишвили В.Б. Физические основы сейсмического микрорайонирования. – М.: Изд-во ОИФЗ РАН, 2000. – 367 с.
12. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. – М.: Изд-во «Наука», 2009. – 350 с.
13. Чуркин А.А., Лозовский И.Н., Жостков Р.А. Численное моделирование сейсмоакустических методов контроля качества свай // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2020. – Т. 84. – № 1. – С. 124–127.
14. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика / под ред. Н.Б. Дортман. – М.: Изд-во «Недра», 1984. – 455 с.
15. Pasqual R.P.S., Kormann A.C.M. Low strain integrity tests in piles – 1-D and 3-D numerical modeling and comparisons with results obtained in the field // Multi-Science Journal. – 2019. – V. 2. – P. 1–8.
16. The research of multi-defective piles for low strain testing and numerical simulation / H. Shi-Wei, H. Shi-Jian, G. Shao-Po, Y.Q. Zeng // The 2016 Structures Congress. – Korea, 2016. – P. 1–8. URL: http://www.i-asem.org/publication_conf_structures16/8.ASMM16/T3G.2.SM572_0796F1.pdf (дата обращения 18.08.2020).
17. Wang Z., Chen L., Xiao Z. Quantitative analysis of low-strain characteristics on defective piles with constriction or segregation // The Open Civil Engineering Journal. – 2015. – № 9. – P. 1–6. URL: <https://benthamopen.com/contents/pdf/TOCIEJ/TOCIEJ-9-1.pdf> (дата обращения 18.08.2020).
18. Piling engineering. 3rd ed. / K. Fleming, A. Weltman, M. Randolph, K. Elson. – UK: CRC Press, 2008. – 408 p.
19. Tomlinson M.J., Woodward J. Pile design and construction practice. 5th ed. – UK: CRC Press, 2007. – 566 p.
20. Богов С.Г. Проблемы устройства свайных оснований в городской застройке в условиях слабых грунтов Санкт-Петербурга // Интернет-журнал «Развитие городов и геотехническое строительство». – 2004. – № 8. – С. 119–128.

Поступила 29.09.2020 г.

Информация об авторах

Чуркин А.А., руководитель отдела геофизики, ООО «ЭГЕОС».

Капустин В.В., кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Лозовский И.Н., научный сотрудник лаборатории магнитотеллурических исследований Центра геоэлектромагнитных исследований, филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

Жостков Р.А., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории фундаментальных проблем экологической геофизики и вулканологии Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

UDC 620.171.2:620.179.18:624.154.1:550.8.052

STUDY OF INFLUENCE OF «PILE–SOIL» SYSTEM PARAMETERS ON THE ACOUSTIC SIGNAL DYNAMIC ATTRIBUTES USING NUMERICAL MODELLING

Aleksei A. Churkin¹,
chaa92@mail.ru

Vladimir V. Kapustin²,
1391854@mail.ru

Ilya N. Lozovsky³,
i.n.lozovsky@yandex.ru

Ruslan A. Zhostkov⁴,
shageraxcom@yandex.ru

¹ AIGEOS LLC,
8, bld. 3, Mikluho-Maklay street, Moscow, 117198, Russia.

² Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia.

³ Geoelectromagnetic Research Center, branch of the Schmidt Institute of Physics
of the Earth of the Russian Academy of Sciences,
P.O.B. 30, Moscow, Troitsk, Russia.

⁴ Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,
10, bld. 1, Bolshaya Gruzinskaya street, Moscow, 123242, Russia.

The relevance of the research is caused by the necessity to improve the efficiency of using non-destructive pile testing methods. The directions of research in this area are to determine the capabilities and limitations of standard approaches and to propose the new methods that allow obtaining new information about the structures. The robust estimation of pile integrity and bearing capacity obtained at the stage of quality control of the structures prior to their commissioning minimizes the subsequent risks of capital expenditures for eliminating emergency consequences. Common geophysical quality testing methods are designed to study the material of structures. The modification of the low strain impact method described in the publication suggests using additional information extracted from acoustic signals for a comparative assessment of the contact conditions of piles. This allows meeting the requirements of GOST 5686-2012 «Soils. Methods of field testing by piles» on the conducting static load tests, increasing the predictive efficiency of the complex of field tests in capital construction.

The main aim of the research is to study the general patterns in the behavior of the sonic signal dynamic attributes associated with the features of the «pile–soil» system.

Objects of the research are reinforced concrete piles and other deep foundations.

Methods: low strain impact method; attributes analysis of acoustic signal, numerical modelling of elastic waves propagation.

Results. The authors have proposed the technique for comparative assessment of contact conditions, based on the analysis of a low strain impact method signals using the dynamic attributes of the normalized spectrum square and the average-weighted frequency. Nine series of numerical models were compiled describing common «pile–soil» systems. A three-dimensional numerical simulation was performed, attributes were calculated for the obtained synthetic signals and attribute diagrams were constructed. Conclusions are drawn about the influence of changes in the parameters of the «pile–soil» system on the behavior of dynamic response attributes.

Key words:

Pile testing, low strain impact method, acoustic emission, acoustic contact, bearing capacity, numerical simulation, non-destructive testing.

REFERENCES

1. Mukhin A.A., Kapustin V.V., Churkin A.A., Lozovsky I.N. Technical regulation of pile integrity testing. *Geotechnics*, 2019, vol. XI, no. 2, pp. 80–89. In Rus.
2. Mangushev R.A., Ponomarev A.B. For quality control issues manufacturing and acceptance of bored cast-in-place piles. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitelstvo i arhitektura*, 2014, no. 3, pp. 88–111. In Rus.
3. Kapustin V.V., Churkin A.A., Lozovsky I.N., Kuvaldin A.V. Capabilities of seismoacoustic and ultrasonic methods for quality control of pile foundations. *Geotechnics*, 2018, vol. X, no. 5–6, pp. 62–71. In Rus.
4. Davis A.G., Dunn C.S. From theory to field experience with the non-destructive vibration testing of piles. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1974, vol. 57, pp. 571–593.
5. Chan H.F.C. *Non-destructive testing of concrete piles using the sonic echo and transient shock methods*. A thesis for the Degree of Doctor of Philosophy. Edinburgh, 1987. 282 p. Available at: https://www.era.lib.ed.ac.uk/bitstream/handle/1842/13349/Chan1987_001.Pdf (accessed 18 August 2020).
6. Jianlei L., Meng M. Analysis of the dynamic stiffness and bearing capacity for pile foundations. *Vibroengineering PROcedia*, 2015, vol. 5, pp. 134–139.
7. Liang L., Beim J. Effect of soil resistance on the low strain mobility response of piles using impulse transient response method. *Proc. of the 8th International Conference on Application of Stress Wave Theory to Piling*. Lisbon, 2008. pp. 435–441. Available at:

- http://www.pile.com/wp-content/uploads/2017/03/CH-7-066-001.pdf (accessed 18 August 2020).
8. Kapustin V.V., Churkin A.A. Primenenie dinamicheskikh atributov akusticheskogo signala dlya otsenki kontakta svai s vmeschayushchimi gruntami [Applying dynamic acoustic signal attributes for evaluation of contact between pile and soils]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya*, 2020, no. 3, pp. 126–137.
 9. Kapustin V.V., Kuvaldin A.V. Integrated geophysical approach for testing ground slabs. *Tekhnologii seismorazvedki*, 2015, no. 1, pp. 99–105. In Rus.
 10. Khokhlov V.K., Kandidatov I.A. Studying the influence of soil properties on seismic signal characteristics. *Vestnik MGTU im. Baumana, ser. «Mashinostroenie»*, 2013, no. 1, pp. 23–37. In Rus.
 11. Zaalishvili V.B. *Fizicheskie osnovy seysmicheskogo mikrorayonirovaniya* [Physical foundations of seismic microzoning]. Moscow, OIFZ RAN Publ., 2000. 367 p.
 12. Zaalishvili V.B. *Seysmicheskoe mikrorayonirovaniye territoriy gorodov, naselennykh punktov i bolshikh stroitelnykh ploshchadok* [Seismic microzoning of cities, settlements and large construction sites]. Moscow, Nauka Publ., 2009. 350 p.
 13. Churkin A.A., Lozovsky I.N., Zhostkov R.A. Chislennoe modelirovaniye seysmoakusticheskikh metodov kontrolya kachestva svay [A numerical modelling of seismoacoustic pile integrity testing methods]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya fizicheskaya*, 2020, vol. 84, no. 1, pp. 124–127.
 14. *Fizicheskie svoystva gornykh porod i poleznykh iskopаемых (petrofizika). Spravochnik geofizika* [Physical properties of rocks (petrofizika)]. Spravochnik geofizika
 - and minerals (petrophysics). *Geophysics Handbook*. Ed. by N.B. Dortman. Moscow, Nedra Publ., 1984. 455 p.
 15. Pasqual R.P.S., Kormann A.C.M. Low strain integrity tests in piles – 1-D and 3-D numerical modeling and comparisons with results obtained in the field. *Multi-Science Journal*, 2019, vol. 2, pp. 1–8.
 16. Shi-Wei H., Shi-Jian H., Shao-Po G., Zeng Y.Q. The research of multi-defective piles for low strain testing and numerical simulation. *Proc. of the 2016 Structures Congress*. Korea, 2016. pp. 1–8. Available at: http://www.i-asem.org/publication_conf/structures16_8.ASMM16/T3G.2.SM572_0796F1.pdf (accessed 18 August 2020).
 17. Wang Z., Chen L., Xiao Z. Quantitative analysis of low-strain characteristics on defective piles with constriction or segregation. *The Open Civil Engineering Journal*, 2015, no. 9, pp. 1–6. Available at: <https://benthamopen.com/contents/pdf/TOCIEJ/TOCIEJ-9-1.pdf> (accessed 18 August 2020).
 18. Fleming K., Weltman A., Randolph M., Elson K. *Piling engineering*. 3rd ed. UK, CRC Press, 2008. 408 p.
 19. Tomlinson M.J., Woodward J. *Pile design and construction practice*. 5th ed. UK, CRC Press, 2007. 566 p.
 20. Bogov S.G. Problemy ustroystva svaynykh osnovaniy v gorodskoy zastroyke v usloviyakh slabykh gruntov Sankt-Peterburga [Problems of the construction of pile foundations in urban development in conditions of soft soils of St. Petersburg]. *Internet-zhurnal «Razvitiye gorodov i geotekhnicheskoe stroitelstvo»*, 2004, no. 8, pp. 119–128.

Received: 29 September 2020.

Information about the authors

Aleksei A. Churkin, head of the Geophysical Department, AIGEOS LLC.

Vladimir V. Kapustin, Cand. Sc., junior researcher, Lomonosov Moscow State University.

Ilya N. Lozovsky, researcher, Geoelectromagnetic Research Center, branch of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences.

Ruslan A. Zhostkov, Cand. Sc., senior researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences.

УДК 550.424.6:550.461

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМ МИГРАЦИИ МЕТАЛЛОВ В РЕКАХ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ВЛИЯНИЮ ШАХТНЫХ ВОД КИЗЕЛОВСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА

Фетисова Наталья Фотеевна,
fetisova.n.f@gmail.com

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук –
филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук,
Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а.

Актуальность. Техногенному воздействию кислых шахтных вод подвержены поверхностные водотоки бассейна р. Чусовая – крупнейшего притока р. Кама на территории Пермского края (Россия). Изучение поведения металлов в реках-приемниках шахтных вод обусловлено необходимостью понимания особенностей миграции компонентов в природно-техногенных водах; определения геохимических процессов и механизмов, способствующих выведению токсичных элементов из растворов; и прогнозной оценки вторичного загрязнения за счет растворения образованных соединений при смене физико-химических условий. Результаты, полученные на исследуемом участке, могут отражать особенности геохимического поведения металлов в других загрязненных реках территории Кизеловского угольного бассейна при поступлении в них шахтного дренажа схожего состава.

Цель: исследовать формы миграции металлов в водотоках, загрязненных шахтными водами, определить основные вторичные минеральные фазы, способствующие выведению токсичных элементов из раствора, и оценить устойчивость частиц образованных минералов при миграции в речной сети.

Объекты: кислотный дренаж из штолни шахты «Таежная» Гремячинского месторождения Кизеловского угольного бассейна, содержащий высокие концентрации сульфатов и тяжелых металлов, и загрязненные шахтными водами реки: Большая Гремячая, Южная Вильва, Усьва и Чусовая.

Методы. Физико-химическое моделирование химических форм нахождения металлов в растворе и расчеты степени насыщения выполнялись при помощи программного кода PHREEQC с базой термодинамических данных WATEQ4f.

Результаты исследования показали, что в шахтных водах и загрязненных речных водах с pH 2,9–3,4 металлы (Al, Fe, Mn, Zn, Ni, Pb, Cd, Li) находятся как в форме свободных ионов, так и в виде сульфатных комплексов. В реке Юж. Вильва, ниже участка смешения с загрязненными водами р. Большой Гремячей и далее по потоку, Fe и Al образуют исключительно гидроксокомплексы. Преобладающей формой миграции Ni и Pb являются карбонатные комплексы. Нахождение металлов Li, Cd, Mn и Zn в реках Юж. Вильва, Усьва и Чусовая преимущественно в виде свободных ионов позволяет предположить, что основным механизмом их осаждения является сорбция на гидроксидах и оксигидроксидах Fe и Al, а также на глинистых минералах. Отрицательные индексы насыщения по отношению к сульфатным минералам, характерным для шахтных вод, показали неустойчивость этих минеральных фаз в нейтральных и слабощелочных водах.

Ключевые слова:

Кислотный дренаж, физико-химическое моделирование, PHREEQC, формы нахождения металлов, комплексные ионы, индекс насыщения.

Введение

Кислотный дренаж заброшенных угольных шахт является серьезной экологической проблемой, которая, прежде всего, связана с ухудшением качества поверхностных вод, принимающих рудничные стоки [1–4]. Дренаж угольных шахт, как правило, характеризуется повышенными концентрациями сульфатов, растворенных металлов и металлоидов. Формы нахождения металлов (металлоидов) в кислых шахтных водах контролируются физико-химическими условиями и химическими взаимодействиями между металлами (металлоидами) и комплексообразующими лигандами [5]. Основным анионом кислых шахтных вод, который может образовывать комплексы с Fe и Al и выпадать в осадок, является сульфат-ион [5, 6]. Поступление кислотного дренажа в поверхностные водотоки приводит к разбавлению и нейтрализации кислоты и образованию коллоидных осадков Fe и Al [7–10]. Образовавшиеся осадки имеют низкую кристалличность, очень маленький размер частиц (от нано- до микрокристаллических) и высокую удельную площадь поверхности, что способствует эффективной сорбции металлов этими минералами [7, 8, 10]. Коллоидные

минералы Fe и Al с сорбированными металлами (металлоидами) могут осаждаться в руслах рек или транспортироваться на большие расстояния [9, 11]. Изменения физико-химических параметров, таких как Eh, pH, могут приводить к растворению минеральных фаз, высвобождению элементов и их рассеиванию в водной среде [9]. С точки зрения токсичности форма нахождения элементов в растворе имеет не менее важное значение, чем их общая концентрация. Некоторые тяжелые металлы более токсичны в виде свободных ионов (при тех же концентрациях), чем в виде комплексов [12].

Мониторинг состояния поверхностных водотоков, испытывающих загрязняющее воздействие шахтных вод, не дает полного представления о геохимических процессах, происходящих при взаимодействии кислотного дренажа с нейтральными речными водами, и не показывает формы миграции токсичных элементов в потоке. Изучение химических форм нахождения металлов в растворах можно проводить с помощью лабораторных исследований и экспериментов [13]. Например, тип комплексообразования металлов может быть изучен с помощью инфракрасной спектро-

скопии, а сорбция металлов на сульфатах – с помощью электронной микроскопии [5]. Интерпретация результатов развернутого химического анализа природных и техногенных вод может быть выполнена методами физико-химического моделирования с использованием специализированных компьютерных программ [1, 5, 12–14].

Основная цель настоящего исследования заключалась в оценке поведения металлов (Al, Fe, Li, Mn, Ni, Zn, Cd и Pb) в кислых шахтных водах и поверхностных водотоках, подверженных влиянию кислотного дренажа. Физико-химическое моделирование было применено для определения химических форм нахождения элементов в растворах, а также для расчета индекса насыщения к наиболее характерным минеральным фазам в зависимости от величины pH, Eh, температуры и химического состава воды.

Характеристика района исследования

Кизеловский угольный бассейн, расположенный в восточной части Пермского края, объединяет ряд месторождений каменного угля. Бассейн вытянут вдоль западного склона Урала узкой полосой шириной 5–20 км и длиной до 150 км [15]. В тектоническом отношении бассейн расположен в пределах Западно-Уральской зоны складчатости, прилегающей к Предуральскому краевому прогибу [16]. Разработка угля велась здесь более 200 лет, с 1796 г., преимущественно подземным способом. В период с 1993 по 2000 гг. все угледобывающие предприятия бассейна были ликвидированы. Закрытие шахт повлекло их затопление подземными водами, которые ранее откачивались на поверхность водоотливными установками [16, 17]. Разгружающиеся из горных выработок кислые (pH 2–3) сульфатные воды, с высоким содержанием металлов, беспрепятственно поступают в поверхностные водоемы.

В качестве объектов исследования в данной работе были рассмотрены кислые воды из штолни шахты «Таежная», расположенной в Гремячинском районе Пермского края, и реки-приемники шахтных вод, относящиеся к бассейну р. Чусовая. Излив шахтных вод из северной штолни шахты «Таежная» на дневную поверхность произошел в 1999 г. По своим химическим показателям он относится к числу наиболее загрязненных изливов, существующих на территории Кизеловского угольного бассейна. Кроме того, излив шахты «Таежная» отличается значительными расходами: от 168 до 886 м³/ч, что в среднем составляет около 85 % объема всех изливов, расположенных на водосборе р. Чусовой [16]. Минута небольшой водоем, образовавшийся в месте выхода шахтной воды, кислые стоки переливаются в р. Большая Гремячая, около русла которой также расположено несколько породных отвалов, стоки с которых отличаются высоким содержанием загрязняющих веществ и кислой реакцией среды [16, 18]. Загрязненные воды р. Большой Гремячей поступают в более крупный водоток – р. Южная Вильва, которая в тридцати километрах ниже по течению впадает в р. Усьва, являющуюся правым притоком р. Чусовая (рис. 1).

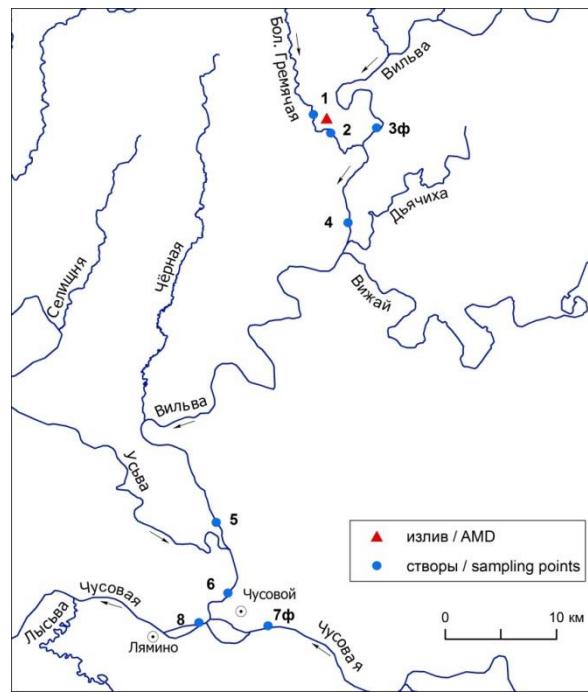


Рис. 1. Схема расположения точек отбора проб (по данным [18])

Fig. 1. Location of the sampling points (adopted from [18])

Фактический материал и методы исследования

Определение форм миграции компонентов и расчеты индексов насыщения минералов выполнялись с помощью программного кода PHREEQC (версия 3) [19] с базой данных WATEQ4f [20]. Определение форм нахождения металлов и индекса насыщения включает последовательность действий, описанных в работах [21, 22]. Индекс насыщения (saturation index – SI) представляет собой десятичный логарифм отношения произведения активностей ионов (ion activity product – IAP) к константе растворимости (K_{sp}) соединения или минерала при заданной температуре:

$$SI = \log(IAP / K_{sp}).$$

Индекс насыщения характеризует недосыщенность или пересыщенность раствора по отношению к твердой фазе, другими словами, указывает на потенциальную возможность растворения (при $SI < 0$) или осаждения (при $SI > 0$) минерала. Нулевое значение индекса насыщения говорит о том, что раствор находится в равновесии с минералом.

В качестве исходных данных для моделирования использовались результаты анализов проб шахтных и речных вод, отобранных в 2016–2018 гг. в ходе гидрохимического мониторинга Кизеловского угольного бассейна (табл. 1) [18]. Расположение точек отбора проб (створов) показано на схеме (рис. 1). В рассматриваемый период (2016–2018 гг.) мониторинг качества подземных, поверхностных и изливающихся шахтных вод на рассматриваемой территории осуществлялся ООО «Пермэнергоаудит». Состояние вод оценивалось по следующим показателям: HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, микроэлементы, pH, жесткость, сухой остаток. Изме-

рения массовых концентраций хлорид-ионов, сульфат-ионов, нитрит-ионов и нитрат-ионов выполнялось по методике ПНД Ф 14.1:2:4.157 с применением системы капиллярного электрофореза «Капель-104-Т» (Россия). Определение массовых концентраций катионов калия, натрия, магния, кальция, аммония выполнялось методом капиллярного электрофореза по методике ПНД Ф 14.1:2:4.167-2000 с применением системы электрофореза «Капель-104-Т». Гидрокарбонат-ионы определялись титрометрическим методом в соответствии с методикой, описанной в ГОСТ Р 31957, метод А.1. Железо определялось в соответствии с ГОСТ 4011-72 при помощи спектрофотометра «UNICO» (США). Микроэлементный состав определялся с применением масс-спектрометра высокого разрешения с индуктивно-связанной плазмой АВРО-РА (Россия) в соответствии с НСАМ-480-Х. Величину pH определяли в лаборатории с помощью анализатора воды «Эксперт-001» (Россия) в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:3:4.121. Сухой остаток определялся в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:4.261.

Помимо химического состава, начальные условия моделирования включают ввод значений pH, Eh и температуры воды. Замеры окислительно-восстановительного потенциала (Eh) при отборе проб не выполнялись. В процессе моделирования данный показатель рассчитывался автоматически с учетом коэффициентов активностей ионных пар $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$. При отсутствии сведений о температуре воды использовались данные мониторинга температурного режима рек территории исследований. Результаты моделирования форм нахождения металлов в шахтном дренаже и водотоках, принимающих шахтные стоки, показаны на рис. 5. Рассчитанные индексы насыщения характерных вторичных минералов приведены в табл. 2.

Результаты и их обсуждение

Гидрохимическая характеристика изучаемых вод

Воды р. Бол. Гремячая выше по течению от места разгрузки вод шахты «Таежная» нейтральные (pH 6,5–7,8), преимущественно гидрокарбонатно-сульфатные кальциевые (с учетом включения в название ионов, содержание которых составляет более 25 %-экв от суммы анионов и катионов, соответственно, в порядке возрастания их концентраций) с минерализацией 0,12–0,32 г/л (табл. 1, рис. 2). Повышенное содержание сульфатов и ряда микроэлементов (Fe, Al, Mn, Pb, Co, Zn) в р. Бол. Гремячая до впадения техногенных стоков шахты «Таежная» связано с влиянием породных отвалов, расположенных около русла реки [16, 18]. Воды, изливающиеся из северной штолни шахты «Таежная», кислые (pH 3,1–3,4), сульфатные железистые, с минерализацией 2,7–3,3 г/л и повышенным содержанием металлов. Концентрация растворенного железа в шахтных водах в среднем превышает ПДК_{рх} в тысячи раз, алюминия и марганца – в сотни раз, бериллия, лития, кобальта, никеля, цинка – в десятки раз, свинца – в 2–3 раза. Ниже места впадения загрязненных шахтных стоков в р. Бол. Гремячая становится кислой (pH 2,9–3,2), сульфатной, железистой, по составу почти идентичной шахтным водам. Снижение pH смешанных вод на рассматривает-

шем участке р. Бол. Гремячая обусловлено осаждением на данном гидрохимическом барьере вторичных минералов железа, выпадение которых сопровождается выделением в раствор дополнительных ионов водорода (подробнее этот процесс рассмотрен в разделе «Результаты расчета индексов насыщения»).

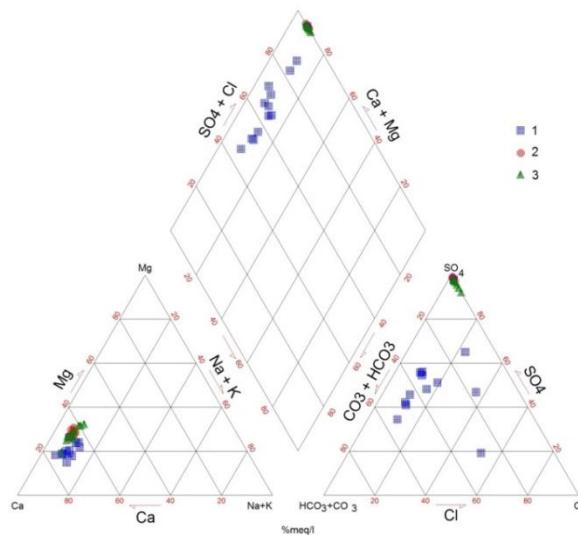


Рис. 2. Диаграмма Пайпера для исследуемых вод (%-экв/л): 1 – р. Бол. Гремячая выше места впадения кислотного дренажа (створ 1), 2 – кислотный дренаж шахты «Таежная», 3 – р. Бол. Гремячая ниже впадения кислотного дренажа (створ 2)

Fig. 2. Piper diagram of water samples from: 1 – the Bol. Gremyachaya river above the acid mine drainage (AMD) inflow (sampling point 1); 2 – AMD of the «Taezhnaya» mine; 3 – the Bol. Gremyachaya river below the AMD inflow (sampling point 2)

Река Бол. Гремячая является правым притоком р. Юж. Вильва. Химический состав принимающей реки изменяется после впадения в нее загрязненных вод р. Бол. Гремячая. Наблюдается снижение pH с 7,1–8,0 (выше впадения) до 6,1–7,1 (ниже впадения), увеличение минерализации от 0,05–0,16 до 0,4 г/л и изменение основного ионного состава (табл. 1, рис. 3). Преимущественно хлоридно-гидрокарбонатный кальциевый и хлоридно-гидрокарбонатный магниево-кальциевый состав вод р. Юж. Вильва ниже впадения загрязненных вод реки Бол. Гремячая изменяется на сульфатный железисто-кальциевый. Значительно увеличивается содержание сульфатов, а также Fe, Al, Mn и других металлов, по сравнению с фоновыми значениями. Устье р. Юж. Вильва удалено от места впадения р. Бол. Гремячая на расстояние около 30 км, на протяжении которых в нее впадает несколько притоков. В низовьях р. Юж. Вильва вода вновь становится нейтральной и слабощелочной (pH 7,1–8,1), по составу – хлоридно-гидрокарбонатной кальциевой, сульфатно-гидрокарбонатной кальциевой (рис. 3), минерализация снижается до 0,05–0,23 г/л. В целом наблюдается уменьшение концентрация SO_4^{2-} , Fe, Al, Mn, Li, Be, Zn, Ni. Однако в некоторых пробах в устье р. Юж. Вильва содержание SO_4^{2-} выше, чем в пробах, отобранных в створе выше по течению в тот же день.

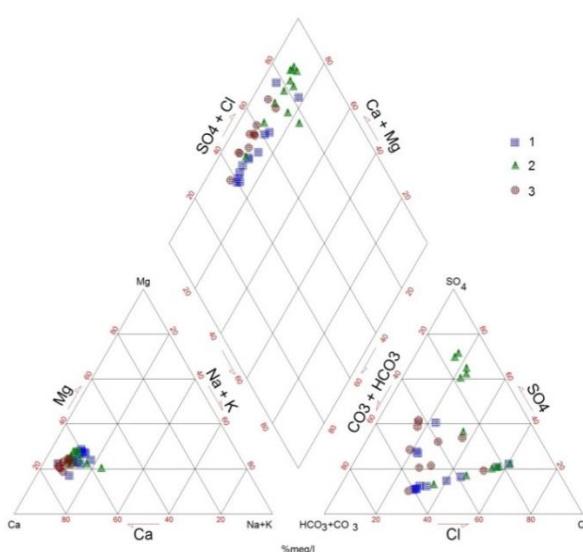


Рис. 3. Диаграмма Пайпера для исследуемых вод (%-экв/л): 1 – р. Юж. Вильва выше впадения р. Бол. Гремячая (створ 3ф), 2 – р. Юж. Вильва ниже впадения р. Бол. Гремячая (створ 4), 3 – устье р. Юж. Вильва (створ 5)

Fig. 3. Piper diagram of water samples from: 1 – the Yuzhnaya Vilva river above the inflow of the Bol. Gremyachaya river (sampling point 3ф – background); 2 – the Yuzhnaya Vilva river below the inflow of the Bol. Gremyachaya river (sampling point 4); 3 – the mouth of the Yuzhnaya Vilva river (sampling point 5)

Река Юж. Вильва впадает в р. Усьва, которая также подвержена негативному влиянию Кизеловского угольного бассейна. Источниками загрязнения р. Усьва, помимо вод р. Юж. Вильва, являются изливы шахт им. Чкалова и «Усьва-3», отвалы и загрязненные родники, расположенные в районе этих шахт (пос. Усьва) [16, 18]. Расстояние от места слияния рек Юж. Вильва и Усьва до впадения последней в р. Чусовая составляет

около 4 км. Основной состав воды в устье р. Усьва сульфатно-гидрокарбонатный кальциевый с минерализацией 0,05–0,30 г/л и pH 7,1–8,2 (табл. 1, рис. 4). В среднем минерализация р. Усьва на данном участке выше, чем в устье р. Юж. Вильва (табл. 1). Наблюдается увеличение среднего содержания сульфатов и снижение концентрации Fe и Al. Концентрации других микрокомпонентов существенно не изменяются.

Таблица 1. Химический состав воды, мг/л (усредненные значения)

Table 1. Water chemical composition, mg/L (average values)

Показатель химического состава Chemical composition	Излив AMD	Створ №/Sampling point no.							
		1	2	3ф	4	5	6	7ф	8
pH	3,3	7,45	3,1	7,5	6,7	7,7	7,8	8,0	7,8
Жесткость/Hardness	11,4	2,98	7,0	0,89	1,34	1,72	2,15	2,51	1,95
Сухой остаток/Evaporated residue	2979	200	1578	65	119	114	146	136	108
HCO ₃ ⁻	<п.о.*	91,0	<п.о.	52,4	23,2	67,2	102,4	131,2	94,5
SO ₄ ²⁻	1891	91	952	17	46	36	45	33	31
Cl ⁻	20	20	20	20	20	20	20	20	20
NO ₂	0,01	0,06	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
NO ₃	0,10	2,06	0,82	0,10	0,10	0,10	0,11	0,22	0,10
NH ₄	1,23	0,14	0,96	0,10	0,18	0,09	0,07	0,04	0,10
Ca	159,79	46,39	98,10	12,95	19,17	26,04	32,77	37,42	29,60
Mg	42,33	8,23	25,50	3,12	4,67	5,03	6,21	7,97	5,87
Na	11,38	7,10	7,37	2,76	3,17	3,11	4,16	5,63	4,14
K	16,18	1,62	10,58	0,33	0,76	0,60	0,63	0,64	0,46
Al	31,83	0,46	15,37	0,10	0,45	0,19	0,11	0,13	0,14
Fe	603,40	1,15	307,18	0,25	9,05	1,77	0,53	0,20	0,70
Mn	6,084	0,081	3,246	0,017	0,183	0,034	0,034	0,058	0,029
Li	0,234	0,011	0,150	0,001	0,007	0,004	0,009	0,003	0,003
Zn	0,252	0,01	0,106	0,007	0,009	0,006	0,005	0,006	0,006
Be	0,0251	0,0001	0,0113	0,0001	0,0003	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Pb	0,0159	0,0030	0,0082	0,0038	0,0037	0,0036	0,0031	0,0038	0,0046
Ni	0,3758	0,0055	0,1956	0,0015	0,0118	0,0035	0,0018	0,0017	0,0025
Co	0,1743	0,0021	0,1083	0,0010	0,0054	0,0010	0,0010	0,0010	0,0015
Cd	0,0004	0,0002	0,0002	0,0010	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001
Si	18,10	2,89	10,32	2,62	2,98	2,46	2,29	1,84	2,30
Кол-во проб/Number of samples	9	12	12	12	12	10	11	12	11

* <п.о. – ниже предела обнаружения/below detection limit.

Вода в фоновом створе р. Чусовой выше впадения р. Усьва преимущественно гидрокарбонатная кальциевая (реже сульфатно-гидрокарбонатная кальциевая, сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатная кальциевая, гидрокарбонатная магниево-кальциевая) с минерализацией до 0,25 г/л и pH 7,3–8,3. Ниже впадения р. Усьвы преобладающий анионный состав воды в р. Чусовой гидрокарбонатный, сульфатно-гидрокарбонатный, реже хлоридно-гидрокарбонатный. В отдельных пробах, с низким содержанием SO_4^{2-} и HCO_3^- , значимыми для определения типа воды становятся хлориды (рис. 4). В катионном составе доминирует Ca, концентрация других катионов не превышает 25 %-экв/л. Величина pH изменяется от 7,0 до 8,2, минерализация – от 0,05 до 0,225 г/л. На данном участке увеличивается среднее содержание Fe, Pb, Ni по сравнению с их концентрациями в фоновом створе р. Чусовой (выше впадения р. Усьва).

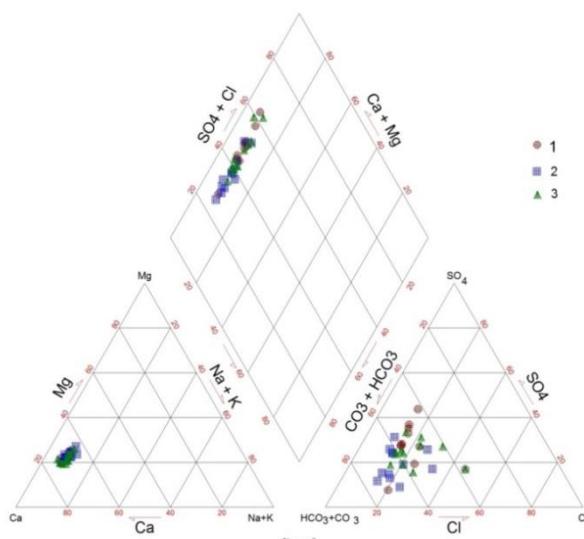


Рис. 4. Диаграмма Пайпера для исследуемых вод (%-экв/л): 1 – устье р. Усьва (створ 6), 2 – р. Чусовая выше впадения р. Усьва (створ 7f), 3 – р. Чусовая ниже впадения р. Усьва (створ 8)

Fig. 4. Piper diagram of water samples from: 1 – the mouth of the Usva river (sampling point 6), 2 – the Chusovaya river above the inflow of the Usva river (sampling points 7f – background), 3 – the Chusovaya river below the inflow of the Usva river (sampling point 8)

Формы нахождения металлов

По данным термодинамических расчетов, в водах с нейтральным значением показателя pH кальций, магний, натрий и калий находятся преимущественно в виде свободных ионов (92–99 %). В кислых шахтных водах и смешанных с шахтными водах р. Бол. Гремячая (pH~3) доминирующей формой нахождения основных катионов также являются простые ионы: Ca^{2+} (60–86 %), Mg^{2+} (63–87 %), Na^+ (96–99 %) и K^+ (95–99 %), оставшаяся часть образует нейтральные и отрицательно заряженные сульфатные комплексы: CaSO_4^0 , $\text{Mg}(\text{SO}_4)^0$, NaSO_4^- и KSO_4^- . Литий в нейтральной среде представлен исключительно ионом Li^+ . В шахтных и загрязненных речных водах с

кислой реакцией среды незначительная часть лития (0,7–3,8 %) образует комплексные соединения с сульфатами (LiSO_4^-).

Моделирование распределения форм нахождения металлов (Fe, Al, Mn, Zn, Ni, Pb и Cd) выполнялось для всех проб. Результаты, полученные в молях, пересчитывались в процентные доли той или иной формы элемента в зависимости от его общего содержания в каждой пробе, с последующим выведением среднего значения (указана в тексте) по каждому створу. Основные формы миграции элементов и процент от общего содержания компонента в пробах показаны на графиках (рис. 5).

В р. Bol. Гремячая, выше участка впадения излива шахты «Таежная» (створ 1), более 98 % алюминия и железа находится в виде гидроксидных комплексов (Fe(OH)_3^0 , Fe(OH)_2^+). Для марганца и кадмия превалирующей формой нахождения являются простые ионы (80 и 84 %, соответственно), оставшаяся часть приходится на (гидро)карбонатные и сульфатные формы. Преимущественной формой нахождения цинка также являются свободные ионы (67 %) с небольшой долей карбонатных (ZnCO_3^0), гидрокарбонатных (ZnHCO_3^+) и сульфатных (ZnSO_4^0) соединений. Для никеля и свинца характерны те же формы, что и для цинка, однако доля карбонатных комплексов (PbCO_3^0 и NiCO_3^0 , 70 %) преобладает над свободными ионами (Ni^{2+} , Pb^{2+}). Содержание в растворе гидрокарбонатных и сульфатных комплексных ионов никеля и свинца незначительно.

Несмотря на различные концентрации металлов в кислых шахтных водах (излив) и в р. Bol. Гремячая, ниже места поступления шахтных вод (створ 2), формы нахождения элементов совпадают, а их долевое распределение отличается незначительно. Преобладающими формами нахождения алюминия здесь становятся сульфатные комплексы AlSO_4^+ (70 и 69 %, соответственно в шахтных водах и в русле реки) и $\text{Al}(\text{SO}_4)_2^-$ (12 и 7 %). Доля свободных ионов Al^{3+} значительно меньше (18 и 24 %). Для железа характерны свободные ионы Fe^{2+} (53 и 54 %), сульфатные ионные комплексы двух- и трехвалентного железа (FeSO_4^0 , 18 и 13 %; FeSO_4^+ , 20–23 %; $\text{Fe}(\text{SO}_4)_2^-$, ~2 %) и гидроксидные комплексы FeOH^{2+} (4 и 5 %). Доля незакомплексированных ионов марганца и кадмия снижается в кислых водах р. Bol. Гремячая до 69 % (Mn^{2+}) и 66 % (Cd^{2+}) по сравнению с нейтральными водами выше от участка смешения с шахтными водами. При этом доля сульфатных комплексов этих металлов (MnSO_4^0 , CdSO_4^0) увеличивается до 30 %. Преобладающей формой нахождения в растворе цинка и никеля являются свободные ионы (62–77 %), оставшаяся часть также представлена сульфатными комплексами. Свинец присутствует примерно в равных долях в виде свободных ионов (Pb^{2+}) и сульфатных комплексов (PbSO_4^0).

В фоновом створе (3f) р. Юж. Вильва железо и алюминий находятся исключительно в виде гидроксидных комплексов ($\text{Al}(\text{OH})_4^-$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_3^0$, $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}(\text{OH})_3^0$), образованных трехзарядными

катионами этих металлов. Марганец, никель, цинк и кадмий представлены свободными ионами (более 95 %), с небольшой долей гидроксидных форм. Свинец находится в виде свободных ионов (59 %) и гидроксидных комплексов (PbOH^+ , 39 %).

Ниже участка смешения вод р. Юж. Вильва и р. Бол. Гремячая (створ 4) концентрации макро- и микроэлементов резко снижаются, по сравнению с их содержанием в водах р. Бол. Гремячая, что обусловлено процессами разбавления, осаждения минеральных фаз и сорбцией. Однако, по сравнению с фоновым створом р. Юж. Вильва, среднее содержание сульфатов и металлов (кроме Pb и Cd) повышается. Основными формами нахождения алюминия и железа ниже участка смешения вод становятся гидроксидные комплексы. В распределении химических форм алюминия преобладают комплексы вида Al(OH)_4^- (59 %) и Al(OH)_2^+ (29 %), менее значимы комплексы вида AlOH^{2+} и Al(OH)_3^0 . У железа преобладающей формой нахождения становится гидроксокомплекс Fe(OH)_2^+ и Fe(OH)_3^0 . На данном участке р. Юж. Вильва в воде остается незначительное количество ионов двухвалентного железа (Fe^{2+} , 7 %). Доля незакомплексован-

ных ионов марганца и цинка немного уменьшается по сравнению с фоновым створом р. Юж. Вильва, но увеличивается по сравнению с кислыми водами р. Бол. Гремячая и составляет на данном участке около 90 %. Оставшаяся часть представлена сульфатными (MnSO_4^0 , ZnSO_4^0), гидрокарбонатными (MnHCO_3^+ , ZnHCO_3^+) и карбонатными (MnCO_3^0 , ZnCO_3^0) комплексами. Для никеля характерно снижение доли простых ионов (72 %), как по сравнению с фоновым створом р. Юж. Вильва, так и по сравнению с загрязненными водами р. Бол. Гремячая, а также появление карбонатных комплексов (22 %) с небольшой долей сульфатных (3 %) и гидрокарбонатных (2 %) форм. В распределении форм нахождения свинца наблюдается снижение доли свободных ионов (до 50 %), гидроксидных форм (до 4 %), по сравнению с фоном в р. Юж. Вильва, и появление карбонатных (31 %), гидрокарбонатных (8 %) и сульфатных (7 %) комплексов. Для кадмия характерно появление нейтральных сульфатных (CdSO_4^0 , ~6 %) и хлоридных (CdCl_2^0 , ~4 %) комплексов, однако основная часть кадмия мигрирует в виде простого иона (~90 %).

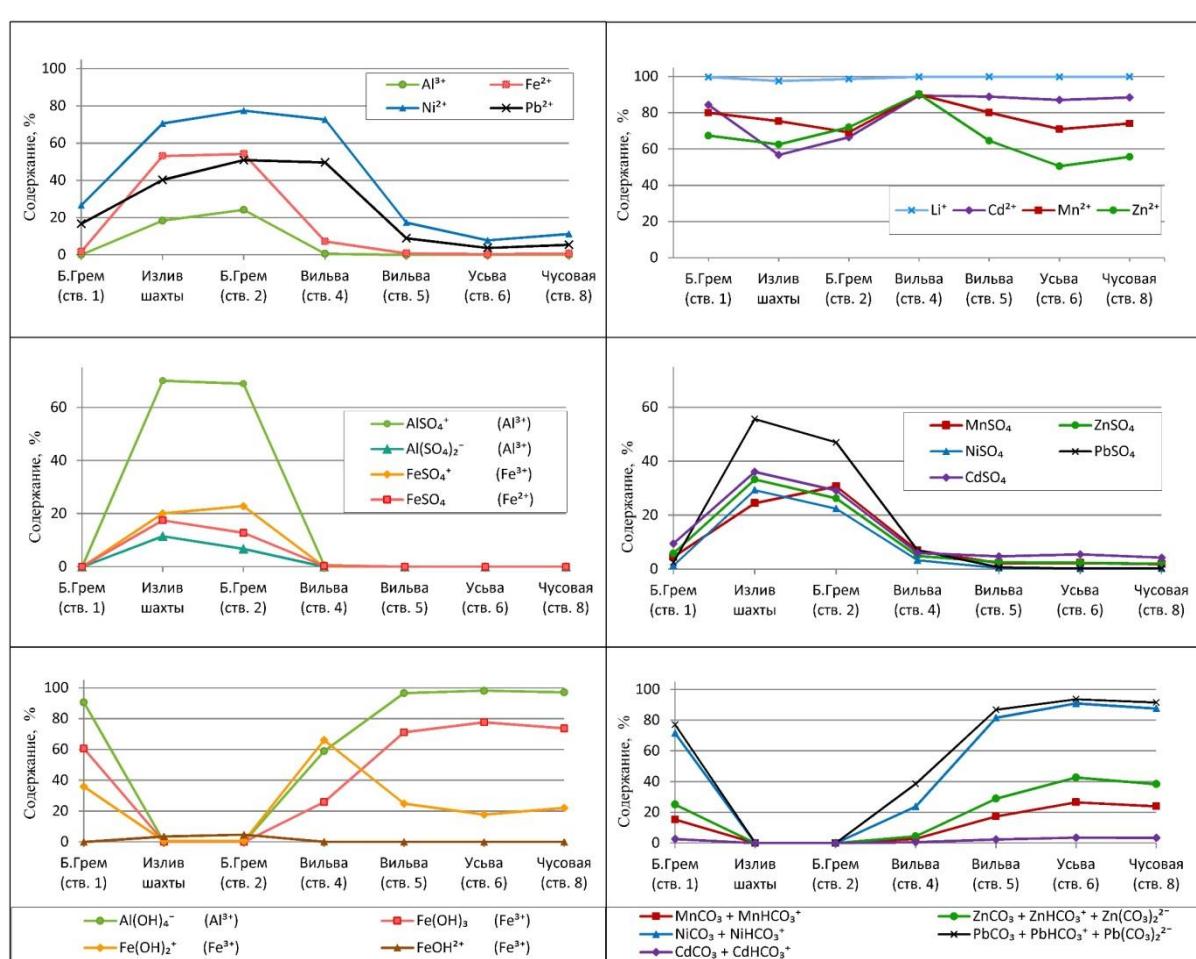


Рис. 5. Формы нахождения металлов в кислотном дренаже и водотоках, принимающих шахтные стоки (установленные значения)

Fig. 5. Forms of metals in the AMD and rivers affected by the mine drainage (mean values)

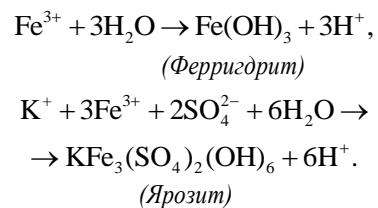
Ниже по течению, в устье р. Юж. Вильва (створ 5), алюминий и железо находится исключительно в гидроксидной форме. При этом доля Al(OH)_4^- увеличивается до 96 %. У железа наблюдается снижение доли гидроксокомплексов вида Fe(OH)_2^+ и увеличение доли гидроксида железа (III). В распределении химических форм марганца и цинка продолжают доминировать свободные ионы, однако их доля снижается и в среднем составляет 80 и 65 %, соответственно. Вместе с тем увеличивается доля их карбонатных (MnCO_3^0 , 12 %; ZnCO_3^0 , 21 %; $\text{Zn}(\text{CO}_3)_2^{2-}$, 2 %) и гидрокарбонатных (MnHCO_3^+ , ZnHCO_3^+ , 6 %) форм. Доля сульфатных (MnSO_4^0 , ZnSO_4^0) комплексов снижается (до 2 %). Кроме того, незначительная часть (4 %) цинка образует гидроксидные комплексы ($\text{Zn}(\text{OH})_2^0$, ZnOH^+). Для никеля и свинца характерно резкое снижение доли простых ионов, а преобладающими формами становятся карбонатные комплексы (80 %). Превалирующей формой нахождения кадмия остаются свободные ионы (89 %) с небольшой долей сульфатных (5 %), хлоридных (4 %) и гидрокарбонатных комплексов (2 %).

В устьевой части р. Усьва (створ 6) почти весь присутствующий в воде алюминий находится в виде гидроксокомплексов типа Al(OH)_4^- . В распределении железа продолжается тенденция снижения доли гидроксокомплексов состава Fe(OH)_2^+ в пользу увеличения доли гидроксида железа (III). Несмотря на продолжающееся снижение доли простых ионов марганца и цинка, они остаются доминирующей формой в растворе (71 и 50,5 %, соответственно). При этом доля карбонатных и гидрокарбонатных комплексов обоих металлов увеличивается по сравнению с их содержанием в нижнем течении р. Юж. Вильва. Доля сульфатных комплексов марганца и цинка, а также гидроксидных форм цинка остается неизменной. Доминирующей формой миграции никеля и свинца являются карбонатные комплексы (90 %). Оставшаяся часть никеля представлена свободными ионами (8 %) и гидрокарбонатными формами (2 %). Для свинца характерна миграция в форме свободных ионов (4 %) и гидрокарбонатных (4 %) комплексов. Незначительная часть свинца (2 %) образует гидроксидные комплексы (PbOH^+). В долевом распределении химических форм кадмия значительных изменений, по сравнению с расположенным выше створом (в устье р. Юж. Вильва), не прослеживается. Основными формами миграции кадмия остаются простые ионы (87 %) с незначительной долей сульфатных (5,5 %), хлоридных (3,5 %) и гидрокарбонатных (3 %) комплексов.

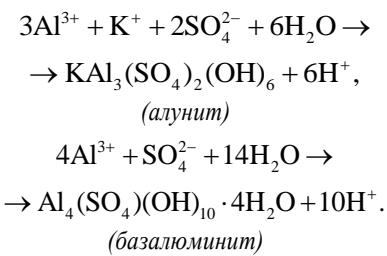
В р. Чусовой, ниже впадения р. Усьва (створ 8), формы нахождения металлов и их долевое распределение в целом повторяет ситуацию в нижнем течении р. Усьва (створ 6). Следует отметить, что в целом на рассматриваемом участке намечается тенденция на увеличение доли свободных ионов Mn, Zn, Ni, Pb и Cd в среднем на 1–11 %, по сравнению с фоновым створом р. Чусовой (створ 7ф). Для карбонатных форм этих металлов имеет место обратная тенденция – на снижение их доли (на 4–7 %) по сравнению с фоновым створом.

Результаты расчета индексов насыщения

Расчеты индексов насыщения показали, что пробы из штолни шахты «Таежная» и смешанные с шахтными стоками воды р. Бол. Гремячая пересыщены по отношению к ярозиту, гетиту и магнетиту (табл. 2). Шахтные воды пересыщены к ферригидриту (Fe(OH)_3), в то время как воды р. Бол. Гремячая (ниже зоны смешения) близки к равновесию или недосыщены к этому минералу. Моделирование одновременного осаждения ярозита и ферригидрита в шахтных и смешанных с шахтными водах показало, что в зоне разгрузки кислотного дренажа железо удаляется из раствора преимущественно в виде ярозита [23]. Положительные индексы насыщения джурбанита в некоторых пробах шахтных вод говорят о возможности его образования. Однако существует неоднозначные мнения относительно формирования джурбанита в кислых сульфатных водах с $\text{pH} < 4,5$ [7, 24]. В большинстве исследований формирование этого минерала показано только геохимическим моделированием [25]. Образование гидроксидов железа и ярозита сопровождается поступлением в шахтные воды дополнительных ионов водорода и, следовательно, снижением pH раствора [6, 7]:



Воды р. Юж. Вильва, ниже впадения в нее р. Бол. Гремячая, пересыщены по отношению к оксидам и гидроксидам Fe(III) (ферригидриту, гетиту, магнетиту). Наблюдается насыщение гидроксидов и оксигидроксидов алюминия ($\text{Al(OH)}_3(a)$, гиббсита, диаспора, бёмита). Термодинамические расчеты показали, что в зоне смешения рек Юж. Вильва и Бол. Гремячая возможно образование взвешенных частиц алюнита и базалюминита. Гидроксосульфаты алюминия образуются при смешении кислых сульфатных вод, содержащих растворенный алюминий, с водами, имеющими более высокое значение pH, или при нейтрализации этих вод карбонатными минералами [7]. Реакция осаждения гидроксосульфатов алюминия протекает согласно следующим реакциям [7]:



Ниже впадения р. Бол. Гремячая воды р. Юж. Вильва становятся насыщенными по отношению к ряду алюмоиликатных фаз: каолиниту, иллиту, бейделлиту, галлуазиту, ломонтиту, монтмориллониту и пирофиллиту.

Расчеты индекса насыщения вод в устье р. Юж. Вильва показали, что они остаются пересыщенными к оксидам и гидроксидам железа (III). Для аморфного гидроксида алюминия (Al(OH)_3) значение индекса насыщения варьирует от -1,86 до 0,5. Однако для более устойчивых форм гидроксида алюминия (диаспор, бёмыт и гиббсит) значение показателя насыщения положительно во всех пробах. Вода на данном участке станов-

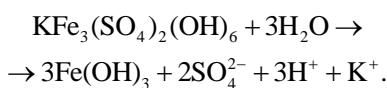
ится недосыщенной к алуниту, но остается пересыщенной по отношению к базалюминиту. Положительные индексы насыщения наблюдаются для глинистых минералов: бейделлита, иллита, каолинита, ломонитита, монтмориллонита и пирофиллита. Цинк на данном участке р. Юж. Вильва может образовывать собственные минеральные фазы ZnSiO_3 , положительный индекс насыщения к которому показали 6 из 10 проб.

Таблица 2. Индексы насыщения (усредненные значения)

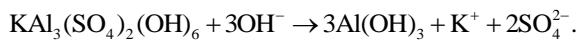
Table 2. Saturation indices (average values)

Минерал/Mineral	Излив AMD	Створ №/Sampling point no.						
		1	2	3ф	4	5	6	7ф
Fe(OH)_3 (аморфный/amorphus)	0,68	3,54	-0,02	-0,25	3,88	3,57	3,17	2,72
Гетит FeO(OH) /Goethite	5,84	8,90	5,30	5,22	9,35	9,06	8,66	8,18
Маггемит Fe_2O_3 /Maghemite	4,75	10,47	3,35	2,89	11,16	10,54	9,73	8,83
Al(OH)_3 (аморфный/amorphus)	-6,51	-0,20	-6,90	-3,79	0,49	-0,73	-1,07	-1,23
Гиббсит Al(OH)_3 /Gibbsite	-3,63	2,62	-6,90	-0,99	3,28	2,06	1,72	1,57
Диаспор AlO(OH) /Diaspore	-2,50	3,79	-2,91	0,19	4,46	3,24	2,90	2,75
Бёмыт AlO(OH) /Boehmite	-4,38	1,95	-4,75	-1,62	2,66	1,44	1,09	0,94
Манганит MnO(OH) /Manganite	-8,11	-2,55	-8,88	-6,36	-3,79	-2,91	-2,66	-2,35
Гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ /Gypsum	-0,55	-1,82	-0,96	-8,79	-2,58	-2,44	-2,25	-2,32
Ярозит-К $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})$ Jarosite	6,40	-0,09	4,58	-20,35	2,48	-1,44	-3,01	-4,82
Джурбанит AlOHSO_4 /Jurbanite	-0,03	-3,43	-0,61	-10,81	-1,74	-4,95	-5,56	-5,89
Алунит $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ /Alunite	-2,22	0,83	-3,87	-20,97	3,96	-2,75	-4,13	-4,93
Базалюминит $\text{Al}_4(\text{OH})_{10}\text{SO}_4$ Basaluminite	-9,12	5,35	-11,87	-13,41	8,48	1,53	-0,10	-0,74
Каолинит $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ Kaolinite	-6,39	5,67	-6,55	-7,69	7,01	4,33	3,58	3,08
Иллит $\text{K}_{0,6}\text{Mg}_{0,25}\text{Al}_{2,3}\text{Si}_{3,5}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ Illite	-15,12	2,50	-15,15	-19,45	3,00	0,81	0,15	-0,49
Бейделлит ($\text{NaKMg}_{0,5} \cdot 0,11\text{Al}_{2,33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) Beidellite	-11,69	3,34	-11,46	-17,24	4,61	1,63	0,81	0,11
Галлуазит $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ Halloysite	-11,68	0,44	-11,78	-12,88	1,82	-0,87	-1,61	-2,12
Ломонит $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ Laumontite	-18,52	1,44	-18,26	-21,25	1,01	0,19	-0,14	-0,74
Са-Монтмориллонит $\text{Ca}_{0,165}\text{Al}_{2,33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ Montmorillonite-Ca	-11,57	3,59	-11,28	-16,57	4,90	1,96	1,14	0,42
Пирофиллит $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ Pyrophyllite	-6,87	5,52	-5,56	-13,48	7,36	4,50	3,69	2,86
ZnSiO_3	-7,48	-0,32	-7,44	-5,93	-1,47	0,07	0,24	0,16
Кол-во проб/Number of samples	9	12	12	12	12	10	11	12

В нижнем течении р. Юж. Вильва, где вода слабошелочная, содержание металлов значительно снижается, однако концентрации сульфатов в некоторых пробах выше, чем в пробах, отобранных в створе выше по течению. Одним из объяснений этого явления может быть растворение взвешенных частиц ярозита и алунита, по отношению к которому воды становятся недосыщенными. Растворение ярозита протекает с выделением сульфатных анионов и соосажденных токсичных элементов в поверхностные воды [26, 27]. Растворения ярозита в данных условиях может происходить инконгруэнтно с образованием наноразмерных гидроксидов железа, формирующих охристые осадки [27, 28]:



Растворение алунита (при $\text{pH} > 5,2$) приводит к образованию аморфных осадков, обогащенных алюминием [29]:



В устье р. Усьва наблюдается похожая картина, что и в низовьях р. Юж. Вильва, однако большая часть проб недосыщена к базалюминиту. Взвешенные частицы ярозита и алунита на данном участке р. Усьва продолжают растворяться. Индекс насыщения воды к каолиниту и пирофиллиту положителен во всех пробах. По отношению к другим алюмосиликатным минералам показатель насыщения изменяется от отрицательных до положительных значений. По отношению к метасиликату цинка (ZnSiO_3) воды становятся более насыщенными.

Вода в р. Чусовая как выше, так и ниже впадения р. Усьва, пересыщена по отношению к гидроксидам и оксигидроксидам железа и алюминия (ферригидриту, гетиту, гиббситу, диаспору, бёмиту) и недосыщена по отношению к алюниту и ярозиту. В контрольном створе р. Чусовой индекс насыщения базалюминита изменяется от -4,38 до 7,28, но в среднем этот показатель является положительным (1,09). При этом в фоновом створе р. Чусовая и в устье р. Усьва вода по отношению к базалюминиту в целом недосыщена. Все пробы воды в р. Чусовая, ниже впадения р. Усьва, имеют положительный индекс насыщения к глинистым минералам: каолиниту, монтмориллониту, пирофиллиту. По отношению к бейделлиту, галузиту, иллиту, ломонитту, а также метасиликату цинка часть проб, на данном участке р. Чусовая, недосыщена.

Все рассмотренные в работе пробы техногенных и природных вод недосыщены по отношению к гипсу. В основном все пробы недосыщены к карбонатным минералам (кальциту, доломиту, магнезиту и родохрозиту). Положительные, но близкие к равновесным, значения индексов насыщения кальцита появляются в нескольких пробах в устье р. Юж. Вильва, устье р. Усьва и в обоих створах р. Чусовая.

Заключение

В кислых шахтных водах и в водах р. Бол. Гремячая, ниже впадения шахтных вод, преобладающими формами нахождения алюминия являются сульфатные комплексы, (более 75 %). Половина содержащегося в кислых водах железа находится в виде свободных ионов Fe^{2+} , остальная часть представлена сульфатными комплексами с незначительной долей гидроксидных форм. Расчеты индексов насыщения показали, что как кислые шахтные, так и смешанные с шахтными водами р. Бол. Гремячая пересыщены по отношению к ярозиту и гетиту. Тот факт, что вторичные минералы – ярозит и гетит – были обнаружены в зоне разгрузки шахтных вод и в донных отложениях реки Бол. Гремячая [30], свидетельствует о том, что сульфатные и гидроксидные комплексы железа достаточно быстро осаждаются в виде соответствующих минералов, образуя рыжие охры.

Воды в р. Юж. Вильва, ниже впадения р. Бол. Гремячая, пересыщены по отношению к оксидам и гидроксидам железа и (окси)гидроксидам алюминия. Термодинамические расчеты показали, что в зоне смешения рек Юж. Вильва и Бол. Гремячая возможно образование взвешенных частиц алюнита и базалюминита. Часть алюминия может включаться в структуру алюмоиликатных минералов. Учитывая, что ниже участка смешения этих рек содержание железа и алюминия в среднем снижается на 97 % по сравнению с их содержанием в загрязненных водах р. Бол. Гремячая, можно утверждать, что основная масса этих металлов удаляется из раствора путем осаждения собственных минеральных фаз. Оставшаяся часть железа и алюминия мигрирует по течению р. Юж. Вильва до устья р. Усьва и далее в р. Чусовая преимущественно в виде гидроксокомплексов. Снижение концентрации железа и алюминия в устье рек Юж.

Вильва и Усьва может быть обусловлено формированием гидроксидов и оксигидроксидов этих металлов, а также формированием глинистых минералов. Отрицательные индексы насыщения к алюниту и ярозиту в нижнем течении р. Юж. Вильва и далее по потоку говорят о неустойчивости этих минеральных фаз в нейтральных водах рек. Растворение взвешенных частиц указанных минералов протекает с выделением сульфатных анионов и сорбированных токсичных элементов в поверхностные воды.

Нахождение в кислых загрязненных водах основной доли растворенных металлов Li, Cd, Mn, Zn и Ni в виде простых ионов позволяет говорить, что основным механизмом их удаления из вод р. Бол. Гремячая на участке выше впадения в р. Юж. Вильва, а также в зоне смешения этих рек, является сорбция на поверхности осаждаемых гидроксидов, оксигидроксидов и гидроксосульфатов железа и алюминия (ярозита, ферригидрита, гетита, алюнита и базалюминита). Свинец в шахтных водах и в кислых водах р. Бол. Гремячая присутствует примерно в равных долях в виде свободных ионов и сульфатных комплексов. Поскольку моделирование не выявило возможности образования собственных минералов свинца в кислых сульфатных водах, можно утверждать, что значительная его часть также удаляется за счет сорбции.

Основная часть металлов удаляется на двух геохимических барьерах: на участке смешения кислотного дренажа и вод р. Бол. Гремячая и далее при впадении р. Бол. Гремячая в р. Юж. Вильва. На втором из вышеперечисленных геохимических барьеров среднее содержание Ni, Pb, Li, Zn и Cd снижается до уровня ПДК_{px}. Однако в отдельных пробах на данном участке р. Юж. Вильва и ниже по потоку концентрации этих микрокомпонентов и Mn превышает ПДК_{px}.

Расчеты индексов насыщения вод в реках Юж. Вильва, Усьва и Чусовая также не выявили возможности образования минеральных фаз Li, Cd, Mn, Ni и Pb. Результаты моделирования форм нахождения металлов показали, что в нейтральных водах рек Li, Cd, Mn, а также Zn мигрируют преимущественно в виде свободных ионов. В данных геохимических условиях основным механизмом удаления из раствора металлов Li, Cd и Mn является сорбция на поверхности гидроксидов и оксигидроксидов железа и алюминия (ферригидрита, гетита, гиббсита, диаспора, бёмита), а также глинистых минералов. Цинк может удаляться из речных вод как за счет сорбции, так и за счет образования собственной минеральной фазы (ZnSiO_3). Никель и свинец мигрируют в реках преимущественно в виде карбонатных и гидрокарбонатных комплексов.

Приведенные модельные расчеты позволили определить основные формы миграции металлов в реках-приемниках шахтных вод, выявить основные вторичные минеральные фазы, формирование которых способствует выведению токсичных элементов из водных растворов, и осуществить прогноз устойчивости взвеси вторичных минеральных фаз при их миграции в водотоках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The fate of major constituents and chromium and other trace elements when acid waters from the derelict Libiola mine (Italy) are mixed with stream waters / M. Accornero, L. Marini, G. Ottonello, M. Zuccolini // Applied Geochemistry. – 2005. – V. 20. – P. 1368–1380. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2005.03.001
2. Burrows J.E., Cravotta C.A., Peters S.C. Enhanced Al and Zn removal from coal-mine drainage during rapid oxidation and precipitation of Fe oxides at near-neutral pH // Applied Geochemistry. – 2017. – V. 78. – P. 194–210. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2016.12.019
3. Cravotta C.A., Brady K.B.C. Priority pollutants and associated constituents in untreated and treated discharges from coal mining or processing facilities in Pennsylvania, USA // Applied Geochemistry. – 2015. – V. 62. – P. 108–130. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2015.03.001
4. Maximovich N., Khayrulina E. Artificial geochemical barriers for environmental improvement in a coal basin region // Environmental Earth Sciences. – 2014. – V. 72. – № 6. – P. 1915–1924. DOI: 10.1007/s12665-014-3099-7
5. Duraes N., Bobos I., Da Silva E.F. Speciation and precipitation of heavy metals in high-metal and high-acid mine waters from the Iberian Pyrite Belt (Portugal) // Environmental Science and Pollution Research. – 2016. – V. 24. – № 5. – P. 4562–4576. DOI: 10.1007/s11356-016-8161-4
6. Secondary sulfate minerals associated with acid drainage in the eastern US: recycling of metals and acidity in surficial environments / J.M. Hammarstrom, R.R. Seal, A.L. Meier, J.M. Kornfeld // Chemical Geology. – 2005. – V. 215. – P. 407–431. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.053
7. Bigham J.M., Nordstrom D.K. Iron and aluminum hydroxysulfates from acid sulfate waters // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. – 2000. – V. 40. – P. 351–403. DOI: 10.2138/rmg.2000.40.7
8. The removal of dissolved metals by hydroxysulphate precipitates during oxidation and neutralization of acid mine waters, Iberian pyrite belt / J.S. España, E.L. Pam, E.S. Pastor, J.R. Andrés, J.A.M. Rubí // Aquatic Geochemistry. – 2006. – V. 12. – № 3. – P. 269–298. DOI: 10.1007/s10498-005-6246-7
9. Environmental implications of metal mobility in marine sediments receiving input from a torrent affected by mine discharge / S. Consani, M.C. Ianni, L. Cutroneo, E. Dinelli, C. Carbone, M. Capello // Marine Pollution Bulletin. – 2019. – V. 139. – P. 221–230. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.12.050
10. Kimball B.A., Callender E., Axtmann E.V. Effects of colloids on metal transport in a river receiving acid mine drainage, upper Arkansas River, Colorado, U.S.A. // Applied Geochemistry. – 1995. – V. 10. – № 3. – P. 285–306. DOI: 10.1016/0883-2927(95)00011-8
11. Metal transport and remobilisation in a basin affected by acid mine drainage: the role of ochreous amorphous precipitates / S. Consani, C. Carbone, E. Dinelli, T. Balić-Žunić, L. Cutroneo, M. Capello, G. Salviulo, G. Lucchetti // Environmental Science and Pollution Research. – 2017. – V. 24. – № 18. – P. 15735–15747. DOI: 10.1007/s11356-017-9209-9
12. Корнеева Т.В., Юрьевич Н.В., Саева О.П. Геохимическое моделирование поведения тяжелых металлов в техногенных системах // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 89–101.
13. Мирошниченко Н.В. Исследование химического состава воды рек с применением анализа химических форм нахождения металлов в растворе // ГИАБ. – 2007. – № 5. – С. 87–89.
14. Major hydrogeochemical processes in an acid mine drainage affected estuary / M.P. Asta, M.L. Calleja, R. Pérez-López, L.F. Auqué // Marine Pollution Bulletin. – 2015. – V. 91. – № 1. – P. 295–305. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2014.11.023
15. Imaykin A. Mine waters of Kosva field of Kizel coal basin during and after its operation, forecast of hydrochemical regime of mine waters that are discharged on the surface // 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014. – Albena, Bulgaria, 2014. – B. 1. – V. 2. – P. 605–612. DOI: 10.5593/SGEM2014/B12/S2.077
16. Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения. – Пермь: Перм. гос. нац. иссл. ун-т., 2018. – 287 с.
17. Имайкин А.К., Имайкин К.К. Гидрогеологические условия Кизеловского угольного бассейна во время и после окончания его эксплуатации, прогноз их изменений. – Пермь: Перм. гос. нац. иссл. ун-т., 2013. – 112 с.
18. Геоэкологическая геоинформационная система Кизеловского угольного бассейна. URL: <http://kub.maps.psu.ru/> (дата обращения 13.08.2020).
19. Parkhurst D.L., Appelo C.A.J. Description of input and examples for PHREEQC version 3-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Techniques and Methods. B. 6, chap. A43. – Denver, Colorado: U.S. Geological Survey, 2013 – 497 p. Available at <https://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/> (дата обращения 13.08.2020)
20. Ball J.W., Nordstrom D.K. User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major, trace and redox elements in natural waters. – Menlow Park, Calif.: U.S. Geological Survey, 1991. – 185 p.
21. Nordstrom D.K., Ball J.W. Mineral saturation states in natural waters and their sensitivity to thermodynamic and analytical errors // Sciences Geologiques, bulletins et memoires. – 1989. – V. 42. – № 4. – P. 269–280.
22. Alpers C.N., Nordstrom D.K. Geochemical modelling of water-rock interactions in mining environments // The environmental geochemistry of mineral deposits, part A: processes, methods, and health issues. V. 6. Reviews in Economic Geology / Eds. G.S. Plumlee, M.J. Logsdon. – Littleton: Society of Economic Geologists, 1999. – P. 289–324. DOI: doi.org/10.5382/Rev.06.14
23. Фетисова Н.Ф. Моделирование осаждения и трансформации гидрогенных минеральных фаз кислых шахтных вод // Горное эхо. – 2020. – № 2 (79). – С. 21–25. DOI: 10.7242/echo.2020.2.4
24. Jones A.M., Collins R.N., Waite T.D. Mineral species control of aluminum solubility in sulfate-rich acidic waters // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2011. – V. 75. – № 4. – P. 965–977. DOI: doi.org/10.1016/j.gca.2010.12.001
25. Geochemistry of dissolved aluminum at low pH: Extent and significance of Al-Fe(III) coprecipitation below pH 4.0 / J. Sánchez-España, I. Yusta, J. Gray, W.D. Burgos // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2016. – V. 175. – P. 128–149. DOI: doi.org/10.1016/j.gca.2015.10.035
26. Gasharova B., Göttlicher J., Becker U. Dissolution at the surface of jarosite: an in situ AFM study // Chemical Geology. – 2005. – V. 215. – P. 499–516. DOI: doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.054
27. Jarosite dissolution II – reaction kinetics, stoichiometry and acid flux / S.A. Welch, D. Kirste, A.G. Christy, F. Beavis, S.G. Beavis // Chemical Geology. – 2008. – V. 254. – P. 73–86. DOI: doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.06.010
28. Effects of arsenic incorporation on jarosite dissolution rates and reaction products / M.R. Kendall, A.S. Madden, M.E. Elwood Madden, Q. Hu // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2013. – V. 112. – P. 192–207. DOI: doi.org/10.1016/j.gca.2013.02.019
29. Alunite dissolution rates: dissolution mechanisms and implications for Mars / J.L. Miller, A.E. Madden, C.M. Phillips-Lander, B.N. Pritchett, M.E. Madden // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2016. – V. 172. – P. 93–106. DOI: doi.org/10.1016/j.gca.2015.10.001
30. Mineral formation under the influence of mine waters (The Kizel coal basin, Russia) / E. Menshikova, B. Osovetsky, S. Blinov, P. Belkin // Minerals. – 2020. – V. 10. – № 4 (364). – P. 1–12. DOI: doi.org/10.3390/min10040364

Поступила 23.12.2020 г.

Информация об авторах

Фетисова Н.Ф., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Лаборатории геоэкологии горнодобывающих регионов, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук – филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук.

UDC 550.424.6:550.461

STUDY OF MIGRATION FORMS OF METALS IN RIVERS AFFECTED BY ACID MINE DRAINAGE OF THE KIZEL COAL BASIN

Natalia F. Fetisova,
fetisova.n.f@gmail.com

Mining Institute Ural Branch Russian Academy of Sciences –
Branch of the Perm Federal Research Center Ural Branch Russian Academy of Sciences,
78a, Sibirskaya street, Perm, 614007, Russia.

The relevance. The surface watercourses of the basin of Chusovaya river, the largest tributary of the Kama river on the area of the Perm Krai (Russia), are exposed to impact of acid mine drainage. The study of the metal behavior in the rivers affected by acid mine drainage is necessary for understanding the features of the component migration in natural-technogenic waters; research of geochemical processes and mechanisms that contribute to removal of the toxic elements from solutions; forecast of secondary pollution due to dissolution of the formed compounds due to the change of physical-chemical conditions. The results obtained in the area under study may reflect the specifics of the geochemical behavior of metals in other polluted rivers of the Kizel coal basin affected by acid mine drainage of similar composition.

The aims are to study the migration forms of metals in streams polluted by mine waters, to determine the main secondary mineral phases that contribute to the removal of toxic elements from solution, and to assess the stability of particles of formed minerals during migration in the river network.

Objects: acid mine drainage from the «Taezhnaya» mine of the Gremyachinskoe deposit of the Kizel coal basin, laden with high concentrations of sulfates and heavy metals, and rivers polluted by mine waters: Bolshaya Gremyachaya, Yuzhnaya Vilva, Usva and Chusovaya.

Methods. Physical-chemical modeling of the migration forms of metals in solutions and calculations of the saturation degree were performed using the PHREEQC program code with the WATEQ4f thermodynamic database.

Results of the research showed that metals (Al, Fe, Mn, Zn, Ni, Pb, Cd, Li) occur in the form of free ions and sulfate complexes both in the acid mine drainage and in contaminated water with pH of 2.9–3.4. In the river Yuzhnaya Vilva, below the site of mixing with mine affected water of the Bol. Gremyachaya river and further downstream, Fe and Al form only hydroxo complexes. For Ni and Pb, the predominant forms of migration are carbonate complexes. The presence of Li, Cd, Mn and Zn, in neutral river waters, mainly in form of free ions suggests that the principal mechanism of their precipitation is sorption on Fe and Al hydroxides and oxyhydroxides, as well as on clay minerals. Negative saturation indices for sulfate minerals, common for acid mine drainage, showed the instability of these mineral phases in neutral and slightly alkaline waters.

Key words:

Acid mine drainage, physical-chemical modeling, PHREEQC, migration forms of metals, complex ions, saturation index.

REFERENCES

- Accornero M., Marini L., Ottonello G., Zuccolini M. The fate of major constituents and chromium and other trace elements when acid waters from the derelict Libiola mine (Italy) are mixed with stream waters. *Applied Geochemistry*, 2005, vol. 20, pp. 1368–1380. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2005.03.001
- Burrows J.E., Cravotta, C.A., Peters S.C. Enhanced Al and Zn removal from coal-mine drainage during rapid oxidation and precipitation of Fe oxides at near-neutral pH. *Applied Geochemistry*, 2017, vol. 78, pp. 194–210. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2016.12.019
- Cravotta C.A., Brady K.B.C. Priority pollutants and associated constituents in untreated and treated discharges from coal mining or processing facilities in Pennsylvania, USA. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 62, pp. 108–130. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2015.03.001
- Maximovich N., Khayrulina E. Artificial geochemical barriers for environmental improvement in a coal basin region. *Environmental Earth Sciences*, 2014, vol. 72, no. 6, pp. 1915–1924. DOI: 10.1007/s12665-014-3099-7
- Durães N., Bobos I., da Silva E.F. Speciation and precipitation of heavy metals in high-metal and high-acid mine waters from the Iberian Pyrite Belt (Portugal). *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, vol. 24, no. 5, pp. 4562–4576. DOI: 10.1007/s11356-016-8161-4
- Hammarstrom J.M., Seal R.R., Meier A.L., Kornfeld J.M. Secondary sulfate minerals associated with acid drainage in the eastern US: recycling of metals and acidity in surficial environments. *Chemical Geology*, 2005, vol. 215, pp. 407–431. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.053
- Bigham J.M., Nordstrom D.K. Iron and aluminum hydroxsulfates from acid sulfate waters. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2000, vol. 40, pp. 351–403. DOI: 10.2138/rmg.2000.40.7
- España J.S., Pamo E.L., Pastor E.S., Andrés J.R., Rubí J.A.M. The removal of dissolved metals by hydroxysulphate precipitates during oxidation and neutralization of acid mine waters, Iberian pyrite belt. *Aquatic Geochemistry*, 2006, vol. 12, no. 3, pp. 269–298. DOI: 10.1007/s10498-005-6246-7
- Consani S., Ianni M.C., Cutroneo L., Dinelli E., Carbone C., Capello M. Environmental implications of metal mobility in marine sediments receiving input from a torrent affected by mine discharge. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, vol. 139, pp. 221–230. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.12.050
- Kimball B.A., Callender E., Axtmann E.V. Effects of colloids on metal transport in a river receiving acid mine drainage, upper Arkansas River, Colorado, U.S.A. *Applied Geochemistry*, 1995, vol. 10, no. 3, pp. 285–306. DOI: 10.1016/0883-2927(95)00011-8
- Consani S., Carbone C., Dinelli E., Balić-Žunić T., Cutroneo L., Capello M., Salvíulo G., Lucchetti G. Metal transport and remobilisation in a basin affected by acid mine drainage: the role of ochreous amorphous precipitates. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, no. 18, pp. 15735–15747. DOI: 10.1007/s11356-017-9209-9
- Korneeva T.V., Yurkevich N.V., Saeva O.P. Geochemical modeling of heavy metals behavior in technogenic systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 89–101. In Rus.
- Miroshnichenko N.V. Issledovanie khimicheskogo sostava vody reks s primeniem analiza khimicheskikh form nakhozhdeniya metallov v rastvore [Study of the chemical composition of river water using the analysis of chemical forms of metals in solution]. *GIAB*, 2007, no. 5, pp. 87–89.

14. Asta M.P., Calleja M.L., Pérez-López R., Auqué L.F. Major hydrogeochemical processes in an acid mine drainage affected estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, vol. 91, no. 1, pp. 295–305. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2014.11.023
15. Imaykin A. Mine waters of Kosva field of Kizel coal basin during and after its operation, forecast of hydrochemical regime of mine waters that are discharged on the surface. *14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014*. Albena, Bulgaria, 2014. B. 1, vol. 2, pp. 605–612. DOI: 10.5593/SGEM2014/B12/S2.077
16. Maximovich N.G., Piankov S.V. *Kizelovskiy ugnolny basseyn: ekologicheskie problemy i puti resheniya* [The Kizel coal basin: ecological problems and solutions]. Perm, Perm State National Research University Publ., 2018. 287 p.
17. Imaykin A.K., Imaykin K.K. *Gidrogeologicheskie usloviya Kizelovskogo ugnolnogo basseyna vo vremya i posle okonchaniya ego ekspluatatsii, prognoz ikh izmeneniy* [Hydrogeological conditions of the Kizel coal basin during and after its operation, forecast of their changes]. Perm, Perm State National Research University Publ., 2013. 112 p.
18. *Geokologicheskaya geoinformacionnaya sistema Kizelovskogo ugnolnogo basseyna* [Geoecological geoinformation system of the Kizel coal basin]. Available at: <http://kub.maps.psu.ru/> (accessed: 13 August 2020).
19. Parkhurst D.L., Appelo C.A.J. *Description of input and examples for PHREEQC version 3-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Techniques and Methods*. B. 6, chap. A43. Denver, Colorado, U.S. Geological Survey, 2013. 497 p. Available at <https://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/> (accessed 13 August 2020)
20. Ball J.W., Nordstrom D.K. *User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major, trace and redox elements in natural waters*. Menlow Park, Calif., U.S. Geological Survey, 1991. 185 p.
21. Nordstrom D.K., Ball J.W. Mineral saturation states in natural waters and their sensitivity to thermodynamic and analytical errors. *Sciences Géologiques, bulletins et mémoires*, 1989, vol. 42, no. 4, pp. 269–280.
22. Alpers C.N., Nordstrom D.K. Geochemical modelling of water-rock interactions in mining environments. *The environmental geochemistry of mineral deposits, part A: processes, methods, and health issues*. Vol. 6A. Reviews in Economic Geology. Eds. G.S. Plumlee, M.J. Logsdon. Littleton, Society of Economic Geologists, 1999. pp. 289–324. DOI: doi.org/10.5382/Rev.06.14
23. Fetisova N.F. Modelirovaniye osazhdeniya i transformatsii gidrogennykh mineralnykh faz kislykh shakhtnykh vod [Modeling of precipitation and transformation of hydrogenic mineral phases of acid mine waters]. *Gornoye ekho*, 2020, no. 2 (79), pp. 21–25. DOI: 10.7242/echo.2020.2.4
24. Jones A.M., Collins R.N., Waite T.D. Mineral species control of aluminum solubility in sulfate-rich acidic waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, vol. 75, no. 4, pp. 965–977. DOI: doi.org/10.1016/j.gca.2010.12.001
25. Sánchez-España J., Yusta I., Gray J., Burgos W.D. Geochemistry of dissolved aluminum at low pH: Extent and significance of Al-Fe(III) coprecipitation below pH 4.0. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, vol. 175, pp. 128–149. DOI: doi.org/10.1016/j.gca.2015.10.035
26. Gasharova B., Göttlicher J., Becker U. Dissolution at the surface of jarosite: an in situ AFM study. *Chemical Geology*, 2005, vol. 215, pp. 499–516. DOI: doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.054
27. Welch S.A., Kirste D., Christy A.G., Beavis F., Beavis S.G. Jarosite dissolution II – reaction kinetics, stoichiometry and acid flux. *Chemical Geology*, 2008, vol. 254, pp. 73–86. DOI: doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.06.010
28. Kendall M.R., Madden A.S., Elwood Madden M.E., Hu Q. Effects of arsenic incorporation on jarosite dissolution rates and reaction products. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, vol. 112, pp. 192–207. DOI: doi.org/10.1016/j.gca.2013.02.019
29. Miller J.L., Madden A.E., Phillips-Lander C.M., Pritchett B.N. and Madden M.E. Alumite dissolution rates: dissolution mechanisms and implications for Mars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, vol. 172, pp. 93–106. DOI: doi.org/10.1016/j.gca.2015.10.001
30. Menshikova E., Osovetsky B., Blinov S., Belkin P. Mineral Formation under the Influence of Mine Waters (The Kizel Coal Basin, Russia). *Minerals*, 2020, vol. 10, no. 4 (364), pp. 1–12. DOI: doi.org/10.3390/min10040364

Received: 23 December 2020.

Information about the authors

Natalia F. Fetisova, Cand. Sc., scientific researcher, Mining Institute of Ural Branch Russian Academy of Sciences – Branch of the Perm Federal Research Center Ural Branch Russian Academy of Sciences.

UDC 622.692.4

ROUTES OF LAYING GAS SUPPLY SYSTEM PIPELINE

Oksana N. Medvedeva¹,
medvedeva-on@mail.ru

Valeriya D. Penenko²,
isabel16122012@gmail.com

¹ Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
77, Politekhnicheskaya street, Saratov, 410054, Russia.

² AO «Giproniigaz» (Joint Stock Company),
54, Kirov S.M. avenue, Saratov, 410012, Russia.

Relevance. Designing a gas pipeline route is an important step in planning and building gas pipeline. There are various methods, dependencies and algorithms characterizing the functional component of the gas pipelines, various methods of laying. The most important part in the design process is the choice of an optimal route, which application effectiveness will be high and at the same time the project will have minimal capital investments in construction. Despite many proposed approaches, at present there is no a uniform method for determining the optimal costs for construction and reconstruction of the gas distribution networks.

The aim of the research is to study assumes solution of the problem of choosing the optimal pipeline route.

Methods. Our program is based on wave algorithms, or search by width. It means the search strategy, used in solving the problem, does not use additional information, but only that presented in the definition. The essence of this method is development successors and distinguish between a target and a non-target state.

Results and conclusions. Submitted description of a software package allows calculating the position of a linear structure on the area, based on a one-factor approach, linking the cost criterion to the complexity of developing different groups of soil.

Key words:

Gas supply, optimal route, route design, wave algorithm, main gas pipeline, average method, digital terrain model.

Introduction

Currently, gas supply systems are changing priorities, primarily due to the use of:

- the low-pressure gas transfer technologies;
- the high-performance devices for compression;
- an improved internal coating of pipes, which allows reducing roughness and increasing productivity up to 8...10 %.

At the same time, reconstruction of the existing gas transmission system should be directed to decrease energy costs and the cost of transporting gas, in particular. Forecasting and planning of increasing economic efficiency are the priority tasks of the gas supplying industry. Strategic planning helps use resources efficiently, focusing on the need to continuously reduction of production costs by increasing the reliability and the safety of equipment and improving technological processes. The use of innovative technologies, materials and equipment is capable to improve reliability and safety indicators, therefore long-term planning directed to the efficient use of resources is one of the most important functions of the gas transmission system. The design of gas pipelines should be a complex of optimal solutions, ranging from the choice of route, method of installation, materials and insulation, to the technology of making welded joints.

Gas networks are capital-intensive projects. However, comparing possible types of transportation of energy carriers (automobile, railway, shipping and gas pipelines) on the main parameters (capital costs, operational costs, carrying capacity, season restrictions, transportation in adverse conditions, etc.), it can be concluded that the use of the gas pipelines is economically beneficial.

Shortcomings of the gas transportation are the high cost of the gas pipelines construction (gas pipeline fittings, transitions, pipes, shutoff valves), the complexity of laying in the difficult areas, environmental hazards, especially at operation of underwater transitions (pipe canal). Advantages of using gas pipelines are:

- the possibility of laying gas networks in any direction at any distance;
- all-season work, regardless of natural influences;
- reliability and simplicity of operation;
- low shipping cost;
- safety of the product due to sealing the pipe;
- less material and capital intensity;
- full automation of transportation operations.

The main project document for construction of facilities is a feasibility study for construction, on its basis project documentation is developed. The design target must specify the source and end points of the pipeline, which are outlined in the initial stages of design. Designing the laying route is the first significant step in planning and construction of the gas pipeline, which affects the gas distribution system operation and, undoubtedly, streamlining the process will minimize economic losses and reduce the consumption of material and monetary resources [1–6].

For the effective choice of a gas pipeline route, it is necessary to predict the development of already existing gas networks, to develop improved methods and algorithms using geoinformation technologies [6–15].

Methods

It is possible to use various criteria for optimization of the pipeline route. The optimal route is the gas pipeline

rout, the construction of which allows obtaining the maximum or minimum value of the evaluation criterion. The general, universal criterion is the minimum of reduced (integral) costs in the construction and operation of the gas distribution system.

The major factors affecting the cost of construction are:

- diameter of the pipeline (the metal consumption grows with increasing diameter);
- gas pressure (higher the pressure in the pipeline, thicker the pipe wall, which leads to an increase in cost);
- natural conditions;
- economic and geographical conditions.

In the course of the analysis, the authors have considered the methods currently used for determining the optimal route of the gas pipeline:

- the method of the average coefficient [6];
- advanced average coefficient method [7];
- selection of the optimal route and multiple routes on the grid between two points [2, 16];
- selection of the optimal route of the pipeline with the use of value maps of determining factors [17];
- model for optimizing gas pipeline routing using genetic algorithms;
- and others [17–31].

When using the method of the average coefficient of the pipeline development (on condition the coefficient of development of the line K_p is set), the length of the route can be calculated from the expression:

$$L \leq K_p \cdot \ell, \quad (1)$$

where L is the maximum path length; K_p is the coefficient of development of the gas pipeline line; ℓ is the length along the geodetic line,

The line bounding the area of the possible position of the pipeline has to be determined so condition (1) is fulfilled. This line represents a curve (or an ellipse), which each point is removed from the source and end point of the pipeline route by a distance, giving in total $K_p \cdot \ell$. Thus, the search area is the area of the territory bounded by an ellipse, the small axis of which b is calculated by the formula (2) [6]

$$b = \ell \sqrt{(K_p^2 - 1)}. \quad (2)$$

The result of using the method of an average data is presented in Fig. 1.

Optimal functioning issues of the inter-settlement gas supply systems are widely covered in the studies of domestic and foreign scientists. For example, in study [6], the author proposes to take into account criteria characterizing the elevation differences on the ground, along with the choice of a route variant with the minimal cost expenditure in a specified time interval. The research of P.P. Borodavkin is very useful for studying the theory of design and construction of the gas pipelines. The authors of this paper have analyzed the main design targets in theoretical terms, showed a large number of conditions for designing a digital model, which allows evaluating the construction conditions in the different climatic and geographical areas, using computer search. Construction

complexity of the gas pipeline lies mainly in the fact that different sections of the route require different design schemes; in addition, a number of factors, such as:

- environmental protection;
- river cross or other water barriers;
- approach to highways, settlements, must be taken into account.

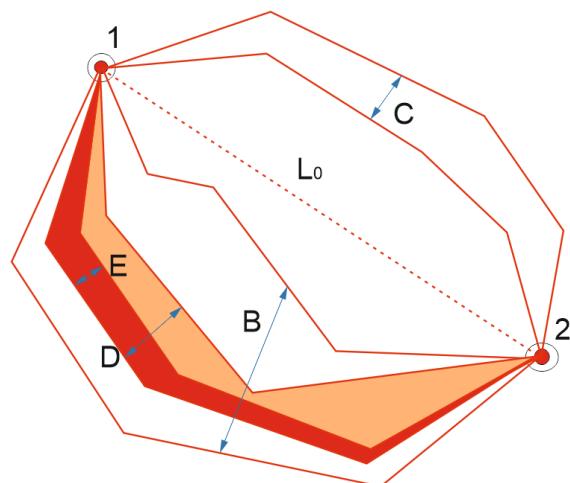


Fig. 1. Graphical interpretation of route optimization: 1, 2 are the starting and ending points of the pipeline route; L_0 is the distance between the starting and ending points along the geodesic line, km; B, C, D, E are the track search areas

Рис. 1. Графическая интерпретация процесса оптимизации трассы: 1, 2 – начальная и конечная точки трассы газопровода; L_0 – расстояние между начальной и конечной точками по геодезической прямой, км; B, C, D, E – области поиска трассы

In the 1980-s and 1990-s, subjective factors were required to create high-quality gas pipeline projects, for instance – designer experience and qualification. At present, for effective selection of the gas pipeline route, forecasting the development of already existing gas networks and improved methods and algorithms the geoinformation technologies (GIS) should be used. GIS allows minimizing the costs and time at the stage of choosing gas pipeline route, modifying the route, making adjustments when the source data changes.

Most of these methods are based on the average coefficient method. The disadvantage of this method is the use of the average coefficient, since the data on the construction conditions may differ from the actual conditions of the new gas pipeline construction. The improved method corrects the errors of the averaged coefficient method by using cost cards, while initially taking into account the cost in actual conditions, and then – the average construction cost. For considerable acceleration of the search process and the amount of information processed, it is necessary to remove the areas unsuitable for construction. Basically, the existing methods for optimizing the laying route use the same methodology with small additions. For example, the method described by R.N. Kuznetsov uses cost cards [17]. To construct the surface of the accumulated value the factors influencing

the route of the gas pipeline are determined and choose significant weight coefficients. Subsequently, cost cards corresponding to the influencing factors are combined into a single cost card, taking into account their relative im-

portance. The differences of the methods are reduced to the choice of the connectivity graph pattern: «rook pattern» (Fig. 2, a); «queen pattern» (Fig. 2, b); «horse pattern» (Fig. 2, c).

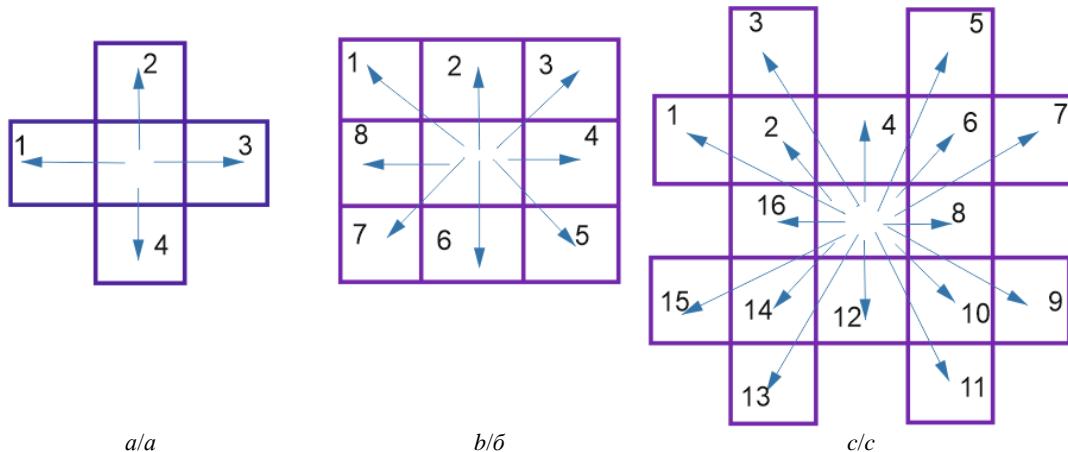


Fig. 2. Templates of connectivity graphs of the next cells: a) «rook pattern»; b) «queen pattern»; c) «horse pattern»;
 → 1, 2, ..., 16 – connecting the neighboring cells by arcs of the graph

Рис. 2. Шаблоны графов связности соседних ячеек: а) «шаблон ладьи»; б) «шаблон ферзя»; в) «шаблон коня»;
 → 1, 2, ..., 16 – соединения соседних ячеек дугами графа

The connectivity graph is constructed by connecting the neighboring cells by arcs of the graph. The «rook pattern» is the simplest for implementation, but its use is not the most universal. The use of the «horse pattern» is more universal, but at the same time, construction of a graph from this pattern requires more resources [17].

At present, the methods of the optimal gas pipeline routing (at the stage of design engineering) are developed rather well. The authors researched the main design tasks in theoretical terms, showed a large number of conditions for creating a digital model, which allows evaluating the conditions of construction in different climatic and geographical areas, using computer search. However, according to the proposed solutions, the pipeline route cannot lay beyond the corridor, chosen at the feasibility study stage of the project.

The complexity of the gas pipeline construction lies mainly in the fact that different sections of the route require the use of various constructive schemes, in addition, it is necessary to consider a number of factors, such as: environmental protection; crossing rivers or other obstructions; approximation to highways, settlements, prospects for the development of gas supply facilities to maintain system performance, etc.

It should be noted, that the solutions obtained by the authors are based on a number of assumptions which existence significantly affects the accuracy of the final results.

The route, calculated by the method of the average coefficient, is not always economically beneficial, due to the fact that there are no restrictions on the angles of slopes and heights of the relief, ecological zones, water barriers and the inability to lay the route directly from point *I* to point *B*. After determining the area of the gas pipeline routing, the territory where the construction of gas pipelines is prohibited is excluded from it. Then there

is an adjustment up to the moment when the track will not meet the standards. In the developed program, we will try to get away from some recalculations in order to immediately mark the territories unsuitable for the construction of the main line.

Using only one criterion for estimating the route shows a one-sided point of view, since the optimal route will be beneficial only for this criterion and will not be the best solution from the influence of other possible criteria.

The main criterion for construction of any engineering networks are the reduced costs, it is a universal criterion for achieving the economic effect

$$C = K \cdot Ie + E,$$

where *K* is the investments; *Ie* is the investment efficiency ratio; *E* is the expenses on operation of an object.

Investments in the construction of the pipeline include the cost of building the linear part of compressor stations, gas distribution stations and other related facilities.

Among the programs for the construction of the gas pipelines we could find independent programs and, in the form of modules (additions), popular design programs, such as AutoCAD. Our task is to develop a program for building the gas pipeline with the possibility to use it for training purposes and at the stage of pre-design calculations [32].

Initially, it is necessary to create a digital terrain model. To do this, let us use the map of the future location of the route and the grid applied on it. Depending on the method of placing the source data, the existing terrain models are divided into: regular (start and final points have known coordinates and are replaced at the nodal points of the geometric grid), irregular (points are uneven on the ground, but with a certain density) and structural (reference points of known coordinates are located at the

turning points of the terrain). The simplest type is rectangular, such grid depends on the search area and is constructed without taking into account topographic conditions and is preferably used for flat terrain.

The currently used algorithms for finding the optimal trace can be divided into three groups:

- wave algorithms based on Li ideas. Widely used in CAD, and allow you to build a route for the existing path;
- high-speed orthogonal algorithms;
- heuristic-type algorithms based on the method of finding a path in a maze.

Our program is based on wave algorithms, or search by width. The algorithm is a uniform search algorithm. It means the search strategy, used in solving the problem, does not use additional information, but only that presented in the definition. The essence of this method is in development of successors and distinguishing between a target and a non-target state.

Width search can be represented as a hierarchical tree (Fig. 3), in which the root node or vertex first develops, then the lower levels of the root node, then the successors are revealed, etc. At the same time, before deploying any nodes at the next level, all nodes at a given depth are revealed.

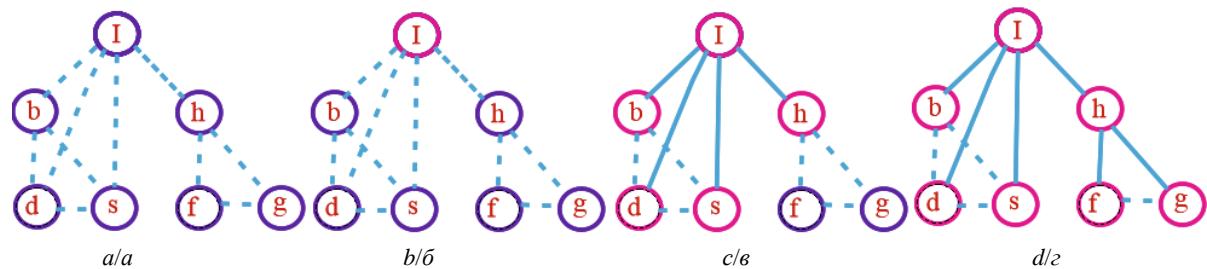


Fig. 3. Image of the hierarchical structure of the wave algorithm: a) hierarchical tree; b) start of the search; c, d) development of the root node, lower levels of the root node, the disclosure of successors; I – the root node; b, h – the lower levels of the root node; d, s, f, g – the successors

Рис. 3. Изображение иерархической структуры волнового алгоритма: а) иерархическое дерево; б) начало поиска; в, г) развитие корневого узла, нижних уровней корневого узла, раскрытие преемников; I – корневой узел; b, h – нижние уровни корневого узла; d, s, f, g – преемники

The wide search functions were selected by sequential viewing of individual levels of the graph, starting from the top. If the considered node is finite, then the search for the optimal variant is completed; otherwise, the node is added to the queue. As a result, after checking all the edges that go out of the vertex, the next node is extracted from the queue and the process repeats.

The description of a similar search looks as follows:

1. An empty queue is placed at the node where the search begins.
2. The node «X» is extracted from the beginning of the queue and marked as expanded, if the node «X» is final (target), then the search is completed. Otherwise, the search continues and successors of node «X» are added to the queue.
3. If there is no queue, all nodes are scanned and the target node is unreachable. As a result, the search fails.
4. Return to paragraph 2.

This structure has a large range of data to check. This is directly proportional to the speed of processing the source data and issuing a response. According to the speed of computation, the program executed by the means of the width search will somewhat lose to other algorithms that are not considered in this study, since there are studies on the basis of these algorithms describing the speed of their action – Dijkstra and A* algorithm. The developed program does not have such a large field of information which can strongly affect the speed of the solution.

To design a program, the programming language GML (GameMakerLanguage) was chosen as intuitive and

easy to use. This programming language provides much more control, than standard actions, contains an extensive library of built-in functions to provide basic functionality. It is possible to create your own scripts that are called in the same way as functions. GML's drawing functions use the Direct3D API. If it is necessary, GML also allows you to call native platform code via extensions (DLL on Windows, Java on Android, JS on HTML5, etc.).

The study field of the program is geographically limited, the Saratov region was chosen as an example of scientific research. Such main gas pipelines pass through the region: Saratov–Moscow, Saratov–Cherepovets and others, and the transcontinental gas pipeline Central Asia – Center with two powerful gas compressor stations: in Aleksandrov Gai and Petrovsk.

The territorial limitation allows reducing the number of soil types for calculations, taken according to «Federal unit prices for general construction work 2001, Earthworks». For example, the surveyed area has a flat character, relatively small fluctuations in the heights of the earth's surface at significant distances and smooth transitions from lows to highs. Flat slopes do not exceed 8–10°. After analyzing the geological map of the area, we get the predominance of sands, sandstones, clay, silt, a small presence of chalk, limestone, which will correspond to groups of soil 1–5. The fifth group of soil (limestone, flasks, etc.) will not be taken into account in the program, since the program is calculated for one type of equipment, and the fifth group of soils is not developed by excavators, other development methods are used for it (drilling and blasting operations, rock cutting).

The most common is underground laying, although in this case there are some problems that increase the unprofitability of the system – for example, laying gas pipelines in mountainous areas, with frequent elevation changes and the possibility of landslides and mudflows, areas with unstable erosional river beds, in permafrost soils with an active upper layer subject to annual freeze and thaw, and a high level of groundwater. This work considers only the underground method.

The choice of the gas pipeline route is based on assessment of a variant of economic feasibility and environmental acceptability from several possible options, taking into account the natural characteristics of the territory, the location of settlements, the occurrence of peatlands, as well as transport routes and communications that may have a negative impact on the main gas pipeline.

Operation principle of the program

The settings window allows setting the grid size (the smaller the set value, the smaller the grid size and the more accurate the calculation and the drawing smoothness), selecting the map scale (1 pixel=N m), setting the distance between compressor stations (from 90 to 125 km), soil cost coefficients, choosing the soil type (initially 1 type was selected, but there are 5 ones in the program). When start and final points of the track are placed, the program starts searching for the shortest path

between these points using the algorithm. The entire grid on the desktop is represented as a graph, with vertices at the points of intersection of the grid lines. An array is created that reads the number of graph edges passed. In order to update the array on the i -th iteration, the program traverses each edge, trying to optimize the distance to the vertices it connects. After finding the shortest path in the graph, the program uses the shortest path by pixels to the input, which allows you to find the path more accurately than when using a single algorithm. Then the program begins to calculate the route and immediately lay it. Every 0,03 seconds, the program checks the new ability to build a shorter path and accurately takes into account the distance traveled by the marker, draws the path and sets the markers of the compressor (gas distribution) stations. After completion of the analysis, the program calculates the distance, counts the cost and builds graphs.

As an example of the program's efficiency, the construction of a gas-main pipeline from Atkarsk to Volsk, the Saratov Region, is considered. Using the visibility coefficients obtained from the local estimate for the construction of a gas pipeline, we enter values for each soil group. Further, according to the map color on the substrate of the program, we mark the groups of soils and designate insurmountable barriers and conservation zones (Fig. 4).

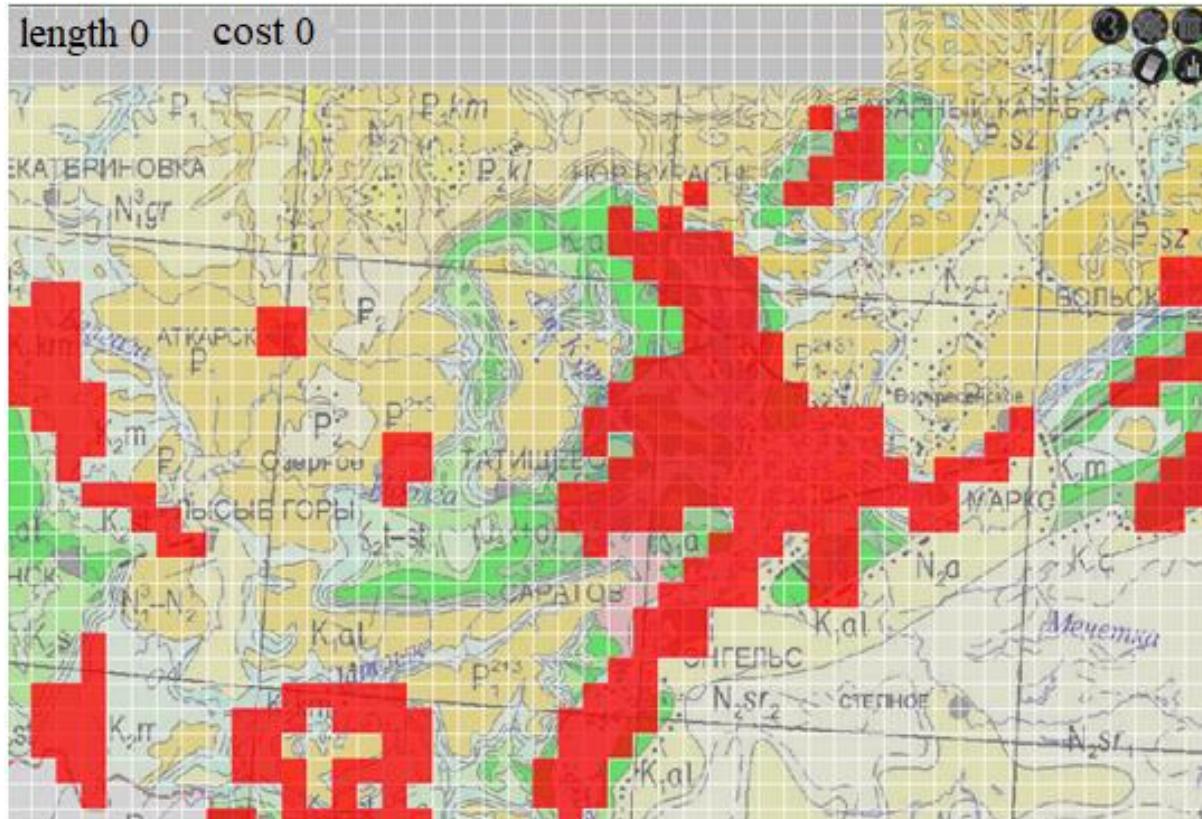


Fig. 4. Program map with the marked «red» type of soil

Рис. 4. Карта программы с отмеченным на ней «красным» типом грунта

Fig. 5 shows the possibility of changing the cost of construction of the gas pipeline due to the changes in the soil type. Next, the program selects the start and final

points of the path, as soon as the final point is set, the program will begin making a path.

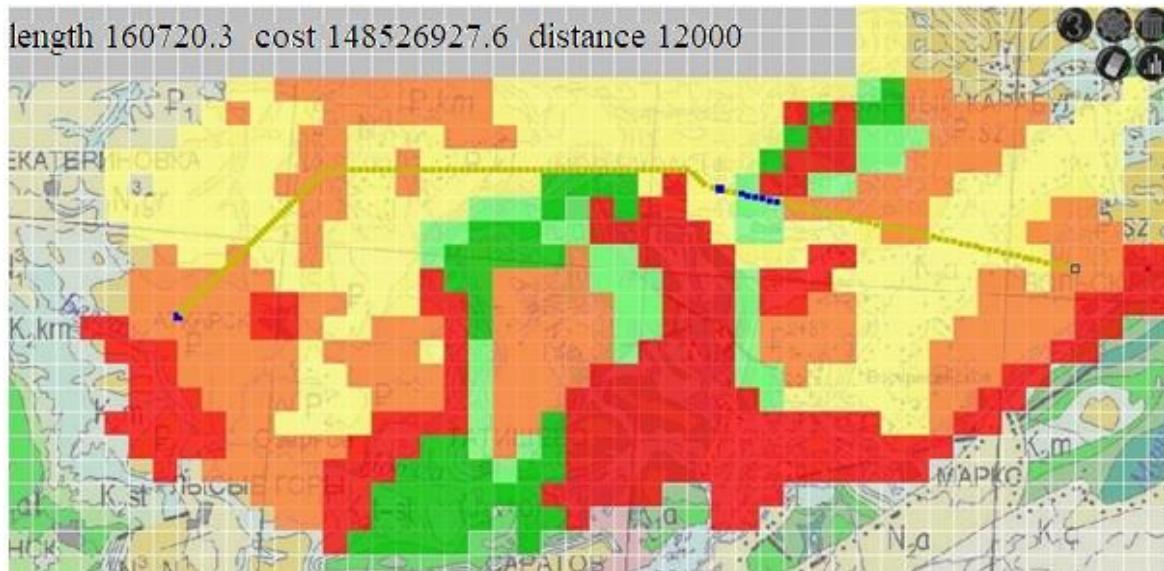


Fig. 5. Calculation in the program (first example) [32]

Рис. 5. Расчет в программе (первый пример) [32]

The first result: the soils are displayed according to the actual data of the map. The scale was taken approximately. It was laid for 4 km in the direction of the square. The automatic calculation of the route showed the following results (Fig. 5): the distance of the route of the main

gas pipeline is 160,720 km, and the cost is 148,53 million rubles.

The second result (Fig. 6): the route was extended to 166,586 km, and the cost increased to 183,44 million rubles with randomly generated terrain.

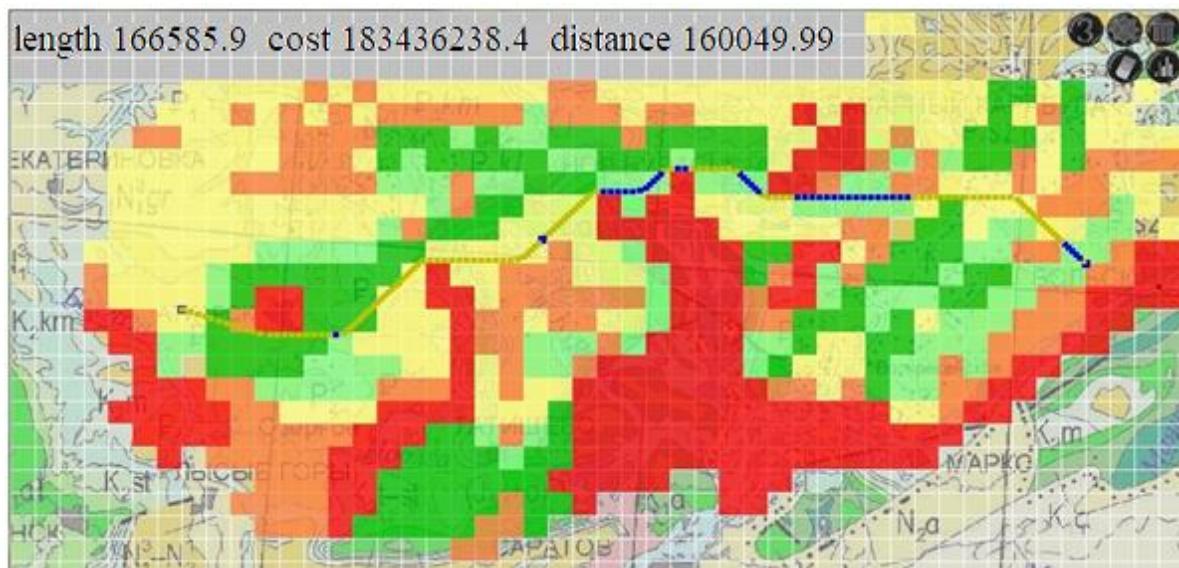


Fig. 6. Calculation in the program (second examples) [32]

Рис. 6. Расчет в программе (второй пример) [32]

The total cost of the route includes the total cost of laying the pipeline in various soils and the cost of compression stations.

Results and discussion

Let us consider the operation of the program in comparison with the actually existing object with the following characteristics: the high-pressure polyethylene gas pipeline of 0,6 MPa from the gas-distribution substation in the Kharitonovka village to the Tselinny village of the Perelyubsky district of the Saratov region (Fig. 7).

The diameter of the pipeline is 225 mm, the length is 3575 m. The cost of construction in terms of current prices was 1,130 million rubles. According to the geological structure, in the area from the gas-distribution substation in the Kharitonovka village to the Tselinny village, the soils are represented by dark brown soft plastic (humified) loams and covered with a slight soil layers to 0,1–0,2 m.

To use the program, you need to find the soil cost coefficients, for which it is necessary to calculate the estimated cost per 1 km of a 225 mm polyethylene pipeline. As a result, the following coefficients were obtained:

$\kappa_1=51$, $\kappa_2=46$, $\kappa_3=43$, $\kappa_4=39$. We set the scale and size of the grid. To obtain the actual distance according to the calculations, we should use the grid size of 16 and a scale

of 7. We mark the area with the color marks (Fig. 8). We put points *I* and *B* according to the real object and observe the result (Fig. 8, 9).

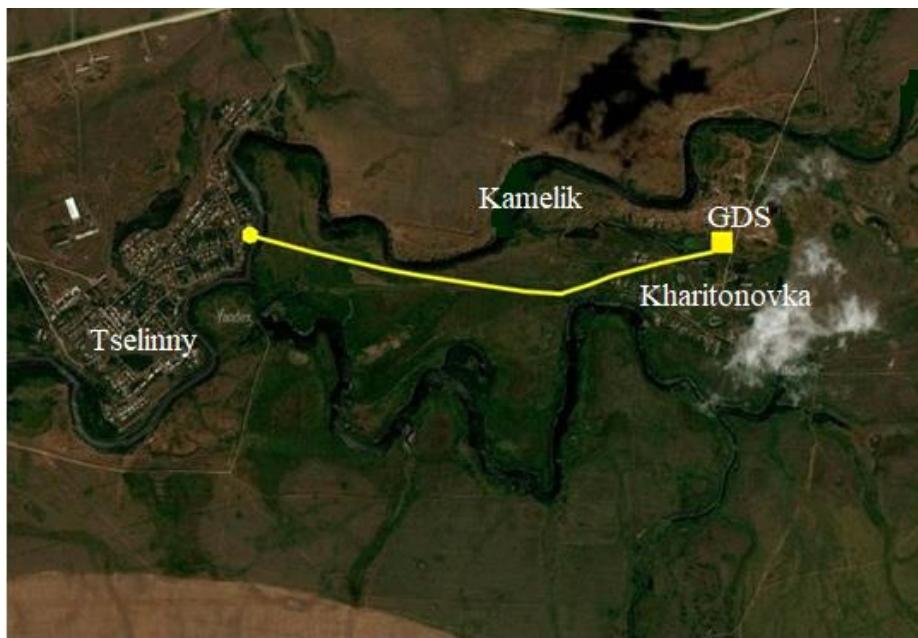


Fig. 7. Polyethylene gas pipeline from the gas-distribution substation in the Kharitonovka village to the Tselinny village
Рис. 7. Полиэтиленовый газопровод от АГРС с. Харитоновка до п. Целинный

We obtained the following results: the route constructed by the program turned out to be shorter than the actual route, with the lengths being 3212 and 3575, respectively, m; and the laying cost 1,264 million and 1,130 million rubles.

To calculate the soil permeability coefficient, it is necessary to carry out an estimate calculation (per kilometer of gas pipeline, taking into account the work, depending on the soil group).

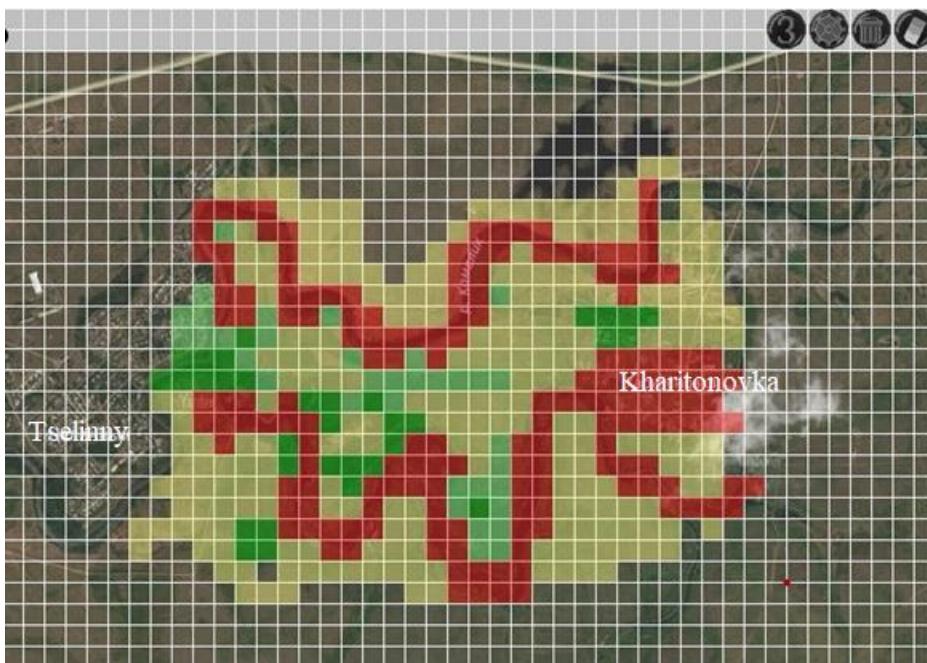


Fig. 8. Area marking
Рис. 8. Разметка местности

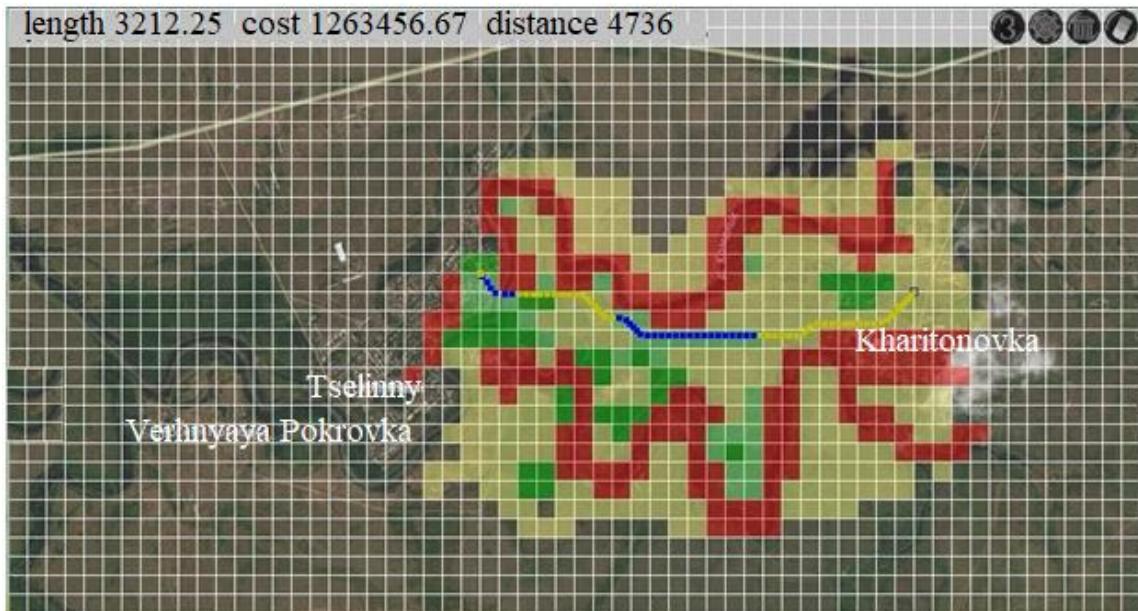


Fig. 9. Route constructed by the program [32]
Рис. 9. Трасса, построенная с помощью программы [32]

After calculating the estimate, we find the visibility factor of the increased cost of construction in different soil groups, obtained by converting a series of values in relation to one of them (baseline), taken as 1; 100; 1000, etc.

So, for the considered case, taking a line from the estimated calculation with the values «Total estimated cost» we find that the construction costs of 1 km of the pipeline are:

- in the 1st soil group – 1067278,79 rubles, visibility factor $H_1 - 1,37$;
- in the 2nd soil group – 948324,82 rubles, visibility factor $H_2 - 1,22$;
- in the 3rd soil group – 881826,68 rubles, visibility factor $H_3 - 1,13$;
- in the 4th soil group – 777832,79 rubles, the visibility factor $H_4 - 1,00$.

The program introduced five groups of soils with appropriate coefficients. As a result, five areas of color selection were taken:

- 1 – marked in green – zone with the 1st soil group;
- 2 – marked in bright green color – zone with the 2nd soil group (type of soil);
- 3 – marked in yellow – zone with the 3rd soil group (type of soil);
- 4 – marked in orange – zone with the 4th soil group (type of soil);
- 5 – marked in red – insurmountable barriers (residential areas, ecological zone, water protection zone, not included 5 soil group, etc.).

REFERENCES

1. Douglas D.H. Least cost path in GIS using an accumulated cost surface and slope lines. *Cartographica*, 1994, vol. 31, no. 3, pp. 37–51.
2. Medvedeva O.N., Frolov V.O. Solving the optimization problem of the basic parameters of regional gas supply systems. *Bulletin of Civil Engineers*, 2010, no. 3 (24), pp. 65–68. In Rus.
3. Kang J.Y., Lee B.S. Optimization of pipeline route in the presence of obstacles based on a least cost path algorithm and Laplacian smoothing. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2017, vol. 9, pp. 492–498.
4. Byron S. Risk-based pipeline routing improves success probability. *OIL & GAS JOURNAL*, 2003, vol. 108, Iss. 24, pp. 58–64.

Conclusion

Continuous supply of the fuel and energy resources to the Russian regions largely depends on the reliability of the gas transmission system. Fundamental knowledge, experience in the construction and operation of the gas supply systems, development of applied sciences allow us to simulate efficient energy supply systems of a new level, endowed with a high degree of reliability, safety and environmental friendliness.

After analyzing the modern methods of laying the main and linear gas networks, we come to the conclusion that the existing practice of designing gas pipelines (in a straight line from the initial to the final reference point) is not always optimal and economical. The cost of construction of a small length of the pipeline, which is difficult in terms of construction, installation and special works, often turns out to be higher than the cost of constructing a multi-kilometer bypass on the site with normal laying conditions. Therefore, at the choice of the pipeline route, it is necessary to take into account all factors affecting the cost of installation. At the same time for the effective functioning of the gas transmission system the strategic planning and preliminary technical and economic assessment of construction works are of great importance. The proposed method for software construction of the gas pipeline route has informational character. The program can be used in the design of engineering networks for various purposes, for educational purposes and, with appropriate revision, for implementation in the practice of design. As a mathematical basis for creating a model, the theory of wave algorithms is used. It allows determining the spatial location of various engineering networks.

5. Bohong W., Meng Y., Yamin Y., Ke Y., Haoran Zh., Yongtu L. Optimal design of an oil pipeline with a large-slope section. *Engineering Optimization*, 2019, vol. 51, Iss. 9, pp. 1480–1494.
6. Borodavkin P.P., Berezin B.L., Ruderman S.Yu. *Vybor optimalnykh trass magistralnykh truboprovodov* [Selection of optimal routes for pipelines]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 240 p.
7. Molochko A.V., Zhuchkov P.S. Imitating modeling of emergency situation risk during accident on model part of gas main (with Petrovskiy district of Saratov region as an example) with GIS technologies application. *Izvestiya of Saratov university. New series. Series: Earth Science*, 2011, vol. 11, Iss. 2, pp. 20–27. In Rus.
8. Huseynli Sh. *Determination of the most suitable oil pipeline route using GIS least cost path analysis*. Dis. for the Degree of Master of Science in Geospatial Technologies. Nebraska State, USA, 2015. 65 p. Available at: <https://run.unl.pt/bitstream/10362/14553/1/TGE00138.pdf> (accessed 3 September 2019).
9. Aissi H., Chakhar S., Mousseau V. GIS-based multicriteria evaluation approach for corridor siting. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2012, vol. 39, Iss. 2, pp. 287–307.
10. Chakhar S., Martel J. Enhancing geographical information systems capabilities with multi-criteria evaluation functions. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 2003, vol. 7, no. 2, pp. 47–71.
11. Jankowski P. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1995, vol. 9, no. 3, pp. 251–273.
12. Marcoulaki E.C., Papazoglou I.A., Pixopoulos N. Integrated framework for the design of pipeline systems using stochastic optimisation and GIS tools. *Chemical Engineering Research and Design*, 2012, vol. 90, no. 12, pp. 2209–2222.
13. Yakar F., Celik F. A highway alignment determination model incorporating GIS and Multi-Criteria Decision Making. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2014, vol. 18, pp. 1847–1857.
14. Abudu D., Williams M. GIS-based optimal route selection for oil and gas pipelines in Uganda. *ACSIJ Advances in Computer Science: an International Journal*, 2015, vol. 4, Iss. 4, no. 16, pp. 93–104.
15. Thill J.-Cl., Dragicevic S. *Geo computational analysis and modeling of regional systems*. Springer, 2017. 410 p.
16. Medvedeva O.N. The selection of gas pipeline route on the plan of gas supplied area. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*, 2010, no. 3 (19), pp. 60–67. In Rus.
17. Kuznetsov I.S., Kuznetsov R.N., Gorsikh A.A. Search for least-cost engineering network routing. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*, 2009, no. 4 (16), pp. 31–38. In Rus.
18. Durmaz A.İ., Ünal E.Ö., Aydin C.C. Automatic pipeline route design with multi-criteria evaluation based on least-cost path analysis and line-based cartographic simplification: a case study of the mus project in Turkey. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, vol. 8, p. 173.
19. Yildirim V., Yomralioglu T., Nisanci R., Çolak H.E., Bediroğlu Ş., Saralıoglu E. A spatial multicriteria decision-making method for natural gas transmission pipeline routing. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2017, vol. 13, Iss. 5, pp. 567–580.
20. Balogun A.L., Matori A.N., Hamid-Mosaku A.I. A fuzzy multicriteria decision support system for evaluating subsea oil pipeline routing criteria in East Malaysia. *Environmental Earth Sciences*, 2015, vol. 74, pp. 4875–4884.
21. Wan J., Qi G., Zeng Zh., Sun Sh. The application of AHP in oil and gas pipeline route selection. *19th International Conference on Geoinformatics*, 2011. pp. 1–4. Available at: https://www.researchgate.net/publication/252026994_The_application_of_AHP_in_oil_and_gas_pipeline_route_selection (accessed 3 September 2020).
22. Armstrong M.P., Xiao N., Bennett D.A. Using genetic algorithms to create multicriteria class intervals for choropleth maps. *Annals of the Association of American Geographers*, 2003, vol. 93, Iss. 3, pp. 595–623.
23. Hopkins L. Design method evaluation – an experiment with corridor selection. *Socio-Economic Planning Sciences*, 1973, vol. 5, Iss. 7, pp. 423–436.
24. Zhou J., Liang G., Deng T., Gong J. Route optimization of pipeline in gas-liquid two-phase flow based on genetic algorithm. *International Journal of Chemical Engineering*, 2017. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/ijce/2017/1640303/> (accessed 3 September 2020).
25. Mahini A., Abedian S. Routing of road network through least cost pathway algorithm to minimize impacts on environment. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2014, vol. 42, pp. 517–527.
26. Cano-Acosta A., Fontecha J., Velasco N., Muñoz-Giraldo F. Shortest path algorithm for optimal sectioning of hydrocarbon transport pipeline. *IFAC – PapersOnLine*, 2016, vol. 49, Iss. 12, pp. 532–537.
27. Zhang Z., Xiantao L. Study on optimal operation of natural gas pipeline network based on improved genetic algorithm. Study on optimal operation of natural gas pipeline network based on improved genetic algorithm. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, vol. 9 (8), pp. 1–8.
28. Cui X., Shi H. Direction oriented pathfinding in video games. *International Journal of Artificial Intelligence & Applications*, 2011, vol. 2, no. 4, pp. 1–11.
29. Baiocco J.S., De Lima Jr. M.H.A., Albrecht C.H., De Lima B.S.L.P., Jacob B.P., Rocha D.M. Optimal design of submarine pipelines by a genetic algorithm with embedded on-bottom stability criteria. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018. 21 p. Available at: <https://doi.org/10.1155/2018/1781758> (accessed 3 September 2020).
30. Yang J., Jiang Ya. Application of modified NSGA-II to the transit network design problem. *Journal of Advanced Transportation*, 2020. 24 p. Available at: <https://doi.org/10.1155/2020/3753601> (accessed 3 September 2020).
31. Bohong W., Yongtu L., Taicheng Z., Meng Yu., Haoran Zh. Optimisation of a downstream oil supply chain with new pipeline route planning. *Chemical Engineering Research and Design*, 2019, vol. 145, pp. 300–313.
32. Medvedeva O.N., Melnikova V.D., Melnikov D.A. Postroenie optimalnogo marshruta prokladki trassy gazoprovoda [Construction of an optimal route for laying a gas pipeline route]. *Computer program*, no. 2018663234, 2018.

Received: 23 December 2020.

Information about the authors

Oksana N. Medvedeva, Dr. Sc., professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Valeriya D. Penenko, master, engineer, AO «Giproniigaz» (Joint Stock Company).

УДК 622.692.4

МАРШРУТЫ ПРОКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

Медведева Оксана Николаевна¹,
medvedeva-on@mail.ru

Пененко Валерия Дмитриевна²,
isabel16122012@gmail.com

¹ Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,
Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

² АО «Гипронигаз»,
Россия, 410012, г. Саратов, пр. им. Кирова С.М., 54.

Актуальность. Проектирование маршрута прокладки газопровода является важным этапом процесса планирования и строительства газопровода. Существуют различные методы, зависимости и алгоритмы, характеризующие функциональную составляющую газопроводов, различные способы прокладки. Самым важным в процессе проектирования является выбор такого оптимального маршрута, при котором эффективность применения будет высокой и при этом проект будет иметь минимальные капитальные вложения в строительство. Несмотря на множество предлагаемых подходов, в настоящее время единой методики по определению оптимальных затрат на строительство и реконструкцию газораспределительных сетей не существует.

Цель: провести сравнительный анализ существующих алгоритмов построения оптимального трубопроводного пути, разработать программы моделирования и обоснования рациональных маршрутов прокладки трубопроводных систем газоснабжения на основе однокритериального подхода.

Методы. В основу разработанной программы заложены волновые алгоритмы, или поиск в ширину, являющийся одним из методов обхода графа. Это означает, что в стратегии поиска при решении задачи не используется дополнительная информация, а только та, что представлена в определении. Суть этого метода – вырабатывать преемников и различать целевое и нецелевое состояние узла.

Результаты и выводы. Рассмотрев и проанализировав современные способы прокладки магистральных газовых сетей и способы прокладки линейной части, можно сделать вывод, что существующая практика трассировки магистральных газопроводов не всегда предполагает использование оптимальный вариант. Стоимость сооружения небольшого по протяженности, но сложного с точки зрения проведения строительно-монтажных и специальных работ, участка газопровода зачастую оказывается выше стоимости сооружения многокилометрового обхода на участке с нормальными условиями прокладки. Поэтому при выборе трассы магистрального газопровода необходимо учитывать все факторы, влияющие на стоимость прокладки. Предложенная методика носит ознакомительный характер программного построения трассы газопровода. Представленное описание программного комплекса позволяет рассчитать положение линейного сооружения на местности на основе однофакторного подхода – привязки критерия стоимости к сложности разработки разных групп грунта.

Ключевые слова:

Газоснабжение, оптимальная трасса, проектирование маршрута, волновой алгоритм, магистральный газопровод, среднестатистический метод, цифровая модель местности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Douglas D.H. Least cost path in GIS using an accumulated cost surface and slope lines // Cartographica. – 1994. – V. 31. – № 3. – P. 37–51.
- Медведева О.Н., Фролов В.О. Решение задачи оптимизации основных параметров региональных систем газоснабжения // Вестник гражданских инженеров. – 2010. – № 3 (24). – С. 131–133.
- Kang J.Y., Lee B.S. Optimisation of pipeline route in the presence of obstacles based on a least cost path algorithm and Laplacian smoothing // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. – 2017. – V. 9. – P. 492–498.
- Byron S. Risk-based pipeline routing improves success probability // OIL & GAS JOURNAL. – 2003. – V. 108. – № 24. – P. 58–64.
- Optimal design of an oil pipeline with a large-slope section / W. Bohong, Y. Meng, Y. Yamin, Y. Ke, Zh. Haoran, L. Yongtu // Engineering Optimization. – 2019. – V. 51. – Iss. 9. – P. 1480–1494.
- Бородавкин П.П., Березин В.Л., Рудерман С.Ю. Выбор оптимальных трасс магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1974. – 240 с.
- Молочки А.В., Жучков П.С. Имитационное моделирование риска чрезвычайной ситуации при аварии на участке магистрального газопровода (на примере Петровского района Саратовской области) с использованием геоинформационных технологий // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. – 2011. – Т. 11. – Вып. 2. – С. 20–27.
- Huseynli Sh. Determination of the most suitable oil pipeline route using GIS least cost path analysis: dissertation submitted in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Master of Science in Geospatial Technologies. – Nebraska State, USA, 2015. – 65 p. URL: <https://run.unl.pt/bitstream/10362/14553/1/TGEO0138.pdf> (дата обращения 03.09.2019).
- Aissi H., Chakhar S., Mousseau V. GIS-based multicriteria evaluation approach for corridor siting // Environment and Planning B: Planning and Design. – 2012. – V. 39. – № 2. – P. 287–307.
- Chakhar S., Martel J M. Enhancing geographical information systems capabilities with multi-criteria evaluation functions // Journal of Geographic Information and Decision Analysis. – 2003. – V. 7. – № 2. – P. 47–71.
- Jankowski P. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods // International Journal of Geographical Information Systems. – 1995. – V. 9. – № 3. – P. 251–273.
- Marcoulaki E.C., Papazoglou I.A., Pixopoulos N. Integrated framework for the design of pipeline systems using stochastic optimisation and GIS tools // Chemical Engineering Research and Design. – 2012. – V. 90. – № 12. – P. 2209–2222.

13. Yakar F., Celik F. A highway alignment determination model incorporating GIS and multi-criteria decision making // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2014. – V. 18. – P. 1847–1857.
14. Abudu D., Williams M. GIS-based optimal route selection for oil and gas pipelines in Uganda // ACSIJ Advances in Computer Science: International Journal. – 2015. – V. 4. – Iss. 4. – № 16. – P. 93–104.
15. Thill J.-Cl., Dragicevic S. Geo Computational Analysis and Modeling of Regional Systems. – Springer, 2017. – 410 p.
16. Медведева О.Н. Выбор трассировки газопровода на плане газоснабжающей территории // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2010. – № 3 (19). – С. 60–67.
17. Кузнецков И.С., Кузнецков Р.Н., Горских А.А. Поиск маршрута прокладки инженерных сетей с наименьшей стоимостью // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2009. – № 4 (16). – С. 31–38.
18. Durmaz A.İ., Ünal E.Ö., Aydin C.C. Automatic pipeline route design with multi-criteria evaluation based on least-cost path analysis and line-based cartographic simplification: a case study of the mus project in Turkey // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2019. – V. 8. – P. 173.
19. A spatial multicriteria decision-making method for natural gas transmission pipeline routing / V. Yildirim, T. Yomralioğlu, R. Nisancı, H.E. Çolak, S. Bediroğlu, E. Saralioğlu // Structure and Infrastructure Engineering. – 2017. – V. 13. – Iss. 5. – P. 567–580.
20. Balogun A.L., Matori A.N., Hamid-Mosaku A.I. A fuzzy multicriteria decision support system for evaluating subsea oil pipeline routing criteria in East Malaysia // Environmental Earth Sciences. – 2015. – V. 74. – P. 4875–4884.
21. The application of AHP in oil and gas pipeline route selection / J. Wan, G. Qi, Z. Zeng, Sh. Sun // 19th International Conference on Geoinformatics. – 2011. – P. 1–4. URL: https://www.researchgate.net/publication/252026994_The_application_of_AHP_in_oil_and_gas_pipeline_route_selection (дата обращения 03.09.2020).
22. Armstrong M.P., Xiao N., Bennett D.A. Using genetic algorithms to create multicriteria class intervals for choropleth maps // Annals of the Association of American Geographers. – 2003. – V. 93. – Iss. 3. – P. 595–623.
23. Hopkins L.D. Design method evaluation – an experiment with corridor selection // Socio-Economic Planning Sciences. – 1973. – V. 5. – Iss. 7. – P. 423–436.
24. Route optimization of pipeline in gas-liquid two-phase flow based on genetic algorithm / J. Zhou, G. Liang, T. Deng, J. Gong // International Journal of Chemical Engineering. – 2017. URL: <https://www.hindawi.com/journals/ijce/2017/1640303/> <https://www.hindawi.com/journals/ijce/2017/1640303/> (дата обращения 03.09.2020).
25. Mahini A., Abedian S. Routing of road network through least cost pathway algorithm to minimize impacts on environment // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. – 2014. – V. 42. – P. 517–527.
26. Shortest path algorithm for optimal sectioning of hydrocarbon transport pipeline / A. Cano-Acosta, J. Fontecha, N. Velasco, F. Muñoz-Giraldo // IFAC – PapersOnLine. – 2016. – V. 49. – Iss. 12. – P. 532–537.
27. Zhang Z., Xiantao L. Study on optimal operation of natural gas pipeline network based on improved genetic algorithm Study on optimal operation of natural gas pipeline network based on improved genetic algorithm // Advances in Mechanical Engineering. – 2017. – V. 9 (8). – P. 1–8.
28. Cui X., Shi H. Direction oriented pathfinding in video games // International Journal of Artificial Intelligence & Applications (IJAIA). – 2011. – V. 2. – № 4. – P. 1–11.
29. Optimal design of submarine pipelines by a genetic algorithm with embedded on-bottom stability criteria / J.S. Baioco, M.H.A. de Lima Jr., C.H. Albrecht, B.S.L.P. de Lima, B.P. Jacob, D.M. Rocha // Mathematical Problems in Engineering. – 2018. – 21 p. URL: <https://doi.org/10.1155/2018/1781758> (дата обращения 03.09.2020).
30. Yang J., Jiang Ya. Application of modified NSGA-II to the transit network design problem // Journal of Advanced Transportation. – 2020. – 24 p. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/3753601> (дата обращения 03.09.2020).
31. Optimisation of a downstream oil supply chain with new pipeline route planning / W. Bohong, L. Yongtu, Z. Taicheng, Yu. Meng, Zh. Haoran // Chemical Engineering Research and Design. – 2019. – V. 145. – P. 300–313.
32. Построение оптимального маршрута прокладки трассы газопровода: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018663234; заявл. 07.05.2018; опубл. 24.10.2018, Бюл. № 11. – 1 с.

Поступила 23.12.2020 г.

Информация об авторах

Медведева О.Н., доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теплогазоснабжения, вентиляции, водообеспечения и прикладной гидрогазодинамики Института Урбанистики, архитектуры и строительства Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А.

Пененко В.Д., магистр техники и технологий, инженер, АО «Гипронигаз».

УДК 631.445+504.05

ТАЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ГОРОДСКИХ ПОЧВАХ: ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА

Жарикова Елена Анатольевна,
ejarikova@mail.ru

Федеральный научный центр Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии Дальневосточного отделения РАН,
Россия, 690022, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью выявления особенностей накопления тяжелых металлов в почвах урболовандшафтов Владивостока и Уссурийска и установления величины потенциального экологического риска.

Целью работы является оценка геохимического состояния почв различных функциональных зон урболовандшафтов с использованием нескольких индексов загрязнения.

Методы. Валовое содержание элементов в почвах определяли методом рентгенфлуоресцентного анализа на спектрометре EDX-800HS (Shimadzu).

Результаты. Под влиянием сильной техногенной нагрузки в верхних горизонтах почв урболовандшафтов в наибольшей степени накапливаются хром, медь, цинк и свинец. Содержание ванадия, кобальта и никеля сравнимо с кларком или ниже его. Средние и максимальные значения комплексных коэффициентов загрязнения PLI и NPI свидетельствуют о деградации поверхностного слоя городских почв и сильной степени загрязнения тяжелыми металлами. Потенциальный экологический риск колеблется от незначительного до среднего. Степень загрязнения почв различных функциональных зон увеличивается в следующем ряду: рекреационная < многоэтажной застройки < транспортно-селитебная < малоэтажной застройки, уровень загрязнения варьирует от оценки «чистая почва» до оценки «сильно загрязненная почва». В некоторых почвах рекреационной зоны выявлена слабая аккумуляция хрома, цинка и меди. В почвах зоны многоэтажной застройки во Владивостоке обнаружено накопление хрома, меди, свинца и цинка (от слабого до среднего), а в Уссурийске отмечено только накопление меди. В почвах транспортно-селитебной зоны и зоны малоэтажной застройки с разной степенью интенсивности аккумулируются хром, медь, свинец и цинк. Более высокие значения как индивидуальных (I_{geo} , EF, PI), так и комплексных показателей загрязнения (NPI, PLI, PERI) выявлены в почвах Владивосток.

Ключевые слова:

Почвы урболовандшафтов, поллютанты, тяжелые металлы, экологический риск, индекс загрязнения почв.

Введение

Результатом широкого распространения и взаимосвязи процессов урбанизации и промышленного производства стало снижение качества атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод и почв во всем мире. Активное жилищное и хозяйственное строительство, развитие транспортной сети, проведение новых и ремонт существующих коммуникаций приводят к деградации городских почв и зеленых насаждений. Промышленные выбросы и неуклонно возрастающее количество автотранспорта являются причиной аккумуляции различных токсических веществ в поверхностном слое почв урболовандшафтов. Но защитная буферная способность почв небезгранична и может быть утрачена в течение относительно небольшого временного промежутка в результате неправильного использования и нерационального управления. Осознание значимости почвы как базового компонента всех наземных экосистем привело к признанию необходимости сохранения ее потенциала для выполнения ее разнообразных функций, в том числе средообразующей и средоохранной [1–5].

Следствием загрязнения почв может являться ухудшение комфортности среды обитания и здоровья городских жителей, снижение инвестиционной привлекательности жилых и общественно-деловых кварталов. Микро частицы почв и содержащиеся в них токсиканты способны стать причиной недомогания и различных болезней при проникновении в организм человека, особенно у детей и пожилых людей [6, 7].

Поэтому на результаты мониторинга состояния городских почв (особенно параметры химического состава верхних горизонтов) следует обращать внимание при планировании строительства и обустройства лечебных, оздоровительных и детских организаций.

Многолетние данные подтверждают, что на здоровье жителей городов Приморского края непосредственное влияние оказывает низкое качество атмосферного воздуха, способствуя развитию различных заболеваний [8, 9]. Хотя в последние годы в городах края и наблюдается тренд к снижению загрязнения атмосферного воздуха промышленными предприятиями, доля выбросов автомобильного транспорта неуклонно увеличивается, высокими остаются показатели запыленности воздуха [10, 11]. В атмосферных взвесях городов юга Дальнего Востока выявлено значительное содержание тонких частиц, в состав которых входят и различные тяжелые металлы [12]. А состав пыли во многом зависит от химического состава городских почв. При этом на изменение элементного состава почв непосредственное влияние оказывают численность населения и особенности городского ландшафта, а именно: размещение промышленного производства, транспортной сети, селитебных и рекреационных зон [13–16].

Для выявления геохимического состояния и характера загрязнения почв в настоящее время в мире широко применяются различные показатели, как простые (индекс геоаккумуляции I_{geo} , коэффициент концентрации EF, индивидуальный индекс загрязне-

ния PI), так и комплексные (общий индекс загрязнения PLI, показатель потенциального экологического риска PERI и др.) [17, 18]. Использование разноплановых характеристик загрязнения почв урболандшафтов и установление экологических рисков их воздействия на сопредельные среды не только способствуют выявлению пространственного распределения загрязнения тяжелыми металлами почв жилых и производственных зон селитебных территорий, но и предоставляют базовую информацию для принятия решений по исправлению ситуации в отношении загрязненных районов.

Целью работы является оценка геохимического состояния почв различных функциональных зон урболандшафтов с использованием нескольких индексов загрязнения.

Объекты и методы

Исследование элементного состава почв было проведено во Владивостоке, промышленном и портовом городе, и в Уссурийске, промышленном и сельскохозяйственном центре Приморского края. Согласно классификации селитебных территорий [1], это ландшафты населенных пунктов регионального и местного значения. Города были основаны в конце XIX в., поэтому с исторической точки зрения их почвы представляют собой новые молодые компоненты окружающей среды. Названия почв даны в соответствии с «Классификацией и диагностикой почв России» [19], городских почв – по Т.В. Прокофьевой с соавторами [13].

Владивосток располагается на пологих склонах сопок южной части полуострова Муравьева-Амурского, почвы развиты на элювиально-делювиальных отложениях коренных пород с низким содержанием мелкозема. Уссурийск лежит в южной части Приханкайской равнины, почвообразующими породами служат четвертичные отложения преимущественно тяжелого состава. Лето теплое, с обилием осадков. Зима малоснежная, умеренно холодная, ветреная. Сумма активных температур 2400–2200°, гидротермический коэффициент 1,6–2,0 [20].

В рекреационных зонах с хорошо развитым травяным покровом (парки, пригородные леса) преобладают естественные и поверхностно антропогенно-преобразованные почвы: буроземы типичные и урбостратифицированные. В зоне малоэтажной застройки метеоклиматические условия (увлажнение, скорость и направление ветров и температура) близки к естественным, площадь искусственного покрытия невелика, хорошо развит травянистый покров и древесная растительность. Значительные площади приусадебных участков занимают огороды и сады, поэтому в почвенном покрове доминируют агроземы структурно-метаморфические (Владивосток), агроземы текстурно-дифференцированные (Уссурийск) и урбостратоземы среднемощные на антропогенных отложениях (шлак). Искусственная расчлененность рельефа зоны многоэтажной застройки является причиной особого микроклимата, в частности ветрового и температурного режимов. Эти факторы оказывают прямое воздействие на жизнеспособность и видовой

состав травянистого напочвенного покрова. Поскольку значительная часть этой зоны защищена твердым покрытием, большая часть почвенного покрова антропогенно преобразована, и в нем преобладают различной мощности урбостратоземы. Отдельные горизонты в этих почвах отличны по цветовой гамме, гранулометрическому составу, твердости и плотности, количеству привнесенных антропогенных включений. Почвы транспортно-селитебной зоны (преимущественно придорожных газонов и рекультивированных склонов) относятся к глубоко антропогенно-преобразованным, преобладают урбостратоземы ма-ломощные и среднемощные.

Объектами данного исследования являются верхние горизонты городских почв. В рекреационной зоне Владивостока было отобрано 9 образцов, Уссурийска – 7, в зоне малоэтажной застройки – 9 и 7, в зоне многоэтажной застройки – 13 и 11, в транспортно-селитебной зоне – 11 и 7 образцов, соответственно. Отбор смешанных почвенных образцов из поверхностного гумусового горизонта (глубина 0–10 см) осуществлялся на площадках мониторинга (размером 5×5 м) (методом конверта из пяти точек) пластмассовым шпателем. Пробы тщательно диспергировались и перемешивались, масса объединенной пробы составляла не менее 1 кг [21]. Подготовка почвенных проб и определение элементного анализа выполнены по аттестованной методике [22].

Элементный состав образцов (в трехкратной повторности) проводили методом энергодисперсионной рентгенфлуоресцентной спектроскопии (energy dispersive X-ray fluorescence spectroscopy) на анализаторе EDX 800HS-P (Shimadzu, Япония), оснащенном родиевым катодом в формате количественного анализа в вакуумной среде. Использовались государственные стандартные образцы сравнения (ГСО 901-76, ГСО 902-76, ГСО 903-76, ГСО 2498-83, ГСО 2499-83, ГСО 2507-83). Через каждые пять проб проводился анализ стандартного образца (ГСО 2507-83). Параметры измерения: напряжение – 50 кВ, сила тока – 100 мА, время определения – 300 с, «мертвое» время – 20 %, размер коллиматора – 10 мм. Метод обладает высокой точностью, нижний предел обнаружения метода не более 3–4 мг/кг [23]. В почвенных пробах определяли валовое содержание тяжелых металлов разных классов опасности V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb и Ti как эталонного элемента.

Все образцы почв имеют легкосуглинистый гранулометрический состав с преобладанием фракции крупной пыли, слабокислую и нейтральную реакцию среды и содержат различные по количеству и качеству следы жизнедеятельности населения, в том числе мусор (как строительный, так и коммунальный), печную золу и т. д. [24–26]. Все химико-аналитические работы выполнены автором в аналитическом центре ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН.

Индекс геоаккумуляции (Geoaccumulation Index) служит геохимическим критерием для выявления загрязнения

$$I_{geo} = \log_2(C_i/1,5 \text{ GB}),$$

где C_i – содержание металла в верхнем горизонте; GB – фоновое содержание (или кларк в почве), в настоящей работе использованы данные [23]. Он ранжирует семь классов состояния почв: $I_{geo} < 0$ – чистые; $0 < I_{geo} < 1$ – загрязнение от слабого до среднего; $1 < I_{geo} < 2$ – средняя степень загрязнения; $2 < I_{geo} < 3$ – загрязнение от среднего до сильного; $3 < I_{geo} < 4$ – сильное загрязнение; $4 < I_{geo} < 5$ – загрязнение от сильного до очень сильного; $5 < I_{geo}$ – очень сильное загрязнение. Коэффициент 1,5 применяется для выявления даже незначительного антропогенного воздействия [27].

Коэффициент концентрации EF (Enrichment Factor) вычисляется для определения накопления и происхождения металла в почве (природное или антропогенное), при этом учитывается содержание какого-либо стабильного эталонного элемента, в нашем случае титана (C_{Ti}),

$$EF = (C_i/C_{Ti})/(GB_i/GB_{Ti}).$$

Он позволяет выявить пять уровней накопления металла: минимальное ($EF < 2$), среднее (2–5), значительное (5–20), очень высокое (20–40), чрезвычайно высокое (>40) [17, 18].

Индекс загрязнения (Single Pollution Index),

$$PI = C_i/GB.$$

Используется для выявления наличия загрязнения отдельными поллютантами. Значение $PI < 1$ свидетельствует об отсутствии загрязнения, $1 < PI < 2$ – о слабом загрязнении, $2 < PI < 3$ – о среднем, $3 < PI < 5$ – о сильном, $PI > 5$ – об очень сильном загрязнении. Индекс является основой для расчета комплексных показателей загрязнения [17, 18].

PLI – коэффициент загрязнения (Pollution Load Index), рассчитывается как геометрическое среднее от PI

$$PLI = (PI_1 * PI_2 * \dots * PI_n)^{1/n}.$$

Коэффициент указывает на совокупную аккумуляцию тяжелых металлов. Значение PLI ниже 1,0 свидетельствует об отсутствии загрязнения [28, 29].

Таблица 1. Тяжелые металлы в городских почвах Владивостока и Уссурийска (мг/кг)

Table 1. Heavy metal concentrations in urban soils of Vladivostok and Ussuriysk (mg/kg)

Показатели/Statistics	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	PI
Владивосток/Vladivostok							
Минимум/Minimum	50	80	10	10	10	60	10
Максимум/Maximum	150	130	20	90	250	1070	470
Среднее/Mean	94	92	16	29	81	259	89
Медиана/Median	90	92	20	20	70	186	50
Стандартная ошибка/Standard error	3,73	3,73	0,77	2,54	6,58	31,99	14,61
Коэффициент вариации/Coefficient of variation, %	26	11	33	56	53	80	106
Уссурийск/Ussuriysk							
Минимум/Minimum	50	70	10	10	40	11	10
Максимум/Maximum	130	260	40	100	240	890	410
Среднее/Mean	89	94	15	29	81	156	61
Медиана/Median	90	90	10	25	70	100	35
Стандартная ошибка/Standard error	3,58	5,24	1,21	2,81	8,26	27,21	15,11
Коэффициент вариации/Coefficient of variation, %	23	31	47	56	55	102	143
Харбин/Harbin [35]	–	32,86	–	39,82	24,29	58,22	24,29
Чанчунь/Changchun [35]	–	94,53	–	–	68,41	416,71	93,26
Фоновое содержание (кларк)/Geochemical background (clarke) [27]	129	59,5	11,3	29	38,9	70	27
Кларк в городских почвах/Clarks in urban soils [1]	104,9	80	14,1	33	39	158	54,5

Показатель потенциального экологического риска (Potential Ecological Risk)

$$PERI = \sum PI_i * T_i,$$

где T_i – коэффициент токсичности тяжелого металла. Значения T_i для Zn, V, Cr, Co, Pb, Ni, Cu равны 1, 2, 2, 5, 5, 5 соответственно [30, 31]. Значение PERI < 90 означает низкий уровень экологической опасности, 90–180 – средний, 180–360 – высокий, 360–720 – очень высокий, >720 – чрезвычайно высокий [17, 32, 33].

Индекс загрязнения Nemerow (NPI) (Nemerow Pollution Index) очень широко используется для оценки качества почв, поскольку учитывает вклад не только каждого загрязнителя, но и потенциальную опасность металла-загрязнителя с наибольшим содержанием.

$$NPI = \sqrt{0,5(PI_{max}^2 + PI_{ave}^2)},$$

где PI_{max} – максимальное значение PI среди n металлов, а PI_{ave} – среднее значение PI. NPI ранжирует пять классов загрязнения почв: $NPI < 0,7$ – чистая почва, $0,7 \leq NPI < 1,0$ – пограничный уровень, $1,0 \leq NPI < 2,0$ – слабое загрязнение, $2,0 \leq NPI < 3,0$ – среднее, $NPI > 3$ – сильное загрязнение [17, 18].

Результаты исследования и обсуждение

В почвах Владивостока среднее содержание цинка и свинца значительно выше, чем в почвах Уссурийска, содержание ванадия, хрома, кобальта, никеля и меди отличается незначительно (табл. 1). По сравнению с кларком почвы селитебных районов почвы Владивостока обогащены хромом, медью, цинком, свинцом, а почвы Уссурийска – медью. Содержание кобальта и никеля сравнимо с кларком, а содержание ванадия ниже его [27]. Величины коэффициента вариации характеризуют как однородную степень рассеяния для ванадия, хрома и кобальта, не дифференцированную для никеля и меди, сильно неоднородную для цинка (во Владивостоке) и крайне неоднородную для цинка (в Уссурийске) и свинца в обоих городах [33]. Подобное неоднородное распределение в отношении свинца и цинка в верхнем слое городских почв может быть результатом значительного техногенного прессинга [34].

При сравнении содержания исследуемых опасных элементов в почвах городов близлежащей пограничной провинции Хейлунцзян (Китай) установлено, что в почвах Харбина содержание тяжелых металлов намного ниже (кроме никеля), а почвы Чанчуня сильнее загрязнены цинком и свинцом и меньше медью [35], чем почвы городов южной части Приморья.

Анализ значений индексов геоаккумуляции I_{geo} показал, что большинство почв Владивостока и Уссурийска в отношении ванадия, кобальта, никеля характеризуются как чистые, в отношении хрома, меди, цинка и свинца – умеренно загрязненные, хотя максимальные значения для последних трех элементов указывают на высокий уровень загрязнения (табл. 2). Средние значения коэффициента концентрации EF в городских почвах позволяют установить, что накопление ванадия, никеля, кобальта, хрома, меди (во

Владивостоке) минимально, а накопление свинца, цинка, меди (в Уссурийске) среднее. Максимальные значения EF свидетельствуют о значительном обогащении отдельных образцов почв свинцом, цинком и медью. Средние показатели индекса загрязнения PI характеризуют почвы как чистые в отношении ванадия и никеля (во Владивостоке), слабо загрязненные в отношении хрома, кобальта и никеля (в Уссурийске), загрязненные в средней степени в отношении меди, цинка и свинца (в Уссурийске) и сильно загрязненные в отношении цинка и свинца (во Владивостоке). Эти данные вполне согласуются с содержанием металлов в составе атмосферного воздуха городов [12]. Максимальные показатели указывают на среднюю степень загрязнения в отношении хрома, кобальта и никеля и очень высокую степень в отношении меди, цинка и свинца в отдельных образцах почв обоих городов.

Таблица 2. Статистические показатели отдельных индексов в поверхностных слоях городских почв

Table 2. Statistics of single indexes in the urban soils

Показатели/Statistics	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb
I_{geo}							
Владивосток/Vladivostok							
Минимум/Minimum	-1,95	-0,16	-0,76	-2,12	-2,54	-0,81	-2,02
Максимум/Maximum	-0,37	0,54	0,24	1,05	2,09	3,35	3,54
Среднее/Mean	-1,09	0,04	-0,19	-0,81	0,31	0,93	0,53
Уссурийск/Ussuriysk							
Минимум/Minimum	-1,09	-0,35	-0,76	-2,12	-0,54	-3,25	-2,12
Максимум/Maximum	-0,57	1,54	1,24	1,21	2,04	3,08	3,34
Среднее/Mean	-1,17	0,04	-0,31	-0,75	0,39	0,12	-0,15
EF							
Владивосток/Vladivostok							
Минимум/Minimum	0,47	0,89	0,61	0,21	0,22	0,82	0,37
Максимум/Maximum	0,78	2,31	2,22	2,76	8,01	13,36	17,41
Среднее/Mean	0,64	1,43	1,26	0,91	1,96	3,31	3,31
Уссурийск/Ussuriysk							
Минимум/Minimum	0,52	0,94	0,66	0,26	0,76	0,19	0,28
Максимум/Maximum	0,71	2,75	2,35	3,35	7,73	7,99	13,63
Среднее/Mean	0,62	1,46	1,19	0,95	2,12	2,01	2,14
PI							
Владивосток/Vladivostok							
Минимум/Minimum	0,39	1,34	0,88	0,34	0,26	0,86	0,38
Максимум/Maximum	1,16	2,18	1,77	3,11	6,43	15,29	17,41
Среднее/Mean	0,73	1,54	1,39	0,99	2,07	3,69	3,31
Уссурийск/Ussuriysk							
Минимум/Minimum	0,39	1,18	0,88	0,34	1,03	0,16	0,37
Максимум/Maximum	1,01	4,37	3,54	3,45	6,17	12,71	15,19
Среднее/Mean	0,69	1,59	1,33	1,01	2,23	2,22	2,28

Значения комплексных коэффициентов загрязнения PLI и NPI, как средние, так и максимальные, свидетельствуют о деградации поверхностного слоя городских почв и сильной степени загрязнения тяжелыми металлами. При этом средние значения потенциального экологического риска PERI характеризуют его как незначительный, а максимальные как средний (табл. 3). Анализ значений коэффициентов геоаккумуляции I_{geo} позволил установить основные закономерности содержания различных тяжелых металлов в верхнем горизонте почв различных городских зон (рис. 1). В почвах рекреационных зон Владивостока выявлено загрязнение от слабого до среднего уровня в отношении хрома и цинка, в Уссурийске подобное загрязнение установлено в отношении меди, для остальных тяжелых металлов значения I_{geo} отрица-

тельные, что указывает на чистоту почв. Наименьшие значения коэффициентов геоаккумуляции обнаружены в обоих городах для ванадия и никеля.

В зоне малоэтажной застройки отмечено накопление хрома и меди, для обоих металлов загрязнение варьирует от слабого до среднего, свинца (загрязнение от слабого до среднего в Уссурийске) и цинка (средняя степень загрязнения в Уссурийске и загрязнение от среднего до сильного во Владивостоке). В отношении ванадия, кобальта, никеля почвы данной зоны характеризуются как чистые.

Почвы зоны многоэтажной застройки во Владивостоке обогащены хромом, медью, свинцом и цинком (загрязнение от слабого до среднего). В Уссурийске подобный уровень загрязнения установлен только в отношении меди, остальные элементы имеют нулевое

(хром) и отрицательное значение I_{geo} , наименьшие показатели присущи ванадию, никелю и свинцу. В почвах транспортно-селитебной зоны Владивостока отмечено накопление хрома, меди, цинка и свинца, т. е. выявлено загрязнение от слабого до среднего.

В Уссурийске подобное загрязнение установлено для хрома, меди и свинца. В почвах всех зон Владивостока выявлена аккумуляция цинка, а в почвах Уссурийска – меди. Значения I_{geo} в отношении свинца во Владивостоке повсеместно выше, чем в Уссурийске.

Таблица 3. Статистические показатели комплексных показателей загрязнения в городских почвах
Table 3. Statistics of total complex indexes in the urban soils

Показатели Statistics	NPI		PLI		PERI	
	Уровень Value	Оценка загрязнения Pollution status	Уровень Value	Оценка загрязнения Pollution status	Уровень Value	Экологический риск Ecological risk
Владивосток/Vladivostok						
Минимум Minimum	1,2	Слабое/Slight	0,7	Отсутствует No metal contamination	18	Незначительный Low
Максимум Maximum	12,7	Сильное/Heavy	2,8	Деградация Deterioration of soil quality	123	Средний Moderate
Среднее Mean	3,4	Сильное/Heavy	1,4	Деградация Deterioration of soil quality	50	Незначительный Low
Уссурийск/Ussuriysk						
Минимум Minimum	1,1	Слабое/Slight	0,7	Отсутствует No metal contamination	19	Незначительный Low
Максимум Maximum	11	Сильное/Heavy	3,1	Деградация Deterioration of soil quality	102	Средний Moderate
Среднее Mean	2,9	Сильное/Heavy	1,3	Деградация Deterioration of soil quality	41	Незначительный Low

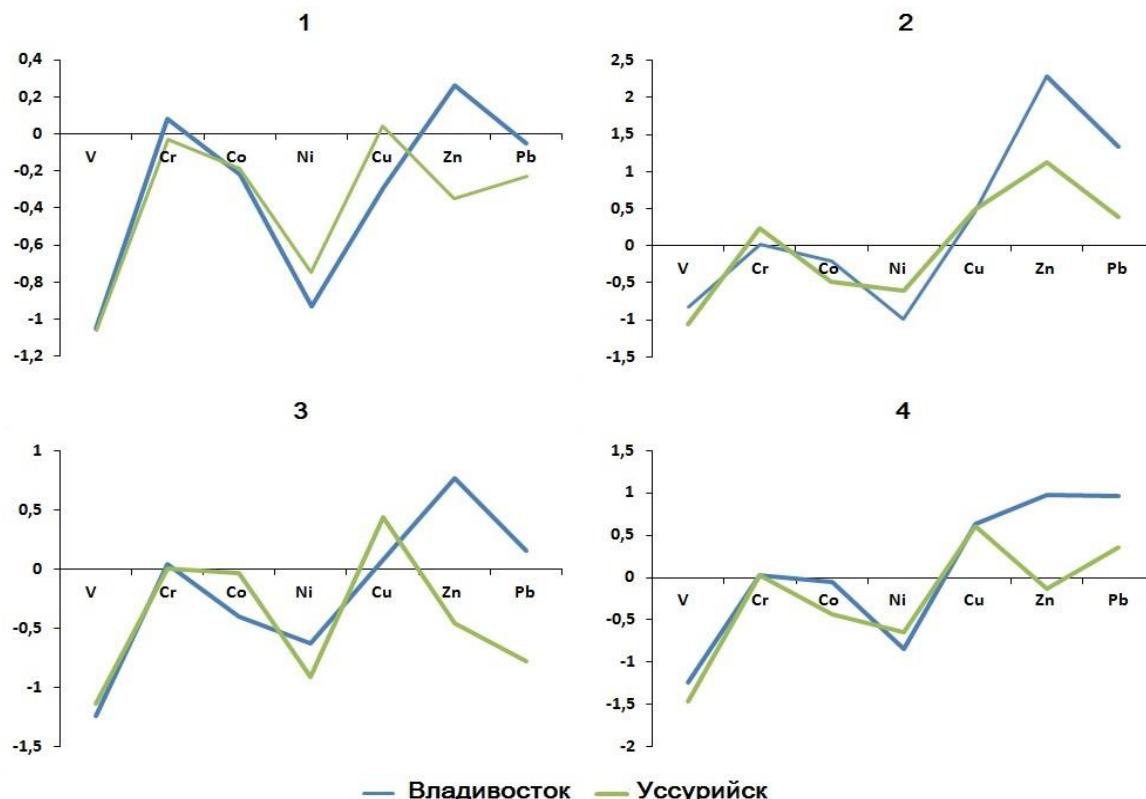
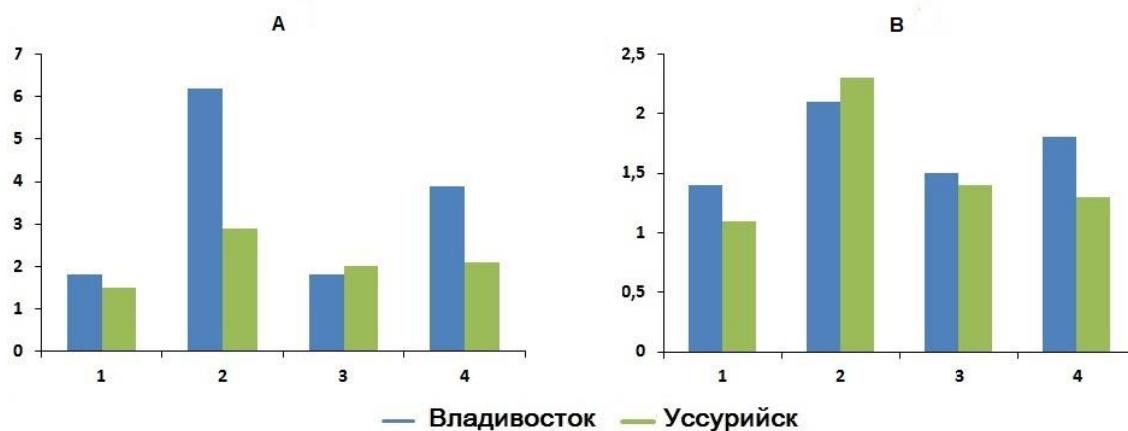


Рис. 1. Значения коэффициентов геоаккумуляции I_{geo} в почвах различных функциональных зон городов: 1 – рекреационная, 2 – малоэтажной застройки, 3 – многоэтажной застройки, 4 – транспортно-селитебная

Fig. 1. I_{geo} in urban soils of different functional zones: 1 – recreational, 2 – low-rise buildings, 3 – residential multistory, 4 – transport and residential

Судя по значениям комплексного индекса загрязнения (Nemerow NPI) степень загрязнения почв в обоих городах возрастает в следующем порядке: рекреационная зона (1,5–1,8, слабое загрязнение) < зона многоэтажной застройки (1,8–2,0, слабое загрязнение во Владивостоке и среднее в Уссурийске) < транспортно-селитебная зона (2,1–3,9, среднее загрязнение в Уссурийске и сильное во Владивостоке) < зона малоэтажной застройки (2,9–6,2, среднее загрязнение в Уссурийске и сильное во Владивостоке) (рис. 2). Анализ значений коэффициента загрязнения PLI несколько иначе характеризует ситуацию, хотя порядок нарастания загрязнения в различных зонах остается прежним. Подтвержден факт загрязнения почв во всех зонах городов, но самые высокие значения PLI получены для почв малоэтажной застройки Уссурийска. Средние значения потенциального экологического риска PERI позволяют оценить его как незначительный во всех зонах обоих городов, а максимальные – как средний в зонах транспортно-селитебной и малоэтажной застройки Владивостока (123 и 107) и в зоне малоэтажной застройки Уссурийска (102).

Более высокий уровень загрязнения почв зоны малоэтажной застройки может быть вызван сочетанием нескольких факторов. Большинство домохозяйств в зоне малоэтажной застройки имеют печное отопление, угольная пыль и шлак, так же как и продукты сжигания бытового мусора, накапливаются в почвах приусадебных участков. Последние могут содержать до 6500 мг/кг цинка, до 4000 мг/кг меди, до 1600 мг/кг свинца, до 640 мг/кг хрома. Угольная зола в среднем содержит 120 мг/кг ванадия, 45 мг/кг меди, 18 мг/кг кобальта, 36 мг/кг никеля, 65 мг/кг меди, 142 мг/кг цинка [36], в золе ТЭЦ-2 Владивостока обнаружено 30–50 мг/кг цинка, 7–50 мг/кг меди, 5–600 мг/кг кобальта, 3–80 мг/кг никеля [37]. В составе угольной пыли может находиться 30–100 мг/кг ванадия, 10–100 мг/кг хрома, 30–100 мг/кг кобальта и меди, 40–200 мг/кг никеля, 50–290 мг/кг цинка и 45–300 мг/кг свинца [38]. Следует обратить внимание и на тот факт, что повсеместно в зимний период городские коммунальные службы для отсыпки дорог и тротуаров в зоне многоэтажной застройки и транспортно-селитебной зоне используют шлак, который весной с талыми водами попадает на газоны и придомовые участки, загрязняя почвы и увеличивая количество пыли в воздухе.



Rис. 2. Средние значения индекса загрязнения Nemerow NPI (A) и коэффициента загрязнения PLI (B) в почвах различных функциональных зон. Условные обозначения см. на рис. 1

Fig. 2. Average Nemerow Pollution Index (A) and Pollution Load Index (B) in urban soils of different functional zones. For symbols see Fig. 1

На приусадебных садах и огородах жители активно и бесконтрольно используют широкий ассортимент продукции сельскохозяйственной химии, в которой в виде примесей содержатся тяжелые металлы. Так, в фосфорных удобрениях содержание хрома находится в пределах 10,4–72,7 мг/кг, меди – 2,8–82,6 мг/кг, цинка – 8,8–180,6 мг/кг, никеля – 7,0–26,9 мг/кг, свинца – 5,1–30,7 мг/кг, ванадия – до 38 мг/кг [39]. Азотные удобрения содержат кобальта 5,4–2,0 мг/кг, никеля – 7,0–34,2 мг/кг, свинца – 2,44–48,7 мг/кг, меди – до 14 мг/кг, а калийные удобрения – от 11 до 16 мг/кг никеля и от 1,39 до 17,4 мг/кг свинца [40, 41]. Органические удобрения также являются источником поллютантов. Содержание хрома в навозе может достигать 55 мг/кг, а в компосте – 400 мг/кг, никеля – 30 и 279 мг/кг, меди – 172 и 3500 мг/кг, цинка – 556 и 5894 мг/кг, свинца – 27 и 2240 мг/кг [42].

Таким образом, следствием отсутствия канализации и централизованного отопления, широкого небалансированного применения населением минеральных и органических удобрений является депонирование значительного количества тяжелых металлов в почвах зоны малоэтажной застройки. Продукция, полученная на приусадебных участках, может представлять опасность для потребителей.

Заключение

Использование различных расчетных параметров загрязнения, несмотря на некоторые различия в оценке степени загрязнения отдельными элементами, позволило выявить детальную картину пространственно-го распределения тяжелых металлов в почвах урболовандшافتов. Почвы урболовандшрафтов находятся под влиянием сильной техногенной нагрузки. В наиболь-

шей степени в них накапливаются хром, медь, цинк и свинец, при этом более высокие значения всех показателей загрязнения выявлены в почвах Владивостока. Средние и максимальные значения комплексных коэффициентов загрязнения PLI и NPI указывают на деградацию поверхностного слоя городских почв и сильную степень загрязнения тяжелыми металлами. Величина индекса потенциального экологического риска варьирует от незначительной до средней. Степень загрязнения почв различных функциональных зон увеличивается в следующем ряду: рекреационная < многоэтажной застройки < транспортно-селитебная < малоэтажной застройки, при этом уровень загряз-

нения колеблется от оценки «чистая» до оценки «сильно загрязненная».

Рациональное использование городских земельных ресурсов предполагает учет сведений о состоянии и свойствах почв различных функциональных зон. Отказ от использования этих данных может привести к неоправданным материальным затратам и снижению комфортности и безопасности среды обитания горожан.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-05-00086-А).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеенко В.А., Алексеенко А.В. Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитебных ландшафтов. – Ростов н/Д: Изд-во Южного федерального университета, 2013. – 380 с.
2. Trace metal contamination in urban soils of China / X.S. Luo, S. Yu, Y.G. Zhu, X.D. Li // Science of the Total Environment. – 2012. – V. 421–422. – P. 17–30.
3. Brevik E.C., Sauer T.J. The past, present, and future of soils and human health studies // Soil. – 2015. – 1. – P. 35–46.
4. Risk assessment and interpretation of heavy metal contaminated soils on an urban brownfield site in New York metropolitan area / Y. Qian, F. Gallagher, Y. Deng, M. Wu, H. Feng // Environmental Science and Pollution Research. – 2017. – V. 24. – P. 23549–23558.
5. Donga R., Jiab Z., Lia S. Risk assessment and sources identification of soil heavy metals in a typical county of Chongqing Municipality, Southwest China // Process Safety and Environmental Protection. – 2018. – V. 3. – P. 275–281.
6. Экологическое состояние городских почв и стоимостная оценка земель / М.Н. Строганова, Т.В. Прокофьева, А.Н. Прокоров, Л.В. Лысак, А.П. Сизов, А.С. Яковлев // Почвоведение. – 2003. – № 7. – С. 867–875.
7. Seleznev A.A., Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P. Urban geochemical changes and pollution with potentially harmful elements in seven Russian cities // Scientific Reports. – 2020. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-58434-4> (дата обращения 10.06.2020).
8. Савченко О.В., Тюпелев П.А. Особенности микрэлементного статуса у детей, проживающих в районах города с разной степенью загрязнения окружающей среды // Экология человека. – 2009. – № 1. – С. 47–50.
9. Наумов Ю.А., Подкопаева О.В. Особенности, тенденции и последствия загрязнения атмосферы городов Приморского края // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2013. – № 4. – С. 155–171.
10. Ежегодник. Загрязнение почв России токсикантами промышленного происхождения в 2015 году. – Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2016. – 112 с.
11. Доклад об экологической ситуации в Приморском крае в 2018 году. – Владивосток, 2019. – 252 с.
12. Чугаева Н.А., Шишлова Т.М. Сравнительная оценка содержания металлов в составе взвешенных частиц атмосферного воздуха г. Уссурийска // Вестник Северо-восточного научного центра ДВО РАН. – 2015. – № 3. – С. 94–98.
13. Введение почв и почвоподобных образований городских территорий в классификацию почв России / Т.В. Прокофьева, М.И. Герасимова, О.С. Безуглова, К.А. Бахматова А.А. Гольева, С.Н. Горбов, Е.А. Жарикова, Н.Н. Матинян, Е.Н. Наквасина, Н.Е. Сивцева // Почвоведение. – 2014. – № 10. – С. 1115–1164.
14. Калманова В.Б. Экологический каркас урбанизированных территорий (на примере города Биробиджана) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18. – № 2. – С. 385–388.
15. Содержание тяжелых металлов в почвах селитебных территорий Республики Крым / Е.В. Евстафьева, А.М. Богданова, Т.М. Минкина, С.Н. Сушкова, Н.В. Барановская, С.С. Ман-
- джиева, Е.М. Антоненко // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 10. – С. 19–29.
16. Изменение элементного состава верхнего горизонта почв под воздействием предприятий нефтегазопереработки / В.В. Боев, Н.В., Барановская В.А. Боев, М.Т. Джамбаев, Т.С. Шахова, Л.В. Жорняк // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 11. – С. 179–191.
17. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. A review / J.B. Kowalska, R. Mazurek, M. Gasiorek, T. Zaleski // Environmental Geochemistry and Health. – 2018. – V. 40. – P. 2395–2420.
18. Concentration, spatial distribution, contamination degree and human health risk assessment of heavy metals in urban soils across China between 2003 and 2019 – a systematic review / S. Tong, H. Li, L. Wang, M. Tudi, L. Yang // International Journal Environmental Research and Public Health. – 2020. – V. 17. – P. 3099. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph17093099> (дата обращения 14.06.2020).
19. Классификация и диагностика почв России / Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. – Смоленск: Ойкумена, 2004. – 342 с.
20. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Приморский край. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – Ч. 1–6. – Вып. 26. – 416 с.
21. ГОСТ 17.4.4.02.2017 Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – М.: Стандартинформ, 2018. – 21 с.
22. М-02-0604-2007 Методика выполнения измерений массовой доли кремния, кальция, титана, ванадия, хрома, бария, марганца, железа, никеля, меди, цинка, мышьяка, стронция, свинца, циркония, молибдена в порошковых пробах почв и донных осадков рентгеноспектральным методом с применением энергодисперсионных рентгенофлуоресцентных спектрометров типа EDX фирмы Shimadzu. – Спб., 2007. – 17 с.
23. Savichev A.T., Vodyanitskii Yu.N. Evaluation of chemical elements contents in soils below the detection limit for X-ray fluorescence analysis and their distribution laws // X-ray fluorescence technology, performance and application. – New York: Nova science publishers, 2018. – P. 89–115.
24. Жарикова Е.А. Почвы Владивостока: основные характеристики и свойства // Вестник ДВО РАН. – 2012. – № 3. – С. 67–73.
25. Жарикова Е.А. Эколого-геохимическое состояние почв рекреационных территорий Уссурийска // Вестник ДВО РАН. – 2014. – № 5. – С. 78–85.
26. Жарикова Е.А. Особенности агрехимических свойств и элементного состава почв урбанизированных ландшафтов (на примере г. Уссурийска) // Вестник Алтайского ГАУ. – 2019. – № 3. – С. 71–76.
27. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4th ed. – Boca Raton: CRS Press, 2011. – 548 p.
28. Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River // Geo Journal. – 1969. – V. 2. – P. 108–118.
29. Problems in the assessment of heavy metals in estuaries and the formation pollution index / D.C. Tomlinson, J.G. Wilson, C.R. Harris, D.W. Jeffrey // Helgoland Marine Research. – 1980. – V. 33. – P. 566–575.

30. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research.* – 1980. – V. 14 (8). – P. 975–1001.
31. Characterizing pollution and source identification of heavy metals in soils using geochemical baseline and PMF approach / H.H. Jiang, L.M. Cai, H.H. Wen, J. Luo // *Scientific Reports.* – 2020. – 10:6460. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63604-5> (дата обращения 10.06.2020).
32. Varol M. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques // *Journal of Hazardous Materials.* – 2011. – V. 195. – P. 355–364.
33. Методические указания к выполнению цикла лабораторных работ с элементами научных исследований по курсу «математические методы в геохимических исследованиях» для студентов специальности 08.01.04 (специализация – геология и разведка месторождений радиоактивных и редких элементов). – Томск: Изд-во ТПУ, 1994. – 38 с.
34. Environmental quality and sources of heavy metals in the topsoil based on multivariate statistical analyses: a case study in Laiwu City, Shandong Province, China / L. Yu, J. Cheng, J. Zhan, A. Jiang // *Natural Hazards.* – 2016. – V. 81. – P. 1435–1445.
35. Surface dust heavy metals in the major cities, China / L. Yang, G. Zhu, H. Pan, P. Shi, J. Li, Y. Liu, H. Tong // *Environmental Earth Science.* – 2017. – V. 76. – P. 757–771.
36. Сайет Ю.Е., Баршакевич И.Л., Ревич Б.А. Методические рекомендации по геохимической оценке источников загрязнения окружающей среды. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 111 с.
37. Зверева В.П., Крупская Л.Т. Оценка влияния золоотвалов теплозаводов на объекты окружающей среды (на юге Дальнего Востока) // *Экологическая химия.* – 2012. – Т. 21. – С. 225–233.
38. Медико-биологическое исследование влияния угольной пыли как фактора интоксикации / Д.В. Фоменко, Е.В. Уланова, К.Г. Громов, А.С. Казицкая, О.И. Бондарев // *Бюллетень ВЧНЦ СО РАМН.* – 2006. – № 1. – С. 278–283.
39. Chen M., Graedel T.E. The potential for mining trace elements from phosphate rock // *Journal of Cleaner Production.* – 2015. – V. 91. – P. 337–346.
40. Trace element composition of selected fertilizers used in Chile: phosphorus fertilizers as a source of long-term soil contamination / M. Molina, F. Aburto, R. Calder, M. Cazanga, M. Escudero // *Soil and Sediment Contamination.* – 2009. – V. 18. – P. 497–511.
41. Senesi M., Polemio M. Trace element addition to soil by application of NPK fertilizers // *Fertilizer Research.* – 1981. – V. 2. – P. 289–302.
42. Toxic metals in soil-plant systems / Ed. by S.M. Ross. – Chichester, England; New York: Wiley, 1994. – 469 p.

Поступила 03.07.2020 г.

Информация об авторах

Жарикова Е.А., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Федерального научного центра Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии Дальневосточного отделения РАН.

UDC 631.445+504.05

ASSESSMENT OF HEAVY METALS CONTENT AND ENVIRONMENTAL RISK IN URBAN SOILS

Elena A. Zharikova,
ejarikova@mail.ru

Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, 159, 100-letiya Vladivostoka avenue, Vladivostok, 690022, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to reveal the features of accumulation of heavy metals in the soils of the urban landscapes of Vladivostok and Ussuriysk and to establish the value of the potential environmental risk.

The main aim of the work is to assess the geochemical state of soils in various functional zones of urban landscapes using several pollution indices.

Methods. The total content of trace elements in soils was determined by x-ray fluorescence spectroscopy using an EDX-800HS (Shimadzu) spectrometer.

Results. Chromium, copper, zinc and lead are accumulated to the greatest extent in the upper soil horizons of urban landscapes under the influence of a strong technogenic load. The content of vanadium, cobalt, and nickel is comparable to or lower than clark. The average and maximum values of complex pollution coefficients PLI and NPI indicate the degradation of the surface layer of urban soils and a strong degree of heavy metal pollution. The value of the potential environmental risk index varies from small to medium. The soil pollution level in various functional zones increases in the following series: recreational zone<zone of multi-storey buildings<transport and residential zone<zone of low-rise buildings, while the level of pollution varies from the assessment of «clean» to the assessment of «highly polluted». Weak accumulation of chromium, zinc and copper was detected in some soils of recreational zones. A noticeable increase in the content of various heavy metals was found in the soils of Vladivostok multi-storey development zone, increase in the copper content was noted in Ussuriysk. Chromium, copper, lead and zinc are accumulated in the soils of transport and residential zone and low-rise buildings zone with varying degrees of intensity. Higher values of both individual (I_{geo} , EF, PI) and complex pollution indicators (NPI, PLI, PERI) were found in the soils of Vladivostok.

Key words:

Urban landscape soils, pollutants, heavy metals, environmental risk, pollution index.

The research was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-00086-A).

REFERENCES

1. Alekseenko V.A., Alekseenko A.V. *Khimicheskie elementy v geokhimicheskikh sistemakh. Klarki pochy selitebnykh landshaftov* [Chemical elements in geochemical systems. Clarcxs of soils of residential landscapes: monograph]. Rostov n/D, Southern Federal University Press, 2013. 380 p.
2. Luo X.S., Yu S., Zhu Y.G., Li X.D. Trace metal contamination in urban soils of China. *Science of the Total Environment*, 2012, vol. 421–422, pp. 17–30.
3. Brevik E.C., Sauer T.J. The past, present, and future of soils and human health studies. *Soil*, 2015, no. 1, pp. 35–46.
4. Qian Y., Gallagher F., Deng Y., Wu M., Feng H. Risk assessment and interpretation of heavy metal contaminated soils on an urban brownfield site in New York metropolitan area. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, pp. 23549–23558.
5. Donga R., Jiab Z., Lia S. Risk assessment and sources identification of soil heavy metals in a typical county of Chongqing Municipality, Southwest China. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, vol. 3, pp. 275–281.
6. Stroganova M.N., Prokofeva T.V., Lysak L.V., Prokhorov A.N., Yakovlev A.S., Sizov A.P. Ecological status of urban soils and economic evaluation of lands. *Eurasian Soil Science*, 2003, vol. 36, no. 7, pp. 780–787.
7. Seleznev A.A., Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P. Urban geochemical changes and pollution with potentially harmful elements in seven Russian cities. *Scientific Reports*, 2020. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-58434-4> (accessed 10 June 2020).
8. Savchenko O.V., Toupelev P.A. Features of the microelement status in children lived in city areas with the different degrees of environmental contamination. *Human Ecology*, 2009, no. 1, pp. 47–50. In Rus.
9. Naumov Y.A., Podkopaeva O.V. Features, trends and effects of air pollution to the cities of Primorsky Region. The territory of new opportunities. *The herald of Vladivostok state university of economics and service*, 2013, no. 4, pp. 155–171.
10. *Ezhegodnik. Zagryaznenie pochy Rossii toksikantami promyshlennogo proiskhozhdeniya v 2015 godu* [Yearbook. Contamination of Russian soils with toxicants of industrial origin in 2015]. Obninsk, FGBU «NPO «Tajfun», 2016. 112 p.
11. *Doklad ob ekologicheskoy situatsii v Primorskem krae v 2018 godu* [Report about the environmental situation in the Primorsky territory in 2018]. Vladivostok, 2019. 252 p.
12. Chugaeva N.A., Shishlova T.M. Comparative evaluation of metal content in the atmospheric air of the city of Ussuriysk. *Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch*, 2015, no. 3, pp. 94–98. In Rus.
13. Prokofeva, T.V., Gerasimova, M.I., Bezuglova, O.S., Bakhatova K.A., Goleva A.A., Gorbov S.N., Zharikova E.A., Matinyan N.N., Nakvasina E.N., Sivtseva N.E. Inclusion of soils and soil-like bodies of urban territories into the Russian soil classification system. *Eurasian Soil Science*, 2014, vol. 47, no. 10, pp. 959–967.
14. Kalmanova V.B. The ecological framework of the urbanized territories (on the example of Birobidzhan city). *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 385–388. In Rus.
15. Evstafeva E.V., Bogdanova A.M., Minkina T. M., Sushkova S.N., Baranovskaya N.V., Mandzheva S.S., Antonenko E.M. Heavy metals content in soils of residential territories of Crimea republic. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 10, pp. 19–29. In Rus.
16. Boev V.V., Baranovskaya N.V., Boev V.A., Yambayev M.T., Shakhova T.S., Zhorniyak L.V. Change of elemental composition of soil upper horizon under the influence of oil and gas refining enterprises. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 11, pp. 179–191. In Rus.
17. Kowalska J.B., Mazurek R., Gasiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. A review. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, vol. 40, pp. 2395–2420.

18. Tong S., Li H., Wang L., Tudi M., Yang L. Concentration, spatial distribution, contamination degree and human health risk assessment of heavy metals in urban soils across China between 2003 and 2019 – a systematic review. *International Journal Environmental Research and Public Health*, 2020, vol. 17, pp. 3099. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph17093099> (accessed 14 June 2020).
19. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Classification and soil diagnostics of Russia]. Ed. by G.V. Dobrovolskiy. Smolensk, Oykumena Publ., 2004. 342 p.
20. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. Ser. 3. Mnogoletnie dannye. Primorskii kray* [Referent book on Climate in the Soviet Union. Ser. 3: Long-Term Data. Primorskii Region]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988. Ch. 1–6, Iss. 26, 416 p.
21. *GOST 17.4.4.02.2017 Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo, gelnintologicheskogo analiza* [SS 17.4.4.02.2017 Soils. Methods of sample selection and preparation for chemical bacterial and helminthological analysis]. Moscow, Standardinform Publ., 2018. 21 p.
22. *M-02-0604-2007 Metodika vypolneniya izmereniy massovoy доли кремнича, кальция, титана, ванадия, хрома, бария, марганца, зефеля, меди, цинка, мышьяка, стронтия, свинца, циркония, молибдена в порошковых пробах почв и донных осадков рентгеноспектральным методом с применением energodispersiонных рентгенофлуоресцентных спектрометров типа EDX* firmы Shimadzu [Methods for measuring the mass fraction of silicon, calcium, titine, vanadium, chromium, barium, manganese, iron, nickel, copper, zinc, arsenic, strontium, lead, zirconium, and molybdenum in powder samples of soils and bottom]. St-Petersburg, 2007. 17 p.
23. Savichev A.T., Vodyanitskii Yu.N. Evaluation of chemical elements contents in soils below the detection limit for X-ray fluorescence analysis and there distribution laws. *X-ray fluorescence technology, performance and application*. New York, Nova science publishers, 2018. pp. 89–115.
24. Zharikova E.A. Soils of Vladivostok: main characteristics and properties. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2012, no. 3, pp. 67–73. In Rus.
25. Zharikova E.A. Ecology-geochemical condition of soils of recreational areas of Ussuriysk. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2014, no. 5. pp. 78–85. In Rus.
26. Zharikova E.A. Soils agrochemical properties and elemental composition features in urban landscapes (case study of the city of Ussuriysk). *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2019, no. 3, pp. 71–76. In Rus.
27. Kabata-Pendias A. *Trace Elements in Soils and Plants*. 4th ed. Boca Raton, CRS Press, 2011. 548 p.
28. Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geo Journal*, 1969, vol. 2, pp. 108–118.
29. Tomlinson D.C., Wilson J.G., Harris C.R., Jeffrey D.W. Problems in the assessment of heavy metals in estuaries and the formation pollution index. *Helgoland Marine Research*, 1980, vol. 33, pp. 566–575.
30. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 1980, vol. 14 (8), pp. 975–1001.
31. Jiang H.H., Cai L.M., Wen H.H., Luo J. Characterizing pollution and source identification of heavy metals in soils using geochemical baseline and PMF approach. *Scientific Reports*, 2020, 10:6460. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63604-5> (accessed 10 June 2020).
32. Varol M. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, vol. 195, pp. 355–364.
33. *Metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu tsikla laboratornykh rabot s elementami nauchnykh issledovanii po kursu «Matematicheskie metody v geokhimicheskikh issledovaniyakh» dlya studentov spetsialnosti 08.01.04 (specializatsiya – geologiya i razvedka mestorozhdenii radioaktivnykh i redkikh elementov)* [Guidelines for performing a cycle of laboratory work with elements of scientific research in the course «Mathematical methods in geochemical research» for students of specialty 08.01.04 (specialization-Geology and exploration of deposits of radioactive and rare elements)]. Tomsk, TPU Publ. house, 1994. 38 p.
34. Yu L. Cheng J., Zhan J., Jiang A. Environmental quality and sources of heavy metals in the topsoil based on multivariate statistical analyses: a case study in Laiwu City, Shandong Province, China. *Natural Hazards*, 2016, vol. 81, pp. 1435–1445.
35. Yang L., Zhu G., Pan H., Shi P., Li J., Liu Y., Tong H. Surface dust heavy metals in the major cities, China. *Environmental Earth Science*, 2017, vol. 76, pp. 757–771.
36. Sayet Yu.E., Barshakevich I.L., Revich B.A. *Metodicheskie rekomendatsii po geokhimicheskoy otsenke istochnikov zagryazneniya okruzhayushchey sredy* [Methodic recommendations for geochemical assessment of pollution sources of the environment]. Moscow, IMGRE Publ., 1982. 111 p.
37. Zvereva V. P., Krupskaya L. T. Estimation of Influence of Ash Dumps of Thermolectric Plants on Environment Features (in South Far East). *Ekologicheskaya ximiya*, 2012, vol. 21, pp. 225–233. In Rus.
38. Fomenko D.V., Ulanova E.V., Gromov K.G., Kaztskaya A.S., Bondarev O.I. Mediko-biologicheskoe issledovanie vliyaniya ugnolnoy pyli kak faktora intoksikatsii [Medical and biological research of coal dust affect as intoxication factor]. *Bulletin Vostochno-Sibirskogo Nauchnogo Centra Sibirskogo Otdeleniya Akademii Medicinskix Nauk*, 2006, no. 1, pp. 278–283.
39. Chen M., Graedel T.E. The potential for mining trace elements from phosphate rock. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 91, pp. 337–346.
40. Molina M., Aburto F., Calder R., Cazanga M., Escudey M. Trace element composition of selected fertilizers used in Chile: phosphorus fertilizers as a source of long-term soil contamination. *Soil and Sediment Contamination*, 2009, vol. 18, pp. 497–511.
41. Senesi M., Polemio M. Trace element addition to soil by application of NPK fertilizers. *Fertilizer Research*, 1981, vol. 2, pp. 289–302.
42. *Toxic metals in soil-plant systems*. Ed. by S.M. Ross. Chichester, England, New York, Wiley. 1994. 469 p.

Received: 3 July 2020.

Information about the authors

Elena A. Zharikova, Cand Sc., senior researcher, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 621.311.002

ФОТОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ И ТЕПЛОВЫМ НАКОПЛЕНИЕМ ЭНЕРГИИ В ИРАКЕ

Лукутин Борис Владимирович¹,
lukutin48@mail.ru

Аль-Мажди Карап Хамид¹,
karrar.almussawi.87@gmail.com

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

Актуальность. Современные технологии производства энергии с участием возобновляемой энергетики позволяют создать надежные, экономичные и экологически чистые энергоисточники. В статье предложена и обоснована концепция гибридной системы аккумулирования солнечной энергии с использованием фотоэлектростанции с электрохимическими и тепловыми накопителями генерируемой электроэнергии на примере региона с высоким уровнем солнечной радиации – г. Багдад (Ирак). Исследования проведены для типичного социального объекта – спортивного зала в Багдаде, нуждающегося в электрической энергии и горячем водоснабжении.

Цель: изучение возможности снижения стоимости фотоэлектрической установки за счет использования комбинированных электрохимических и электротермических аккумуляторов солнечной энергии.

Объект: фотоэлектрические системы электроснабжения социально-культурных объектов со значительной долей электрических нагревательных нагрузок на территориях с высоким уровнем инсоляции, например спортивный зал в г. Багдад.

Методы. Аналитические методы исследования фотоэлектростанций с комбинированным способом аккумулирования солнечной энергии: в электрохимических аккумуляторах и в электротепловых, методы оценки экономических характеристик объектов энергетики, методы компьютерного моделирования.

Результаты. Проведён анализ технико-экономической эффективности системы электроснабжения с высокой долей тепловых нагрузок, учитывая непостоянство солнечной радиации по сезонам года, изменения температуры и графиков энергопотребления. Проведено сравнение экономической эффективности теплового аккумулятора фотоэлектростанции с электрохимическим аккумулированием электроэнергии. Исследования проведены для типичного социального объекта – спортивного зала в Багдаде, с потребностями в электроэнергии для тренажёров, вентиляции, кондиционирования либо отопления, освещения и подогрева воды. Показаны преимущества комбинированных систем аккумулирования электроэнергии фотоэлектростанций объектов с высокой долей электротепловых нагрузок, показаны технико-экономические преимущества использования подобных систем в Ираке: зависимость от централизованной электрической сети может быть уменьшена на 80 % при снижении себестоимости фотоэлектричества более чем в 2 раза относительно сетевого тарифа.

Ключевые слова:

Возобновляемая энергия, солнечная радиация, фотоэлектростанция, электрохимические и электротермические накопители электроэнергии, компьютерное моделирование.

Введение

Глобальное потепление стало одной из самых актуальных проблем в современном мире. Причиной является быстрый рост населения планеты, вызвавший увеличение глобального спроса на энергию. Использование углеводородных энергоресурсов для удовлетворения этого спроса является основной причиной глобального потепления [1]. Кроме того, сжигание углеводородного топлива оказывает серьезное негативное влияние на окружающую среду [2]. В настоящее время ископаемое топливо потребляется со скоростью большей, чем скорость его образования в недрах Земли под воздействием тепла и давления и в будущем оно полностью исчезнет. Потребление энергии во всем мире составляет около 10 млрд т условного топлива в год. Доля нефти в общем потреблении составляет 40 %, а доля газа – 50 % [3]. Согласно прогнозным научным исследованиям, концентрация углекислого газа увеличится на 75–350 % к 2100 г. по сравнению с уровнем 1850 г., что приведет к увеличению парникового эффекта в атмосфере Земли [4]. Воздействия энергетической отрасли на окружающую среду могут быть

намного меньше, если использовать возобновляемые источники энергии [5]. Для этого энергетический сектор должен приложить серьёзные усилия в области возобновляемых источников энергии в дополнение к мерам по улучшению традиционной энергетики. Возобновляемые источники энергии, такие как энергия ветра, солнечная энергия, геотермальная энергия и др., могут в значительной степени заменить существующие топливные источники первичной энергии и усовершенствовать процессы преобразования, транспортировки и распределения электроэнергии. Солнечная энергия является одним из наиболее важных источников экологически чистой энергии в мире, который можно использовать для удовлетворения глобальных потребностей в энергии, необходимых для повседневных нужд в промышленности и быту. Кроме электроэнергии, существует большой потенциал использования солнечной энергии для удовлетворения потребностей в тепле на фабриках, фермах, в зданиях, в развлекательных заведениях и т. д. [6–8].

Тепловое воздействие солнечной радиации широко применяется для обогрева зданий и горячего водо-

снабжения путем использования солнечных коллекторов. Комплексная эффективность солнечного коллектора достигает 51–61 % без концентратора и с концентратором солнечного излучения соответственно [9]. Солнечные коллекторы являются основой солнечных теплоэнергетических систем. Горячая вода является вторым по величине потребляемым энергоресурсом в мире. Сегодня солнечные водонагревательные системы используются в домах на одну семью, многоквартирных домах, школах, автомойках, больницах, ресторанах, фермерских хозяйствах, развлекательных комплексах и в различных отраслях промышленности [10]. Эффективность солнечного коллектора зависит от интенсивности солнечного излучения и от разницы температур окружающего воздуха, коллектора и теплоносителя – воды [11]. Максимальная температура воды на выходе – 55 °C – была зарегистрирована в плоском коллекторе при общих потерях тепла 3,2 МДж/день, что эквивалентно 16,4 % энергии, собранной плоским коллектором [12].

Большое внимание уделяется повышению эффективности систем возобновляемой энергетики, участвующих в энергообеспечении различных объектов, для сокращения токсичных выбросов и улучшения экономических характеристик [13–15].

Возобновляемая энергия, в первую очередь солнечная, перспективна для использования в системах электроснабжения, особенно в случаях их удаленности от централизованных энергосистем или высокой стоимости предлагаемой электроэнергии. Однако высокая стоимость энергетического оборудования для фотоэлектрических станций всё ещё является ограничивающим фактором для их широкого практического применения. Снижение стоимости является основным критерием оптимизации нестационарных процессов преобразования энергии в фотоэлектрических системах и, соответственно, характеристик их энергетического оборудования. В частности, известна проблема существенного несоответствия между графиком инсоляции и энергопотребления различных объектов. Для координации энергетического баланса фотоэлектрической системы широко используются электрохимические батареи, обеспечивающие аккумулирование электроэнергии для надёжного электроснабжения потребителей. Однако аккумуляторы критичны к температуре и имеют ограниченный срок службы и высокую стоимость.

Аккумулирование электрической энергии фотоэлектростанций может быть реализовано не только в электрохимических батареях, но и в более дешёвых водонагревательных установках, что позволит снизить стоимость фотоэлектрической установки за счет уменьшения емкости аккумуляторов и обеспечить горячей водой потребителя. Существует большое количество солнечных водонагревателей прямого действия, характеризующихся простотой конструкцией и низкой стоимостью. Стоимость единицы площади коллектора разных конструкций варьируется в зависимости от конструкции и технических характеристик. Самые простые солнечные коллекторы стоят 2,3 тыс. р./м². Эти коллекторы имеют коэффициент

полезного действия около 0,19. Цена более совершенных вакуумных трубчатых коллекторов превышает 25 тыс. р./м², что дороже удельной стоимости фотоэлектрических панелей. Эффективность этих комплексов составляет 0,51–0,57 [16]. Недостатком солнечных водонагревателей является зависимость их производительности от солнечных и погодных условий.

Эффективность фотоэлектрического преобразования в широком диапазоне изменений энергии солнечного излучения практически не изменяется, расширяя возможности фотоэлектрических электростанций, включая горячее водоснабжение с электронагревательными элементами.

Электрические нагрузки можно разделить на несколько категорий, включая жилые, промышленные, коммерческие и правительственные. Эти компоненты различаются в электрической системе в зависимости от экономической, политической, социальной ситуации в стране и т. д. Фактор разнообразия электрических нагрузок изучался в иракской системе распределения электроэнергии. Исследование показывает, что бытовые и промышленные электрические нагрузки росли со скоростью, превышающей средние значения [17]. Жилые нагрузки представляют самые большие компоненты в иракских электрических системах. Бытовые электрические нагрузки состоят из множества электроприёмников: бытовой техники, освещения, отопления помещений, охлаждения и нагрева воды. Исследование показало, что на нагревание воды расходуется больше всего электроэнергии – до 32,29 % [18].

Аккумулирование тепловой энергии снижает расходы на электроэнергию, позволяя избегать повышенных тарифов в часы пик. Тепловая энергия может быть собрана, когда это возможно, и использоваться при необходимости даже в другое время года. Например, тепло может собираться от солнечных коллекторов в жаркие месяцы, чтобы при необходимости использовать его для обогрева помещений, в том числе в зимние месяцы. Аккумулирование энергии выгодно для пользователей, которые могут гибко следовать спросу и предложению на энергоресурсы [19].

Учитывая дефицит энергосистемы Ирака, восполнимый за счёт импорта около 22 % электроэнергии из Ирана (на фоне санкций со стороны США к участникам сотрудничества с Ираном), весьма актуальной проблемой энергетики Ирака является снижение нагрузки энергосистемы, в том числе за счёт ввода генерирующих мощностей возобновляемой энергетики, в первую очередь солнечной [20].

Описание системы и математическая модель

Обширная площадь и малая плотность населения Ирака при высоком потенциале солнечной энергии определяют перспективность использования фотоэлектрических станций. Территория Ирака находится под воздействием энергии солнечного излучения, получая около 2000 кВт*ч/м²/год, что определяет актуальность использования технологий солнечной энергетики для поддержки экономики страны путём сокращения электропотребления в иракской национальной электрической сети [21]. Ирак считается вто-

рой страной в мире по интенсивности энергии солнечного излучения. На основе построенной карты распределения инсоляции по территории Ирака определены потенциальные районы для создания крупномасштабных солнечных электростанций и показано, что Ирак относится к странам, наиболее подходящим для использования солнечной энергии [22].

Выбор оборудования для децентрализованных фотоэлектрических станций определяется инсоляцией и графиком потребления электроэнергии. Схема пред-

лагаемой независимой гибридной фотоэлектрической установки с резервированием от дополнительного источника энергии – дизельного генератора – или централизованной сети представлена на рис. 1. Схема отличается от обычной фотоэлектрической установки с электрохимическим аккумулятором электроэнергии и резервным дизель-генератором наличием тепловых нагрузок, которые питаются непосредственно от массива фотоэлектрических модулей через специальный тепловой контроллер.

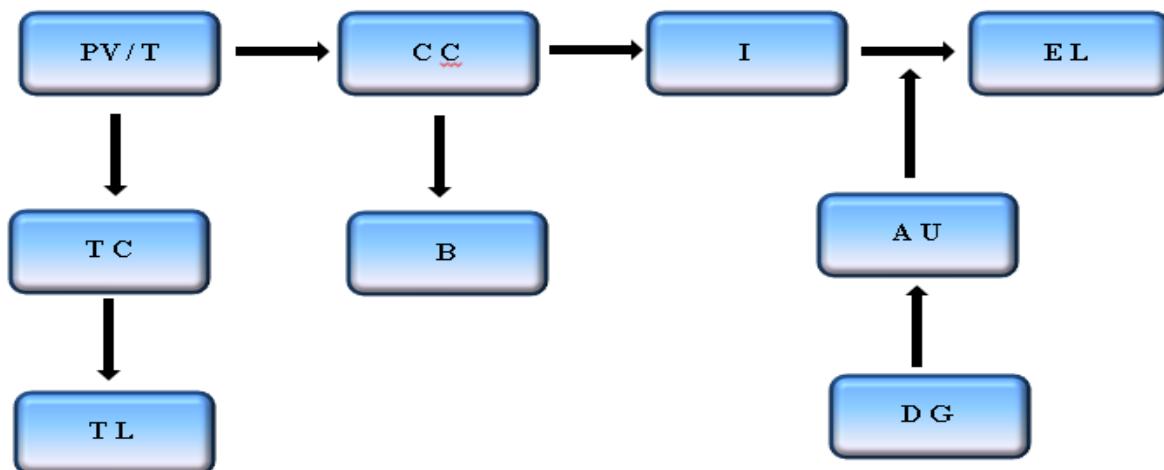


Рис. 1. Структурная схема фотоэлектрической системы с электрохимическим и электротепловым аккумуляторами
Fig. 1. Block diagram of a photovoltaic system with electrochemical and electro thermal batteries

На рис. 1 приняты обозначения: PV/T – массив фотоэлектрических модулей; TL – тепловая нагрузка-аккумулятор; TC – тепловой контроллер; В – батарея электрохимических аккумуляторов; CC – контроллер заряда аккумуляторной батареи; I – инвертор; DG – дизельный генератор или другой энергоисточник; AU – блок автоматического включения резерва; EL – электрическая нагрузка.

Район исследования – столица Ирака, г. Багдад, находится на высоте 40 м над уровнем моря. Город расположен на $33^{\circ} 20'19''$ северной широты и $44^{\circ} 23'38''$ восточной долготы. Удельная суточная инсоляция в районе Багдада по месяцам года для поверхности с оптимальным углом наклона относительно горизонтальной поверхности показана в табл. 1.

Таблица 1. Солнечная радиация в районе объекта энергообеспечения

Table 1. Solar radiation in the area of the energy supply facility

Месяц Month	Янв Jan	Фев Feb	Март Mar	Апр Apr	Май May	Июн Jun	Июль Jul	Авг Aug	Сент Sep	Окт Oct	Ноябр Nov	Дек Dec
Солнечная радиация, КВт·ч/м ² /день Solar radiation, kWh/m ² /day	3	3,8	4,8	5,7	6,5	7,3	7,2	6,6	5,7	4,4	3,3	2,7

В качестве примера объекта энергообеспечения выбран социальный объект – спортивный зал. Зал имеет площадь 200 м^2 и рассчитан на 30 посетителей в день. Время работы зала – с 10 до 22 часов. Объект нуждается в электрической и тепловой энергии. Учитывая высокий энергетический потенциал солнечного излучения, рассмотрим возможности фотоэлектростанции для энергообеспечения спортивного зала. Кроме электрической энергии, тренажёрный зал нуждается в горячем водоснабжении. Энергетические затраты на подогрев воды могут быть подсчитаны по формуле

$$Pt = mCw(Q_2 - Q_1),$$

где t – время нагрева воды [с]; P – мощность нагревательного элемента [кВт]; m – масса воды [кг]; $C_w = 4,2 \text{ кДж/кг}$ град – удельная теплоёмкость воды; Q_2 и Q_1 – конечная и начальная температура воды.

В соответствии с нормативами расход воды в дешевых спортивных залах – от 15 до 30 л на человека [23, 24]. Примем среднее значение – 22 л горячей воды, что суммарно для 30 посетителей рассматриваемого объекта составит 660 л/день. Энергия, необходимая для нагрева 660 л воды до температуры 65 градусов, равна:

$$W_{\text{ГВ}} = 660 * 4,2 * (65 - 13) = 144 \text{ кВт·ч. (летом и весной)},$$

$$W_{\text{ГВ}} = 660 * 4,2 * (65 - 3,5) = 170 \text{ кВт·ч. (зимой и осенью)}.$$

Следовательно, средняя мощность электронагревательных приборов, при условии нагревания за световой день (весна–лето 13 часов, осень–зима 10 часов), равна, соответственно 11 и 17 кВт. Ис-

ходная температура воды принята летом 13°, зимой – 3,5°. Мощности и время работы электро-приёмников спортивного зала по сезонам года приведены в табл. 2.

Таблица 2. Энергетические характеристики электроприёмников по сезонам

Table 2. Energy characteristics of electrical receivers by season

Электроприёмники Electrical receivers	Мощность и время работы электроприёмников для средних суток по сезонам года Power and operating time of electrical devices for typical days by seasons of the year							
	Зима/Winter		Весна/Spring		Лето/Summer		Осень/Autumn	
	Мощность, кВт Power, kW	Время, ч Time, hour	Мощность, кВт Power, kW	Время, ч Time, hour	Мощность, кВт Power, kW	Время, ч Time, hour	Мощность, кВт Power, kW	Время, ч Time, hour
Освещение зала Hall lighting	4	12	4	12	4	12	4	12
Тренажёр Fitness machine	3	12	3	12	3	12	3	12
Водоснабжение Water supply	0,5	3	0,5	4	0,5	6	0,5	3
Сауна/Sauna	2,6	5	2,6	5	2,6	5	2,6	5
Отопление помещений Space heating	20	12	0	0	0	0	20	8
Кондиционер Air-condition	0	0	6	6	6	12	0	0
Охранная сигнализация Security alarm	0,16	12	0,16	12	0,16	12	0,16	12
Стиральная машина Washing machine	0,5	4	0,5	4	0,5	4	0,5	4
Горячее водоснабжение Water heating	17	10	11	13	11	13	17	10
Освещение автостоянки Car park lighting	1	14	1	12	1	10	1	12
Вентиляция Ventilation	0,6	12	0,6	12	0,6	12	0,6	12

Учитывая значительную долю электронагревательного оборудования, суммарное суточное электропотребление для рассматриваемого объекта определяется как:

$$W_{\text{H}} = W_{\text{Э}} + W_{\text{ГВ}},$$

где $W_{\text{Э}}$ – электроэнергия, потребляемая электрическими нагрузками; $W_{\text{ГВ}}$ – электроэнергия, потребляемая водонагревателем.

По сезонам года величина суммарного электропотребления W_{H} изменяется в широких пределах: от 302 кВт·ч в день весной и 337 кВт·ч летом до 452 кВт·ч осенью и 534 кВт·ч зимой.

Следует отметить, что значительная часть электроэнергии расходуется на подогрев воды: весной и летом 144 кВт·ч, осенью и зимой 170 кВт·ч. Электрическая мощность, используемая для подогрева воды (при условии её нагревания за усреднённый световой день) осенью–зимой, летом–весной равна 17 и 11 кВт, соответственно.

Энергия, потребляемая электрическими нагрузками в сутки по сезонам, равна: весной – 152 кВтч, летом – 187 кВтч, осенью – 267 кВтч, зимой – 349 кВтч.

Общий энергетический баланс нагрузок объекта энергоснабжения: суммарная энергия W_{H} , энергия электрических нагрузок $W_{\text{Э}}$ и энергия электронагревателя $W_{\text{ГВ}}$, для средних суток по сезонам года приведен в табл. 3.

Эти объемы электроэнергии должны ежедневно генерироваться фотоэлектростанцией или другим энергоисточником, причём для фотоэлектростанции необходимое количество этой энергии должно поступать к электроприёмникам через системы накопления

ввиду неполного совпадения временных интервалов инсоляции и электропотребления.

Таблица 3. Энергетический баланс тепловых и электрических нагрузок

Table 3. Energy balance of thermal and electrical loads

Общая энергия в течение дня, кВтч Total energy during the day, kWh	Сезон/Season			
	Зима Winter	весна Spring	Лето Summer	осень Autumn
W_{H}	534	302	337	452
$W_{\text{Э}}$	364	158	193	282
$W_{\text{ГВ}}$	170	144	144	170

Для моделирования фотоэлектростанции воспользуемся программным комплексом [25]. Вид диалогового окна для выбранного района – г. Багдад – приведён на рис. 2.

Среднесуточная потенциальная генерация электроэнергии фотоэлектростанции, состоящей из 300 фотоэлектрических модулей НН-MONO-200W, изменяется от 236 кВт·ч/сутки в декабре до 393 кВт·ч/сутки в июне. Суммарное годовое производство электроэнергии может достигать 117286,80 кВт·ч.

В результате исследований на компьютерной модели установлено, что электроэнергии фотоэлектростанции с используемым типом и количеством фотоэлектрических панелей достаточно для полного обеспечения спортивного зала в весенне-летний сезон. В осенне-зимний период фотоэлектрическая генерация покрывает не более половины необходимой электроэнергии.



Рис. 2. Данные для моделирования фотоэлектростанции

Fig 2. Initial data for modeling a photovoltaic plant

Суточные зависимости энергии фотоэлектростанции W_{Φ} и энергии электрической нагрузки объекта за усреднённый рабочий день, включающей электрические $W_{\mathcal{E}}$ и электронагревательные $W_{\text{ГВ}}$ электроприёмники, по сезонам года приведены на рис. 3. По характеру распределения указанных вели-

чин в течение суток заметно несоответствие периода инсоляции временному интервалу электропотребления. Для устранения этого противоречия, при условии снижения нагрузки на централизованную электрическую сеть, необходимо использование накопителей энергии.

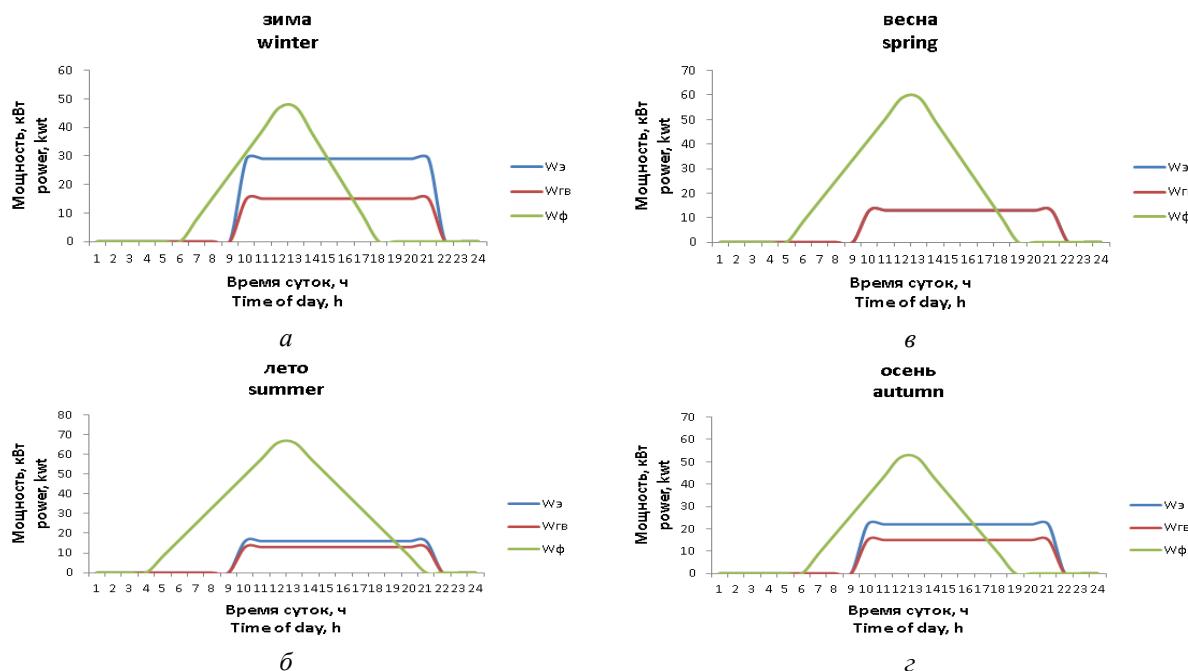


Рис. 3. а–г) Временные зависимости средней энергии электрических нагрузок $W_{\mathcal{E}}$, электронагревательных нагрузок $W_{\text{ГВ}}$ и энергии генерации фотоэлектростанции W_{Φ} в течение средних суток сезонов года

Fig. 3. a–g) Time dependences of the average energy of electrical loads $W_{\mathcal{E}}$, electric heating loads $W_{\text{ГВ}}$ and the generation energy of the photoelectric power plant W_{Φ} during the average day of the seasons

Исходя из анализа представленных на рис. 3, а–г временных зависимостей энергии солнечного излучения и электропотребления, получается, что в весенне-летний сезон от 25 до 33 % рабочего времени электропитание объекта осуществляется от аккумуляторов либо от дополнительного энергоисточника.

В осенне-зимний сезон этот период увеличивается до 40–50 % рабочего времени.

Энергетический баланс фотоэлектрической системы электроснабжения объекта с аккумуляторным накопителем электроэнергии за рабочий день может быть представлен формулой:

$$W_{\phi} - W_{\mathcal{E}} - W_{\text{гв}} - +W_a - +W_d = 0,$$

где W_{ϕ} , $W_{\mathcal{E}}$, $W_{\text{гв}}$, W_a , W_d – соответственно, энергия фотоэлектрической генерации за световой день, энергия электропотребления за рабочее время, расход электроэнергии на горячее водоснабжение, энергия заряда или разряда аккумулятора (ночным электропотреблением можно пренебречь), энергия дополнительного источника (сеть).

Результаты исследования

Оценка энергетических характеристик накопителя электрической энергии, необходимого для использования в фотоэлектростанции с гибридным электрохимическим и электротепловым аккумулятором и только электрохимическим, выполнена моделированием энергетических характеристик рассматриваемого энергетического комплекса в программном комплексе [25].

В результате моделирования установлено, что для полного энергообеспечения объекта электроэнергией от фотоэлектростанции в течение средних суток весенне-летнего сезона необходимы электрохимические аккумуляторы ёмкостью 6000 Ач. Предельная глубина разряда аккумуляторов не превышает при этом 30 %. В осенне-зимний сезон энергии этих аккумуляторов хватит только на 2 часа автономной работы, что требует использования дополнительного энергоисточника.

Вариант с гибридным аккумулированием фотоэлектричества предусматривает использование электрохимических аккумуляторов только для питания электрических нагрузок. Соответственно, аккумуляторы ёмкостью 3000 Ач обеспечат независимое электропитание потребителей в течение характерных суток весенне-летнего сезона с аналогичной глубиной разряда 30 %. В осенне-зимний сезон аккумуляторы смогут независимо питать электрические нагрузки в течение 2 часов.

Таким образом, для рассматриваемого примера применение гибридной аккумулирующей системы позволяет в два раза уменьшить необходимый запас энергии электрохимических аккумуляторов.

Данные суточных энергетических характеристик системы электроснабжения рассматриваемого объекта и его взаимодействие с дополнительным энерго-

источником W_d приведены в табл. 4. Отрицательные значения энергии дополнительного источника свидетельствуют о возможности её передачи в централизованную энергосистему.

Таблица 4. Энергетические характеристики гибридной системы (усреднённый день для каждого сезона)

Table 4. Energy characteristics of the hybrid system (typical day for each season)

Энергия в течение дня, кВт·ч Total energy during the day, kWh	Сезон/Season			
	Зима Winter	Весна Spring	Лето Summer	Осень Autumn
W _h	534	302	337	452
W _{\phi}	270	336	381	298
W _d	264	-34	-44	154
W _{гв}	170	144	144	170

Удельная стоимость ёмкости свинцово-кислотных аккумуляторов 0,06 \$/Вт·ч [26]. Тогда стоимость аккумуляторов ёмкостью 6000 Ач равна 4320 \$. Цена накопительных электрических водонагревателей объёмом сотни литров для большинства производителей колеблется от 1,2 до 2,2 \$ за единицу объёма [16], что для суточного объёма нагреваемой воды 660 л составит в среднем около 1100 \$. Таким образом, гибридная система аккумулирования электроэнергии стоит 3260 \$ против 4320 \$ за электрохимические аккумуляторы с теми же энергетическими возможностями. Для оценки экономических характеристик рассматриваемого энергетического комплекса приведём стоимостные характеристики основного энергетического оборудования, представленные в табл. 5 (звездочкой отмечено количество единиц оборудования для варианта с электрохимическими аккумуляторами).

Срок службы фотоэлектрических модулей превышает 20 лет, нормативный коэффициент рентабельности $R_h=0,05$. Срок службы аккумуляторных батарей серий DTM составляет не менее 12 лет, инвертора и контроллеров – более 10 лет. Соответственно, за 20 лет эксплуатации количество единиц оборудования, кроме фотоэлектрических модулей, следует увеличить в два раза. Эксплуатационные затраты примем 100000 р./год.

Таблица 5. Стоимость энергетического оборудования автономной гибридной фотоэлектростанции

Table 5. Cost of power equipment of an autonomous hybrid photo-power plant

Номенклатура товара Item nomenclature	Кол-во, шт. Quantity, pcs.	Цена за шт., р. Price per piece, rub.	Сумма, р. Amount, rub.
Фотопанели HH-MONO 200W Photo panels HH-MONO 200W	300	11000	3 300000
Тепловой контроллер Thermal controller	2	30000	60000
АКБ – Delta DTM 12200 L Battery – Delta DTM 12200 L	16/32*	35500	568000/1136000*
Инвертор MAP-HYBRID-48-20 Inverter MAP-HYBRID-48-20	2/4*	195900	391800/783600*
Итого оборудование Total equipment	–	–	4318000/5279000*
Строительно-монтажные работы (20 % от стоимости) Construction and installation works (20 % of the cost)	–	–	863000/1050800*
Итого/Total	–	–	5181000/6329800*

Тогда себестоимость электроэнергии фотоэлектростанции с гибридной системой аккумулирования составит:

$$\text{Сэл} = \{(0,05*5181000)+100000\}/117286=3,1 \text{ р./кВт*ч.}$$

Себестоимость электроэнергии варианта энергетического комплекса только с электрохимическим аккумулированием электроэнергии ФЭС составит:

$$\text{Сэл} = \{(0,05*6329800)+100000\}/117286=3,5 \text{ р./кВт*ч.}$$

По данным [27] средний тариф на электроэнергию в Ираке равен 0,1 Евро, что по курсу соответствует 7,68 р./кВт*ч. Расчётная себестоимость электроэнергии фотоэлектростанции более чем в два раза ниже тарифа на электроэнергию от централизованной энергосистемы. Сравнивая себестоимость электроэнергии, производимой двумя вариантами фотоэлектрического энергокомплекса, видно, что вариант с гибридной системой аккумулирования фотоэлектричества экономически предпочтительнее.

Годовые финансовые затраты на энергообеспечение спортивного зала, потребляющего порядка 150 тыс. кВт*ч электроэнергии, при питании от централизованной электрической сети, составляют 1150 тыс. р. Использование фотоэлектростанции позволяет производить около 120 тыс. кВт*ч электроэнергии, сокращая потребление из электрической сети до 30 тыс. кВт*ч. При этом расходы на электроэнергию сокращаются до 600 или 650 тыс. р. в год для энергетического комплекса с гибридной системой аккумулирования фотоэлектричества или только с электрохимической, соответственно. Таким образом, годовая экономия финансовых средств на электроэнергию достигает для рассмотренных вариантов фотоэнергетического комплекса 500–550 тыс. р. в год, что обеспечивает окупаемость оборудования фотоэлектростанции (стоимость оборудования: 5181000 или 6329800 р. для рассмотренных вариантов) за 10–12 лет при расчётном сроке эксплуатации 20 лет.

Следует отметить, что цена на возобновляемую электроэнергию будет уменьшаться и в дальнейшем из-за снижения стоимости оборудования для возобновляемой энергетики, что будет способствовать повышению экономической эффективности подобных проектов.

Заключение

Показана перспективность использования фотоэнергетики для снижения нагрузки на энергодефицитную энергосистему Ирака и расходов на электроэнергию для конкретных потребителей. На примере

социального объекта – спортивного зала – проиллюстрированы возможности использования солнечной энергии для обеспечения объекта более дешёвой электроэнергией и горячей водой с минимальной зависимостью от централизованной сети.

Основные результаты исследования:

1. Использование систем накопления солнечной энергии с электрохимическими и тепловыми аккумуляторами позволяет снизить необходимый запас энергии электрохимических батарей за счет выделения энергии, потребляемой тепловыми нагрузками. Для рассматриваемого примера ёмкость аккумуляторных батарей удалось уменьшить в 2 раза. Использование части электроэнергии фотоэлектрических модулей для нагревания воды не позволяет осуществлять обратное преобразование низкопотенциальной горячей воды в электричество, но потребности объекта в горячем водоснабжении нивелируют этот недостаток.
2. Эффективность непосредственного преобразования электроэнергии массива фотоэлектрических модулей в тепло выше, чем эффективность её теплового преобразования через промежуточное звено – электрохимический аккумулятор со своим коэффициентом полезного действия.
3. Удельная стоимость утилизации электроэнергии в виде тепловой энергии меньше стоимости аккумулирования в электрохимических аккумуляторах. Собственно, бак-utiлизатор является электро-нагревательной нагрузкой, обеспечивающей горячее водоснабжение в любом варианте энергетического комплекса.
4. Работа показывает снижение стоимости гибридной (электротепловой) совместно с электрохимической) системы аккумулирования электроэнергии по сравнению с электрохимическими батареями с тем же запасом энергии и, следовательно, более низкую стоимость электроэнергии, производимой фотоэлектрической станцией. Для рассматриваемого примера себестоимость фотоэлектричества при его гибридном аккумулировании равна 3,1 р., при электрохимическом – 3,5 р. за кВт*ч.
5. Показана экономическая целесообразность распределённой фотоэлектрической генерации в условиях Ирака. Для рассмотренного примера срок окупаемости вложений в оборудование фотоэлектростанции равен 10–12 лет для вариантов с гибридной и электрохимической системами аккумулирования фотоэлектричества.
4. United Nations Framework Convention on Climate Change. URL: <http://unfccc.int> (дата обращения: 15.11.2020).
5. EIA's Annual Energy Outlook 2019 with projections to 2050. U.S. Energy Information Administration, 2019. URL: <https://www.eia.gov/outlooks/aoe/pdf/aoe2019.pdf> (дата обращения: 15.11.2020).
6. Lukutin B.V., Orazbekova A.K. Technical and economic feasibility of thermal accumulation of energy at autonomous photovoltaic power stations // International Eurasian Conference on future energy and IEEE international Siberian Conference on control and communications (SIBCON-2017). – Astana, Kazakhstan, 2017. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7998489>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. BP Statistical review of world energy 2018. URL: <https://bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf> (дата обращения: 15.11.2020).
2. Sawe Y., Gopta S.C., Bohra A.V. Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid system // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – V. 81 (2). – P. 2217–2235.
3. Key world energy statistics. International Energy Agency. 2010. URL: <http://www.iea.org> (дата обращения: 15.11.2020).

7. Outdoor performance analysis of a photovoltaic thermal (PVT) collector with jet impingement and compound parabolic concentrator (CPC) / A.H. Jaaz, H.A. Hasan, K. Sopian, A.A.H. Kadhum, T.S. Gaaz, A.A. Al-Amriery // Materials. 2017. DOI: <https://www.mdpi.com/1996-1944/10/8/888>.
8. Jaaz A.H., Sopian K., Gaaz T.S. Study of the electrical and thermal performances of photovoltaic thermal Collector-Compound parabolic concentrated // Results in Physics. – 2018. – V. 9. – P. 500–510.
9. Bhowmik H., Amin R. Efficiency improvement of flat plate solar collector using reflector // Energy Reports. – 2017. – V. 3. – P. 119–123.
10. Goswami D. Yogi. Advances in Solar Energy // An Annual Review of Research and Development in Renewable Energy Technology (Advances in Solar Energy Series). – 2007. – V. 17. – P. 336.
11. Field study of the performance for a solar water heating system with MHPA-FPCs / H. Liu, W. Wang, Y. Zhao, Y. Deng // Energy Procedia. – 2015. – V. 70. – P. 79–86.
12. Analysis of the performance of a solar water heating system with flat collector / A.L.G. Vendramin, C.I. Yamamoto, C.E.C. Nogueira, A.M. Lenz, S.N.S. Melegari // World Academy of Sciences, Engineering and Technology. International Journal of Energy and Power Engineering. – 2015. – V. 9 (2). – P. 386–389.
13. Лукутин Б.В., Муравьёв Д.И. Перспективы децентрализованных систем электроснабжения постоянного тока с распределённой солнечной генерацией // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 6. URL: <http://catalog.lib.tpu.ru/catalogue/simple/document/RU/TPU/book/376831> (дата обращения: 15.11.2020).
14. Hauer A., Teuffel A. Integration of energy storage into energy systems // Handbook of Clean Energy Systems. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118991978.hces215>.
15. Wang F., Zhu Y., Yan J. Performance of solar PV micro-grid systems: a comparison study // Energy Procedia. – 2018. – V. 45. – P. 570–575.
16. Бутузов В.А. Солнечное теплоснабжение: статистика мирового рынка и особенности российского опыта // Теплоэнергетика. – 2018. – № 10. – С. 78–88.
17. Al-Nama M.A., Al-Hafid M.S., Al-Fahadi A.S. Estimation of the diversity factor for the Iraqi distribution system using intelligent methods // Al-Rafidain Engineering, Mosul. – 2009. – V. 17 (1). – P. 14–21.
18. Al-Hafid M.S., Al-Nama M.A., Al-Fahadi A.S. Determination of residential electrical load components in Iraqi north region // Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering, Basra, Iraq. – 2017. – V. 13 (2). – P. 161–165.
19. Milisic Edina. Modelling of energy storage using phase-change materials (PCM materials): Master's Thesis. 2013. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/4053/e5b7e86be6c68a9848fc9b9c5582af9c6616.pdf> (дата обращения: 15.11.2020).
20. Ирак. Электроэнергетика // Polpred.com. Обзор СМИ-2020 (№ 3607553). DOI: [polpred.com>news/?cnt=618/sector=19](http://polpred.com/news/?cnt=618/sector=19).
21. Shneishil A.H. Design and fabrication of evacuated tube solar thermal collector for domestic hot water // Journal of college education, Al-Mustansiriyah University, Iraq. – 2016. – № 3. – P. 287–302.
22. NASA Surface Meteorology and Solar Energy. URL: www.instesre.com/Solar/grid.cgi.htm (дата обращения 16.11.2020).
23. СНиП 2.04.01-85 Нормы расхода воды потребителями. (Приложение 3). URL: www.stelmarket.ru>teh.inf/12-24.htm (дата обращения: 20.11.2020).
24. Ширко Д.И., Дорошевич В.И. Гигиенические требования к водоснабжению военнослужащих. – Минск: БГМУ, 2015. – 52 с.
25. On-line калькулятор солнечной, ветровой и тепловой энергии. URL: <http://www.helios-house.ru/on-line-kalkulyator.html> (дата обращения 25.11.2020).
26. Сравнение аккумуляторов: таблица типов – BEST ENERGY (2 марта 2016). URL: <https://best-energy.com.ua/support/battery/bu-107> (дата обращения: 25.11.2020).
27. Мировые тарифы: газ, бензин, и электроэнергия. URL: antonio-merloni.ru/world-gas-tariffs (дата обращения: 25.11.2020).

Поступила 23.12.2020 г.

Информация об авторах

Лукутин Б.В., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Аль-Мажди Каррап Хамид, аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.311.002

PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS WITH ELECTROCHEMICAL AND THERMAL ENERGY STORAGE IN IRAQ

Boris V. Lukutin¹,
lukutin48@mail.ru

Karrar Hameed Kadhim¹,
karrar.almussawi.87@gmail.com

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

The relevance. One of the most environmentally friendly and reliable sources of natural energy is modern energy production technologies, especially renewable energy. This article introduces the concept of a hybrid solar storage system using a photovoltaic plant with electrochemical and thermal storage of electricity generated. For example, a region with a high level of solar radiation – Baghdad (Iraq). Studies were conducted for a model of social facility – a gym in Baghdad that needed electrical power and hot water supplies.

The main aim of the research is to study the possibility of reducing the cost of photovoltaic installation using solar electrochemical and thermal electricity batteries.

Objects: photovoltaic systems for social facilities with a large share of electrical heating loads in areas with a high level of solar radiation, for example, a gym in Baghdad (Iraq).

Methods: a combined method of accumulating solar energy: in electrochemical batteries and in thermal ones, methods of engineering sciences, modeling method.

Results. The technical and economic efficiency of the local power supply system with a high percentage of thermal loads was analyzed taking into account the instability of solar radiation during the seasons of the year, temperatures, and energy consumption tables. The economic efficiency of the electrochemical battery of a photoelectric plant with a solar water heater collector was compared.

Key words:

Renewable energy, solar radiation, photovoltaic power plant, electrochemical and electrothermal energy storage, simulation solar systems.

REFERENCES

1. BP Statistical review of world energy. 2018. Available at: <https://bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf> (accessed 15 November 2020).
2. Sawe Y., Gopta S.C., Bohra A.V. Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 81 (2), pp. 2217–2235.
3. Key world energy statistics. International Energy Agency. 2010. Available at: <http://www.iea.org> (accessed 15 November 2020).
4. United Nations Framework Convention on Climate Change. Available at: <http://unfccc.int> (accessed 15 November 2020).
5. EIA's Annual Energy Outlook 2019 with projections to 2050. U.S. Energy Information Administration, 2019. Available at: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/aeo2019.pdf> (accessed 15 November 2020).
6. Lukutin B.V., Orazbekova A.K. Technical and economic feasibility of thermal accumulation of energy at autonomous photovoltaic power stations. *International Eurasian Conference on future energy and IEEE international Siberian Conference on control and communications (SIBCON-2017)*. Astana, Kazakhstan, 2017. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7998489>.
7. Jaaz A.H., Hasan H.A., Sopian K., Kadhum A.A.H., Gaaz T.S., Al-Amiry A.A. Outdoor performance analysis of a photovoltaic thermal (PVT) collector with jet impingement and compound parabolic concentrator (CPC). *Materials*. 2017. DOI: <https://www.mdpi.com/1996-1944/10/8/888>.
8. Jaaz A.H., Sopian K., Gaaz T.S. Study of the electrical and thermal performances of photovoltaic thermal Collector-Compound parabolic concentrated. *Results in Physics*, 2018, vol. 9, pp. 500–510.
9. Bhownik H., Amin R. Efficiency improvement of flat plate solar collector using reflector. *Energy Reports*, 2017, vol. 3, pp. 119–123.
10. Goswami D. Yogi. Advances in Solar Energy. *An Annual Review of Research and Development in Renewable Energy Technology (Advances in Solar Energy Series)*, 2007, vol. 17, 336 p.
11. Liu H., Wang W., Zhao Y., Deng Y. Field study of the performance for a solar water heating system with MHPA-FPCs. *Energy Procedia*, 2015, vol. 70, pp. 79–86.
12. Vendramin A.L.G., Yamamoto C.I., Nogueira C.E.C., Lenz A.M., Melegari S.N.S. Analysis of the performance of a solar water heating system with flat collector. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 2015, vol. 9 (2), pp. 386–389.
13. Lukutin B.V., Muravyov D.I. Prospects for decentralized DC power supply systems with distributed solar generation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 6. In Rus. Available at: <http://catalog.lib.tpu.ru/catalog/simple/document/RU/TPU/book/376831> (accessed 15 November 2020).
14. Hauer A., Teuffel A. Integration of energy storage into energy systems. *Handbook of Clean Energy Systems*. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118991978.hces215>.
15. Wang F., Zhu Y., Yan J. Performance of solar PV micro-grid systems: a comparison study. *Energy Procedia*, 2018, vol. 45, pp. 570–575.
16. Butuzov V.A. Solar heat supply: statistics of the world market and features of the Russian experience. *Teploenergetika*, 2018, no. 10, pp. 78–88. In Rus.
17. Al-Nama M.A., Al-Hafid M.S., Al-Fahadi A.S. Estimation of the diversity factor for the Iraqi distribution system using intelligent methods. *Al-Rafidain Engineering, Mosul*, 2009, vol. 17 (1), pp. 14–21.
18. Al-Hafid M.S., Al-Nama M.A., Al-Fahadi A.S. Determination of residential electrical load components in Iraqi north region. *Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering, Basra, Iraq*, 2017, vol. 13 (2), pp. 161–165.
19. Milisic Edina. *Modelling of energy storage using phase-change materials (PCM materials)*. Master's Thesis. 2013. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/4053/e5b7e86be6c68a9848fc9b9c5582af9c6616.pdf> (accessed: 15 November 2020).
20. Iraq. Power engineering. *Polpred.com*. № 3607553. DOI: [polpred.com>news/?cnt=618/sector=19](https://polpred.com/news/?cnt=618/sector=19).
21. Shneishil A.H. Design and fabrication of evacuated tube solar thermal collector for domestic hot water. *Journal of college education, Al-Mustansiriyah University, Iraq*, 2016, no. 3, pp. 287–302.
22. NASA Surface Meteorology and Solar Energy. Available at: www.instesre.com/Solar/grid.cgi.htm (accessed 16 November 2020).

23. SNiP 2.04.01-85: *Normy raskhoda vody potrebitelyami* [Water consumption rates by consumers]. Available at: <http://www.stelmarket.ru>teh.inf> (accessed 20 November 2020).
24. Shirko D.I., Doroshevich V.I. *Gigienicheskie trebovaniya k vodosnabzheniyu voennosluzhashikh* [Hygienic requirements for water supply for military personnel]. Minsk, BSMU Publ., 2015. 52 p.
25. *On-line calculator of solar, wind and thermal energy*. Available at: <http://www.helios-house.ru/on-line-kalkulyator.html> (accessed 25 November 2020).
26. *Comparison of batteries: table of types* – BEST ENERGY. Available at: <https://best-energy.com.ua/support/battery/bu-107> (accessed 25 November 2020).
27. *World Tariffs: Gas, Gasoline, and Electricity*. Available at: antonio-merloni.ru/world-gas-tariffs (accessed 25 November 2020).

Received: 23 December 2020.

Information about the authors

Boris V. Lukutin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Karrar Hameed Kadhim, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 504.056; 911.5

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ЛАНДШАФТАХ ЮЖНОГО УРАЛА

Шабанов Михаил Викторович¹,
geohim.spb@gmail.ru

Стрекулов Григорий Борисович¹,
strekulev@gmail.com

¹ Санкт-Петербургский Государственный аграрный университет,
Россия, 196601, г. Пушкин, Петербургское шоссе, 2.

Актуальность. На исследуемой территории развиты различные типы ландшафтов, которые интенсивно используются как в сельскохозяйственном, так и в горнопромышленном производстве. Добыча и переработка рудного сырья вовлекает в круговорот химические элементы, которые аэроенным или атмогенным путем попадают в окружающие ландшафты и загрязняют их. Это приводит к трансформации ландшафтов, появляются техногенные и геохимические аномалии. Поэтому эколого-геохимическая характеристика позволяет выявить основные техногенные факторы, оказывающие негативное влияние на окружающие ландшафты.

Цель: оценить геохимические уровни тяжелых металлов природных и антропогенных ландшафтов.

Объекты: почвы природных и техногенных ландшафтов.

Методы: отбор и подготовка почв, определение элементного состава почв инструментальным инверсионно вольтамперометрическим методом.

Результаты. Приведены результаты геохимических исследований почв природных и техногенных ландшафтов (западной части Челябинской области и востока Республики Башкортостан). Для оценки степени загрязнения было рассчитано фоновое содержание для тяжелых металлов Zn, Cd, Pb, Cu, Ni и Co. На исследуемой территории выделено несколько типов ландшафтов (горный, предгорный, степной и лесной). Произведена оценка негативного влияния горно-металлургических предприятий черной и цветной металлургии, карьерно-отвальных массивов рудного и нерудного материала на загрязнение почв. Установлено, что максимальное превышение фонового содержания тяжелых металлов – вблизи металлургических комбинатов, в наименьшей степени – вблизи карьерно-отвальных систем. По данным индекса суммарного загрязнения установлено, что почвы ландшафта классифицируются от средней до сильной степени загрязнения. По индексу геоаккумуляции выявлены основные центры загрязнения и составлены карты-схемы.

Ключевые слова:

Загрязнение почв, элементный состав почв, суммарный индекс загрязнения, индекс геоаккумуляции, геохимические аномалии.

Введение

Индустриализация и урбанизация, нерациональное использование природных ресурсов человеком приводят к экологическим проблемам, в том числе и к ухудшению свойств земельных ресурсов. В последние десятилетия разработка месторождений и переработка рудного и нерудного материала оказала значительное воздействие на почвенный покров – это загрязнение халькофильными, сидерофильными и литофильными элементами. Загрязнение почв является одним из актуальных вопросов во всем мире. Тяжелые металлы, попадая в окружающую среду, рассеиваются и концентрируются.

В связи с этим ландшафтная оболочка претерпевает изменения в результате деятельности человека. Ландшафт является результатом сложных взаимодействий между социальными, биологическими и физическими силами [1, 2]. Деятельность человека сильно влияет на ландшафты, создавая мозаику природных и управляемых человеком участков [3]. Кроме этого, природные и техногенные ландшафты связаны между собой [2].

Южный Урал является крупнейшим промышленным центром России с исторически сложившейся индустриальной базой. В течение очень длительного времени в этом районе производится добыча и перера-

ботка полезных ископаемых, что приводит к трансформации природных ландшафтов [4–6]. В результате добычи полезных ископаемых рудное сырье извлекается из недр Земли. Химические элементы, которые находились в устойчивых термодинамических равновесных состояниях, оказавшись на поверхности Земли, подвергаются процессам окисления, образуются плавкие формы, которые начинают интенсивно мигрировать в ландшафтах, происходит латеральная дифференциация. Переработка рудного сырья на металлургических комбинатах приводит к рассеиванию тяжелых металлов в виде аэрозольных выбросов в различных соединениях, которые распространяются на значительные расстояния [3]. Они оседают на поверхности почвы, частично вовлекаются в биологический круговорот, часть закрепляется органическим веществом, а часть миграирует в профиле почв, происходит радиальная дифференциация ландшафта [7].

Состав и протяженность потоков рассеяния химических элементов в ландшафтах контролируется общей ландшафтно-геохимической обстановкой [8, 9]. Ландшафты Южного Урала, а именно почвы, являются одним из главных звеньев земледелия, т. е. возникает необходимость выявления современных процессов накопления и распределения тяжелых металлов в каждом ландшафте.

Цель данной работы – оценить геохимические уровни тяжелых металлов природных и антропогенных ландшафтов Южного Урала.

В задачи исследования входило:

- 1) изучить взаимосвязь между загрязнением тяжелыми металлами и ландшафтной структурой;
- 2) установить природу источников загрязнения;
- 3) провести анализ современной эколого-геохимической обстановки, по данным исследования составить геохимические картограммы территории.

Материалы и методы

Изучение ландшафтов проводилось в западной части Челябинской области и на востоке Республики Башкортостан. Данное местоположение выбрано в связи с тем, что здесь сосредоточена основная масса месторождений руд черных и цветных металлов. Объектами исследования являются почвы ландшафтов, расположенные вблизи действующих и заброшенных источников загрязнения – это предприятия черной и цветной металлургии, Магнитогорский металлургический комбинат, Карабаш Медь, а также в районе неработающих горно-обогатительных комбинатов – Баймакский ГОК и Уфалей Никель, кроме этого, в районе отработанных карьеров по добыче рудного сырья – Таш-Тау, Бакр-Тау, Бакр-Узяк, Астафьевское, и действующих – Малый Куйбас, Узельгинское и Учалинское (рис. 1).

Работа выполнялась маршрутно-экспедиционным и лабораторно-аналитическими методами. Места отбора проб были выбраны вблизи карьеров рудного сырья и металлургических комплексов. Расстояние отбора проб зависело от типа использования объекта. Вблизи карьеров пробы отбирались согласно розе ветров на расстоянии 100 и 500 м. В промышленных городах – по радиусу до 10 км, а также в городской черте. Кроме этого, отбирались образцы через каждые 5 км с целью установления границ массопереноса аэрозолей тяжелых металлов и выявления фонового содержания металлов.

Во время маршрута были выбраны наиболее показательные участки ландшафтов, на которых были отобраны почвенные образцы. Морфологическое описание почв производилось по системе индексов и определений горизонтов по «Классификации почв России» [10]. Образцы почв для анализа отбирали послойно с глубины 0–40 см, где происходят основные изменения физико-химических свойств, связанные с антропогенной нагрузкой. Почву высушивали, измельчали, пропускали через сито с диаметром 1 мм. В подготовленных почвенных образцах определяли следующие параметры:

- 1) обменная кислотность в 1M растворе KCl с последующим измерением показателя pH на иономере pH-150МИ [11];
- 2) гранулометрический состав почв по Н.А. Качинскому [12];
- 3) тяжелые металлы инверсионным вольтамперометрическим методом по методике МУ31-11/05, внесенный в Федеральный реестр методик изме-

рений под номером ФР.1.31.2005.02119. Для извлечения валовых форм Zn, Cd, Pb, Cu, Co и Ni воздушно-сухая навеска почвы заливалась 50%-м раствором азотной кислоты в соотношении 1:10 (почва:раствор) с дальнейшим кипячением и давлением 30 %-ного раствора перекиси водорода.

Для составления геохимических картограмм области использовали программное обеспечение ArcGis.

Результаты и их обсуждение

Исследования проводились в западной части Южного Урала, Челябинской области и на востоке Республики Башкортостан. Западная часть территории является горной, центральная преимущественно степная, полого-увалистая, холмистая, северная горнолесная. В зоне исследования было отобрано 95 почвенных образцов (рис. 1).

Протяженность исследуемой территории в широтном направлении 460 км, с запада на восток 215 км.

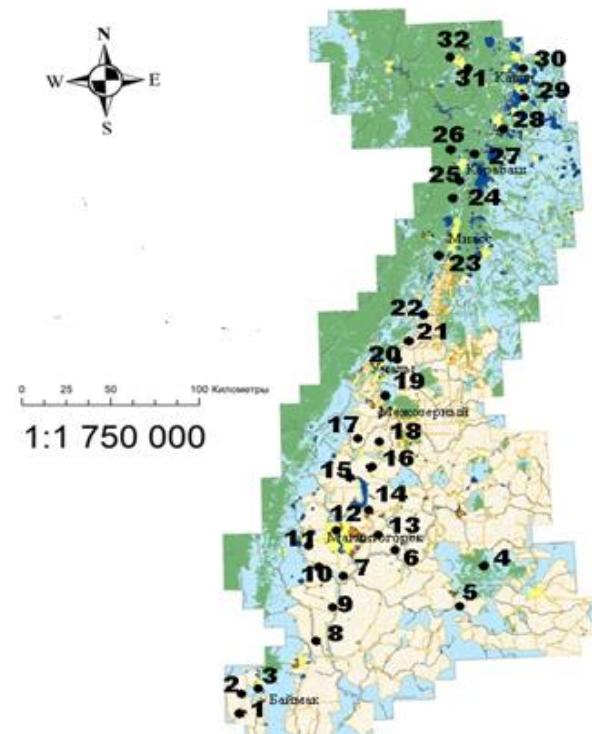


Рис. 1. Схема отбора почвенных образцов

Fig. 1. Soil sampling scheme

Для оценки изменения содержания тяжелых металлов в почве рассчитывалось фоновое их содержание. Фоновыми объектами являются почвы автономных ландшафтов [13]. Оценку содержания тяжелых металлов в почвах ландшафтов производили также в сравнении с кларком [14].

Показатель фона – это величина максимального лимита среднеарифметического значения концентрации элемента при 95 % вероятности (таблица). Превышение концентрации исследуемого элемента над фоновым содержанием свидетельствует о техногенном загрязнении. Расчет фоновых значений производили по формулам [15].

$$\text{Среднее арифметическое } M = \frac{\sum M_i}{n};$$

$$\text{Среднеквадратическое отклонение } \sigma = \sqrt{\frac{\sum (\varepsilon_i)^2}{n-1}};$$

$$\text{Коэффициент вариации } V = \frac{\sigma}{M \cdot 100 \%};$$

$$\text{Ошибка средней арифметической } P = \frac{\sum \varepsilon_i}{n};$$

$$\text{Дисперсия выборки } D = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) n_i}{n}.$$

Таблица. Фоновые показатели валовых форм тяжелых металлов исследуемой территории

Table. Background indicators of gross forms of heavy metals in the study area

Элемент Element	Статистические параметры Statistical parameter							
	n	M	max	min	σ	V, %	P	D
Zn	24	46,80	73,00	9,57	17,20	36,77	3,59	309,52
Cd	42	0,11	0,23	0,01	0,06	54,50	0,01	0,004
Pb	29	13,43	25,70	1,70	5,93	44,19	0,98	24,33
Cu	18	20,56	29,30	9,59	4,14	20,13	1,22	27,08
Ni	7	20,80	27,65	2,80	7,96	38,30	3,27	74,94
Co	15	9,80	20,30	2,00	5,46	55,70	1,41	0,12

Примечание: n – величина выборки, M – среднее значение статистического ряда, \max и \min – максимальные и минимальные значения статистического ряда, V – коэффициент вариации, P – средняя арифметическая ошибка единичного определения, D – дисперсия выборки.

Note: n – sample size, M – the mean value of a statistical range, \max and \min – maximum and minimum values of the statistical range, V – coefficient of variation, R – the average arithmetic error of a single determination, D – the sample variance.

В ходе исследования выделено несколько типов ландшафтов, где формируются различные типы почв. В южной части территории исследуемые почвы относятся к степной почвенно-климатической области. Здесь формируются черноземы миграционно-мицелярные, карболовые темногумусовые и агрочерноземы миграционно-мицелярные. Для рассматриваемых черноземов характерна небольшая мощность темногумусового горизонта – до 35 см, и высокие показатели гумуса – до 10,21 %. Для карболовых и черноземов миграционно-мицелярных характерно наличие карбонатов в верхней части профиля. Реакция среды почвенного профиля от слабощелочной до близко к нейтральной. По гранулометрическому составу почвы тяжелосуглинистые и глинистые.

В южной лесостепи (центральная часть) формируются черноземы глинисто-иллювиальные и агрочерноземы. Мощность темногумусового горизонта до 45 см, высокое содержание гумуса – до 11,61 %, реакция среды близкая к нейтральной. По гранулометрическому составу – тяжелосуглинистые.

Горнолесная группа – здесь сосредоточены в основном литоземы темногумусовые, грубогумусовые и агролитоземы с укороченным профилем до 30 см. Со-

держание гумуса до 16,00 % в темногумусовых и от 8,70 до 10,00 % в агрогумусовых и грубогумусовых. Реакция среды близкая к нейтральной. По гранулометрическому составу легко- и среднесуглинистые.

Северная лесостепь представлена серыми типичными почвами, мощность гумусового горизонта до 35 см. Содержание гумуса до 6,68 %, это преимущественно целинные почвы, занятые естественными сенокосами. Реакция среды от кислой до слабокислой, что обусловлено аэропромывбросами медеплавильного комбината (г. Карабаш).

Севернее формируются дерново-подзолистые почвы, в основном слабоподзолистые с высоким содержанием гумуса до 10,6 %, показатель pH от 4,2 до 5,4. Эти почвы формируются под смешанными хвойными лесами. По гранулометрическому составу легко- и среднесуглинистые.

Почвы являются геохимическим барьером, поглощающим и концентрируя тяжелые металлы, поступающие атмогенным путем в непосредственной близости от источника эмиссии, тем самым образуя геохимические аномалии.

В ходе исследований установлено, что максимальная концентрация тяжелых металлов, поступивших в почвы ландшафтов, закрепляется в верхней части профиля, а содержание металлов в почвенном профиле автономных ландшафтов уменьшается, т. е. загрязнение носит нисходящий характер. Данный факт указывает на то, что высокие концентрации металлов в верхней части профиля имеют техногенную природу. В почвах подчиненных ландшафтов, подверженных избыточному увлажнению, металлы концентрируются в нижней части профиля, что связано с гидрогенной аккумуляцией. В западной части Челябинской области сосредоточена основная масса горнорудного производства, это карьеры и металлургические комбинаты (Баймакский ГОК, Магнитогорский металлургический комбинат, Карабаш Медь, г. Карабаш, и Уфалей Никель, г. Верхний Уфалей).

Концентрация тяжелых металлов в минеральном горизонте сильно варьирует. Содержание цинка – от 16,4 до 382,5 мг/кг, свинца – 4,4...117,5 мг/кг, меди – 9,6...637,5 мг/кг, никеля – 2,8...589,4 мг/кг, кобальта – 2,0...44,2 мг/кг, кадмия – 0,021...2,24 мг/кг. Как видно из представленных результатов, превышение предельно допустимой концентрации для некоторых металлов составляет сотни раз. Для органогенных горизонтов предел колебания в несколько раз выше, что свидетельствует о биоаккумуляции тяжелых металлов. Для цинка предел колебания от 27,0 до 3380,0 мг/кг, кадмий – 0,16...25,6, свинец – 11,3...960,0, медь – 18,8...8300,0, никель – 15,8...618,0 и кобальт – 6,1...15,2 мг/кг.

Таким образом, можно составить ранжированный ряд для минеральных горизонтов Cd>Co>Pb>Zn>Ni>Cu, и для органогенных горизонтов – Co>Cd>Ni>Pb>Zn>Cu.

Территорию исследования можно разделить на пять зон: 1) ландшафты, находящиеся в непосредственной близости к горнometаллургическим комбинатам; 2) карьерно-отвальные ландшафты (рудного сырья); 3) карьерно-отвальные ландшафты (нерудно-

го сырья); 4) сельскохозяйственные ландшафты; 5) целинные ландшафты.

В почвах ландшафтов, примыкающих к горно-металлургическим комплексам, среднее содержание цинка в слое 0–5 см достигает 587,1 мг/кг, в слое 15–30 см – 58,2 мг/кг. Превышение кларка выявлено только в районе медеплавильного комбината – в 68 раз, превышение фона в 72 раза. В остальных точках опробования в 2–8 раз.

Концентрация кадмия в толще 0–5 см 4,8 мг/кг, 15–30 см – 0,75 мг/кг. Величину кларка превышают точки вблизи Баймакского ГОК, Карабаш Медь, г. Карабаш, и Уфалей Никель, г. Верхний Уфалей, в пределах 8–51 раза. Превышение фона в 6–233 раза. Максимальные значения превышения выявлены в г. Карабаш.

Значения содержания валовых форм свинца в толще 0–5 см 207,2 мг/кг, 15–30 см – 22,8 мг/кг. По меди превышение по всем точкам наблюдения. В толще 0–5 см в среднем 1231,4 мг/кг, 15–30 см – 124,4 мг/кг. Превышение кларка в районах цветной металлургии – от 15 до 26 раз, черной металлургии – 15 раз. Превышение фона в 404 раза – цветная металлургия, и в 14 раз черновая.

Никель и кобальт незначительно превышают, в среднем в 2–3 раза, кларк и фоновое содержание. Никеля в слое 0–5 см – 252,12 мг/кг, кобальта – 14,3 мг/кг. В слое 15–30 см никеля – 111,9 мг/кг, кобальта – 9,9 мг/кг.

Карьерно-отвальные выемки также поставляют в окружающие ландшафты загрязняющие вещества либо атмогенным, либо гидрогенным путем. Максимальная концентрация выявлена в почвах вблизи месторождений рудного сырья, в толще 0–5 см цинка – 103,0 мг/кг, меди – 66,2 мг/кг, никеля – 52,3 мг/кг, свинца – 33,4 мг/кг, кобальта – 12,9 мг/кг и кадмия – 2,5 мг/кг. В толще 15–30 см цинка – 85,3 мг/кг, меди – 47,4 мг/кг, никеля – 39,4 мг/кг, свинца – 18,4 мг/кг, кобальта – 20,7 мг/кг и кадмия – 0,32 мг/кг. Превышение кларка и фона незначительное – в среднем в 3–8 раз, за исключением кадмия, превышение кларка которого в 5 раз, фона в 23 раза. Карьеры нерудного сырья характеризуются еще меньшими концентрациями – превышение кларка и фона в среднем в 2–3 раза.

В сельскохозяйственных угодьях и целинных ландшафтах, удаленных на значительное расстояние от источника, ситуация складывается лучше. В слое 0–15 см цинка – 69,5 мг/кг, кадмия – 0,8 мг/кг, свинца – 17,5 мг/кг, меди – 25,5 мг/кг, никеля – 28,4 мг/кг и кобальта – 7,5 мг/кг, что на 12–17 % ниже для цинка, кадмия, свинца, меди и 51 % ниже для кобальта по сравнению с ландшафтами, расположенные вблизи металлургических комбинатов. Концентрация тяжелых металлов в этих ландшафтах обусловлена естественным геохимическим фоном, незначительные превышения обусловлены атмогенным привносом тяжелых металлов, связанным с аэропромывбросами комбинатов, что явилось причиной превышение кларка и фона в среднем в 2 раза, для кадмия – в 10 раз, 17, 18 точки (рис. 1).

В геохимических исследованиях одной из характеристик обстановки окружающей среды является выде-

ление техногенных аномалий. Они образуются в результате поступления веществ химической природы от техногенных источников. Одним из показателей аномальности служит коэффициент техногенной концентрации K_c . K_c от 3 до 10 – средняя степень загрязнения элементами, K_c 2,5 – минимальная концентрация антропогенной геохимической аномалии [16, 17].

Кроме этого, проводилась экологическая оценка района по степени суммарного загрязнения почв тяжелыми металлами. Оценка проводилась по формуле Саэта [18].

$$Z_c = \sum_{i=1}^n K_c - (n-1),$$

где K_c – коэффициент концентрации $K_c = \frac{C_i}{C_\phi}$; C_i – истинное содержание элемента; C_ϕ – фоновое содержание элемента; n – общее число элементов.

Как показывает анализ K_c , коэффициент концентрации превышает фоновое значение. По этим данным были построены ранги тяжелых металлов. В южной части территории (Баймак) $\text{Cu}_3 > \text{Zn}_2 > (\text{Pb}, \text{Ni}, \text{Co}, \text{Cd})_1$. В районе города Магнитогорск $\text{Cu}_3 > (\text{Ni}, \text{Co}, \text{Zn}, \text{Cd})_1$. В северной части территории, г. Карабаш, $\text{Cu}_{31} > \text{Pb}_{11} > \text{Zn}_2 > (\text{Cd}, \text{Co}, \text{Ni})_1$. В районе города Верхний Уфалей, где на протяжении 84 лет действовал никелевый комбинат, $\text{Ni}_{12} > \text{Pb}_5 > \text{Zn}_1 > (\text{Cd}, \text{Cu}, \text{Co})_1$.

Значение суммарного показателя загрязнения на исследуемых ландшафтах сильно различается и зависит от близости источника загрязнения. Большая часть ландшафтов характеризуется средним уровнем Z_c – от 8 до 19 (точки 2, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 20, 23, 29, 32), за исключением участков, где сосредоточена цветная отрасль, – здесь показатель загрязнения Z_c – от 62 до 76 (сильное и очень сильное загрязнение) (точки 9, 24, 25, 26, 31). Объекты, расположенные на значительном удалении от источника загрязнения Z_c – от 3 до 7 (точки 1, 3, 4, 15, 17, 18, 19, 21, 22, 27, 28, 30) (рис. 1).

Индекс геоаккумуляции предложен для оценки уровня загрязнения донных отложений Г. Мюллером [19–21]. Этот индекс может быть использован для оценки загрязнения почв [20–24]. I_{geo} вычисляют по уравнению

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1,5 B_n},$$

где C_n – содержание элемента в почве; B_n – геохимический фон; 1,5 – коэффициент, компенсирующий фоновое содержание за счет литогенных факторов.

I_{geo} делится на семь классов [25]:

- $I_{geo} \leq 0$ – практически незагрязненный;
- $0 < I_{geo} < 1$ – незагрязненный до умеренно загрязненного;
- $1 < I_{geo} < 2$ – умеренно загрязненный;
- $2 < I_{geo} < 3$ – средне загрязненный;
- $3 < I_{geo} < 4$ – сильно загрязненный;
- $4 < I_{geo} < 5$ – сильно загрязненный до чрезмерно загрязненного;
- $5 < I_{geo}$ – чрезмерно загрязненный.

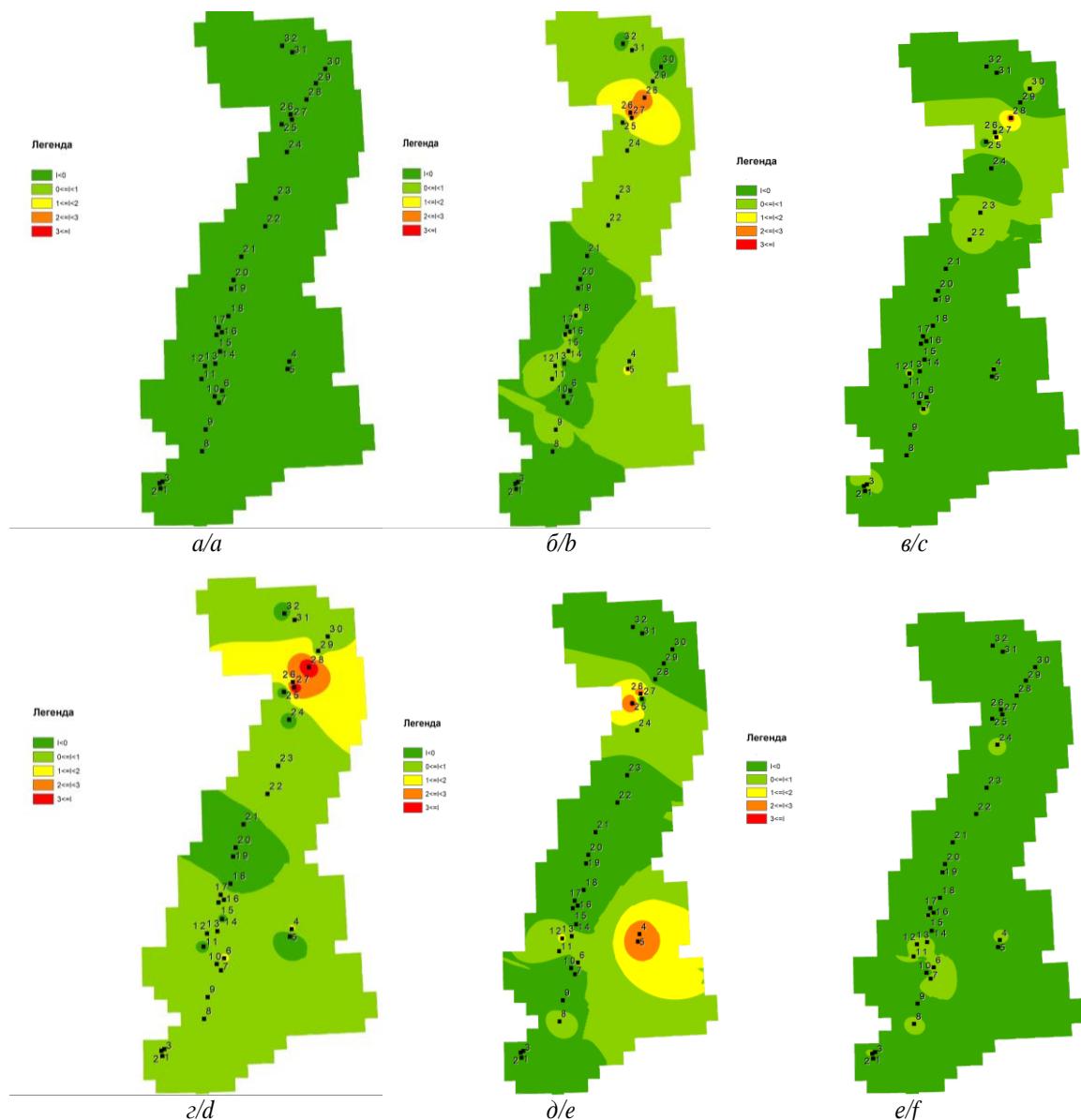


Рис. 2. КартоGRAMмы индекса геоаккумуляции (I_{geo}): а) Zn, б) Cd, в) Pb, г) Cu, д) Ni, е) Co
 Fig. 2. Map of geo-accumulation index (I_{geo}): а) Zn, б) Cd, в) Pb, г) Cu, д) Ni, е) Co

По шкале Мюллера рассчитанные геоаккумулятивные индексы для Zn, Cd, Pb, Cu, Ni и Co находятся в широком диапазоне. По полученным данным видно, что степень загрязнения участков, находящихся в непосредственной близости к горно-металлургическим комбинатам, карьерам, отвалам, от сильной до умеренной. Те участки, которые находятся на отдалении от источника загрязнения, классифицируются как практически незагрязненные. Самые низкие значения I_{geo} по всей исследуемой территории установлены для кадмия – он относится к классу 0-1 (загрязненный до умеренно загрязненного) (рис. 2, б) и кобальту – 0-1 и <1 , что свидетельствует что общий вклад в загрязнение территории незначительный и в основном соответствует фоновому содержанию. Самые высокие значения I_{geo} для меди – 4,41 (рис. 2, д) – очень сильное загрязнение, свинец и никель классифицируются как средне загрязненные (рис. 2, в), цинк (рис. 2, а) преимущественно умеренно загрязненные. На общем

фоне выделяются два участка, связанные с черной (г. Магнитогорск) и цветной металлургией (г. Карабаш).

В районе города Магнитогорск концентрируются лиофильные элементы Ni и Co, в северной части исследуемой территории, г. Карабаш, преимущественно халькофильные Cu, Zn, Pb и лиофильные Ni. Эти предприятия оказывают огромное влияние на загрязнение ландшафтов и их трансформацию.

Карьерно-отвальные ландшафты также привносят как лиофильные, так и халькофильные элементы, но последние доминируют. Эти ландшафты характеризуются как умеренно и средне загрязненные.

Заключение

Геохимическое исследование территории выявило, что воздействие горной промышленности обуславливается видом полезного ископаемого, технологией добычи и переработки. В связи с этим концентрация тяжелых металлов в почвах ландшафтов варьирует в

широком диапазоне. Максимальные концентрации тяжелых металлов выявлены в органогенных горизонтах, превышение фона в сотни раз для всех изученных металлов на глубине 0–15 см, что свидетельствует об их техногенном происхождении.

По данным исследования установлено, что в почвах ландшафтов, подвергенных техногенному воздействию, особенно в районах переработки руд цветных металлов (г. Карабаш), превышение фона по меди в 404 раза, кадмию – 233, цинку – 68 и кобальту с никелем в 2–3 раза. Поступление металлов в основном за счет аэропромывбросов. В условиях добычи руд цветных металлов превышение в среднем в 3–8 раз, тяжелые металлы поступают либо атмогенным, либо гидрогенным путем с отвалов. В районе переработки руд черных металлов ситуация складывается намного лучше, концентрируется преимущественно медь, превышение фона составляет 14 раз, цинк – в 6 раз и кадмий – в 8 раз.

Современная эколого-геохимическая обстановка западной части Челябинской области и востока Республики Башкортостан по содержанию Zn, Cd, Pb, Cu, Ni и Co свидетельствует, что участки, подвергенные техногенному воздействию, имеют от сильной до

очень сильной степень загрязнения, остальные природные ландшафты – слабая и средняя степень загрязнения. В целом геохимическая картина по содержанию тяжелых металлов исследуемой территории удовлетворительная.

По индексу геоаккумуляции были созданы картограммы, из которых видно, что загрязнению свинцом и медью подвержено более 50 % территории, цинком и никелем в меньшей степени, кобальт и кадмий находятся на уровне естественного геохимического фона, за исключением участков, подвергнутых техногенной нагрузке.

По итогам проведенных работ, в соответствии с «Правилами охраны недр», вблизи карьеров и отвалов, на расстоянии до 500 м, на землях, используемых в сельскохозяйственном обороте, в степной зоне исследуемой территории следует производить работы, препятствующие атмогенному и гидрогенному поступлению загрязняющих веществ. В горнолесной зоне на западе исследуемой территории необходимо проводить биологическую рекультивацию склонов, препятствующую развитию ветровой и водной эрозии, осуществлять мониторинг земель, находящихся в непосредственной близости от источников загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Forman R.T.T. Ecologically sustainable landscape: the role of spatial configuration. An Ecological Perspective. – New York: Springer, 1990. – 286 p.
2. Lin Y.P., Teng T.P., Chang T.K. Multivariate analysis of soil heavy metal pollution and landscape pattern in Changhua county in Taiwan // Landscape and Urban Planning. – 2002. – V. 62. – № 1. – P. 19–35. DOI: 10.1016/S0169-2046(02)00094-4.
3. Leduc A., Prairie Y., Bergeron Y. Fractal dimension estimates of a fragmented landscape: source of variability // Landscape Ecological. – 1994. – V. 9. – P. 279–286. DOI: doi.org/10.1007/BF00129239
4. Пахомов В.П., Душин А.В. Оценка минерально-сырьевой безопасности Уральского Федерального округа // Экономика региона. – 2008. – № 3 (15). – С. 129–143.
5. Калашников Ю.А. Адаптация промышленности региона к тенденциям развития мирового хозяйства (на примере Челябинской области) // Вестник Челябинского государственного университета. – 2014. – № 5 (334). – С. 115–120.
6. Наумов И.В., Красных С.С. Исследование межрегиональных взаимосвязей в процессах развития минерально- сырьевого комплекса Российской Федерации // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2019. – № 8. – С. 108–124. DOI: doi.org/10.21440/0536-1028-2019-8-108-124
7. Fingerprinting sedimentary and soil units by their natural metal contents: a new approach to assess metal / A. Amorosi, M. Guermandi, N. Marchi, I. Sammartino // Science of the Total Environment. – 2014. – V. 500–501. – P. 361–372. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.08.078
8. Brian J.A. Sources of heavy metals and metalloids in soils // Heavy Metals in Soils. – 2012. – V. 22. – P. 11–50. DOI: 10.1007/978-94-007-4470-7_2
9. Heavy metal soil contamination around the metallurgical plant of Elbasani in Albania / Fatbardh Sallaku, Shkelqim Fortuzi, Odeta Tota, Bujar Huqi, Demosthenis Chachalis, Mohamend Darawsheh // Journal of Food, Agriculture & Environment. – 2009. – V. 7 (2). – P. 878–881.
10. Классификация и диагностика почв России / Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. – Смоленск: Изд-во ОИКУМЕНА, 2004. – 342 с.
11. ГОСТ 26483-85. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО. – М: Изд-во стандартов, 1985. – 6 с.
12. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почвы. – М.: Изд-во Агропромиздат, 1986. – 416 с.
13. Блохин Е.В., Грошев И.В. Эколого-геохимическое состояние почвенного покрова Оренбургской области // Охрана окружающей среды Оренбургской области: Информационно-аналитический ежегодник. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2002. – С. 103–122.
14. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. – М.: Изд-во сельскохозяйственной литературы, 1957. – 238 с.
15. Савич В.И. Применение вариационной статистики в почвоведении. – М.: Изд-во ТСХА, 1972. – 104 с.
16. Грошев И.В. Мониторинг почв и земель Оренбургской области по загрязнению тяжелыми металлами // Охрана окружающей среды Оренбургской области: Информационно-аналитический ежегодник. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2000. – С. 145–166.
17. Комплексное районирование территории по степени экологического неблагополучия / Ю.А. Тунакова, Г.Н. Жданова, Д.В. Иванов, А.Р. Богданов // Безопасность жизнедеятельности. – 2001. – № 1. – С. 30–37.
18. Саэт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. – М.: Изд-во «Недра», 1990. – 335 с.
19. Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River // Geojournal. – 1969. – V. 2. – P. 108–118.
20. Geoaccumulation assessment of heavy metal pollution in Ikwo soils, eastern Nigeria / A.A. Tyopine, T.J. Jayeoye, Ch.O.B. Okoye // Environmental Monitoring Assess. – 2018. – V. 190. – Article number 58. DOI: doi.org/10.1007/s10661-017-6423-3
21. Assessment of the heavy metal contamination using GIS-based approach and pollution indices in agricultural soils from Beni Amir irrigated perimeter, Tadla plain, Morocco / H. Oumenskou, M.E. Baghdadi, A. Barakat, M. Aquit, W. Ennaji, L.A. Karroum, M. Aadraoui // Arabian Journal of Geosciences. – 2018. – V. 11. – Article number 692. DOI: doi.org/10.1007/s12517-018-4021-5
22. Pollution indices as comprehensive tools for evaluation of the accumulation and provenance of potentially toxic elements in soils in Ojców National Park / R. Mazurek, J.B. Kowalska, M. Gałajorek, P. Zadrożny, J. Wieczorek // National Park Journal of Geochemical Exploration. – 2019. – V. 201. – P. 13–30. DOI: 10.1016/j.gexplo.2019.03.001.
23. Isaac A.O. An assessment of heavy-metal contamination in soils within auto-mechanic workshops using enrichment and

- contamination factors with geoaccumulation indexes // Journal of Environmental Protection. – 2014. – V. 5. – № 11. – P. 970–982.
DOI: 10.4236/jep.2014.511098
24. Heavy metal speciation and pollution of agricultural soils along Jishui River in non-ferrous metal mine area in Jiangxi Province, China / G.N. Liu, L. Tao, X.H. Liu, J. Hou, A.J. Wang, R.P. Li // Geochem Exploration. – 2013. – V. 7 (2). – P. 156–163.
25. Charzyński P., Plak A., Hanaka A. Influence of the soil sealing on the geoaccumulation index of heavy metals and various pollution factors // Environmental Science and Pollution Research. – 2017. – V. 24. – P. 4801–4811. DOI: 10.1007/s11356-016-8209-5

Поступила 23.12.2020 г.

Информация об авторах

Шабанов М.В., кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры почвоведения и агрохимии им. Л.Н. Александровой Санкт-Петербургского Государственного аграрного университета.

Стрекулов Г.Б., аспирант кафедры земельных отношений и кадастра Санкт-Петербургского Государственного аграрного университета.

UDC 504.056; 911.5

GEOCHEMICAL PROCESSES OF ACCUMULATION OF HEAVY METALS IN THE LANDSCAPES OF THE SOUTHERN URALS

Mikhail V. Shabanov¹,
geohim.spb@gmail.com

Grigory B. Strekulev¹,
strekulev@gmail.com

¹ Saint Petersburg State Agrarian University,
2, Petersburg highway, Pushkin, 196601, Russia.

Relevance. Various types of landscapes, which are intensively used both in agricultural and mining production are developed in the study area. Mining and processing of ore raw materials involves chemical elements in the cycle, which enter the surrounding landscapes by aerogenic or atmogenic means and pollute them. This leads to transformation of landscapes, there are man-made and geochemical anomalies. Therefore, the ecological and geochemical characteristics allow us identifying the main technogenic factors that affect negatively the surrounding landscapes.

The main aim of the research is to assess the geochemical levels of heavy metals in natural and anthropogenic landscapes.

Objects: soil of natural and man-made landscapes.

Methods: selection and preparation of soils, determination of the elemental composition of soils by instrumental inversion voltammetric method.

Results. The paper introduces the results of geochemical studies of soils of natural and technogenic landscapes (the Western part of the Chelyabinsk region and the East of the Republic of Bashkortostan). The background content for heavy metals Zn, Cd, Pb, Cu, Ni, and Co was calculated to assess the degree of contamination. Several types of landscapes (mountain, foothill, steppe, and forest) were identified in the study area. The impact of mining and metallurgical enterprises of ferrous and non-ferrous metallurgy, quarry-dump arrays of ore material and non-metallic on soil pollution was evaluated. It was found that the maximum excess of the background content of metals is in the vicinity of metallurgical plants, the lowest degree is near the quarry-dump systems. According to the total pollution index, it is found that the landscape soils are classified from medium to severe pollution. According to the geoaccumulation index, the main centers of pollution were identified and maps were drawn up.

Key words:

Soil pollution, soil elemental composition, total pollution index, geoaccumulation index, geochemical anomalies.

REFERENCES

1. Forman R.T.T. *Ecologically sustainable landscape: the role of spatial configuration. An Ecological Perspective*. New York, Springer, 1990. 286 p.
2. Lin Y.P., Teng T.P., Chang T.K. Multivariate analysis of soil heavy metal pollution and landscape pattern in Changhua country in Taiwan. *Landscape and Urban Planning*, 2002, vol. 62, no. 1, pp. 19–35. DOI: 10.1016/S0169-2046(02)00094-4.
3. Leduc A., Prairie Y., Bergeron Y. Fractal dimension estimates of a fragmented landscape: source of variability. *Landscape Ecological*, 1994, vol. 9, pp. 279–286. DOI: doi.org/10.1007/BF00129239
4. Pakhomov V.P., Dushin A.V. Otsenka mineralno-syrevoy bezopasnosti Uralskogo Federalnogo okruga [Evaluation of the mineral resource base of the Ural Federal district]. *Ekonomika regionala*, 2008, no. 3 (15), pp. 129–143.
5. Kalashnikov Yu.A. Adaptatsiya promyshlennosti regiona k tendentsiyam razvitiya mirovogo khozyaystva (na primere Chelyabinskoy oblasti) [Adapting industry to the development trends of the world economy (on the example of Chelyabinsk region)]. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, no. 5 (334), pp. 115–120.
6. Naumov I.V., Krasnykh S.S. Research of inter-regional relationships in the development of the mineral resource complex of the Russian Federation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyy zhurnal*, 2019, no. 8, pp. 108–124. In Rus. doi.org/10.21440/0536-1028-2019-8-108-124
7. Amorosi A., Guermandi M., Marchi N., Sammartino I. Fingerprinting sedimentary and soil units by their natural metal contents: a new approach to assess metal. *Science of the Total Environment*, 2014, vol. 500–501, pp. 361–372. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.08.078
8. Brian J.A. Sources of heavy metals and metalloids in soils. *Heavy Metals in Soils*, 2012, vol. 22, pp. 11–50. DOI: 10.1007/978-94-007-4470-7_2
9. Fatbardh Sallaku, Shkelqim Fortuzi, Odetta Tota, Bujar Huqi, Demosthenis Chachalis, Mohamend Darawsheh. Heavy metal soil contamination around the metallurgical plant of Elbasani in Albania. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 2009, vol. 7 (2), pp. 878–881.
10. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Classification and diagnostics of Russian soils]. Smolensk, Oikumena Publ., 2004. 342 p.
11. GOST 26483-85. *Prigotovlenie solevoy vtyazhki i opredelenie ee pH po metodu TsINAO* [State Standard 26483-85. Preparation of salt extract and determination of its pH using the tsinao method]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1985. 6 p.
12. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. *Metody issledovaniya fizicheskikh svoistv pochvy* [Methods for studying the physical properties of soil]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986. 416 p.
13. Blokhin E.V., Groshev I.V. *Ekologo-geokhimicheskoe sostoyanie pochvennogo pokrova Orenburgskoi oblasti* [Ecologo-geochemical state of the soil cover of the Orenburg region]. *Okhrana okruzhayushchey sredy Orenburgskoy oblasti: Informatsionno-analiticheskiy ezhegodnik* [Environmental Protection of the Orenburg region: Information and analytical Yearbook]. Orenburg, Orenburg state University Publ., 2002. pp. 103–122.
14. Vinogradov A.P. *Geokhimiya redkikh i rasseyannykh khimicheskikh elementov v pochvakh* [Geochemistry of rare and scattered chemical elements in soils]. Moscow, Izdatelstvo Selskokhozyaistvennoy literatury, 1957. 238 p.
15. Savich V.I. *Primenenie variatsionnoy statistiki v pochvovedenii* [Application of variational statistics in soil science]. Moscow, TSKhA Publ., 1972. 104 p.
16. Groshev I.V. Monitoring pochv i zemel Orenburgskoy oblasti po zagryazneniyu tiazheymi metallami [Monitoring of soils and lands of the Orenburg region on pollution with heavy metals].

- Okhrana okruzhayushchey sredy Orenburgskoy oblasti: Informatsionno-analiticheskii ezhegodnik* [Environmental Protection of the Orenburg region: Information and analytical Yearbook]. Orenburg, Orenburg State University Publ., 2000, pp. 145–166.
17. Tunakova Yu.A., Zhdanova G.N., Ivanov D.V., Bogdanov A.R. Kompleksnoe raionirovanie territorii po stepeni ekologicheskogo neblagopoluchiya [Complex zoning of the territory according to the degree of ecological trouble]. *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti*, 2001, no. 1, pp. 30–37.
18. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Environmental geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.
19. Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 1969, vol. 2, pp. 108–118.
20. Tyopine A. A., Jayeoye T. J., Okoye Ch. O. B. Geoaccumulation assessment of heavy metal pollution in Ikwo soils, eastern Nigeria. *Environmental Monitoring Assess*, 2018, vol. 190, Article number 58. DOI: doi.org/10.1007/s10661-017-6423-3
21. Oumenskou H., Baghdadi M.E., Barakat A., Aquit M., Ennaji W., Karroum L.A., Aadraoui M. Assessment of the heavy metal contamination using GIS-based approach and pollution indices in agricultural soils from Beni Amir irrigated perimeter, Tadla plain, Morocco. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, vol. 11, Article number 692 DOI: doi.org/10.1007/s12517-018-4021-5
22. Mazurek R., Kowalska J.B., Gąsiorek M., Zadrożny P., Wieczorek J. Pollution indices as comprehensive tools for evaluation of the accumulation and provenance of potentially toxic elements in soils in Ojców National Park. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, vol. 201, pp. 13–30 DOI: 10.1016/j.gexplo.2019.03.001.
23. Isaac A.O. An assessment of heavy-metal contamination in soils within auto-mechanic workshops using enrichment and contamination factors with geoaccumulation indexes. *Journal of Environmental Protection*, 2014, vol. 5, no. 11, pp. 970–982. DOI: 10.4236/jep.2014.511098
24. Liu G.N., Tao L., Liu X.H., Hou J., Wang A.J., Li R.P. Heavy metal speciation and pollution of agricultural soils along Jishui River in non-ferrous metal mine area in Jiangxi Province, China. *Geochem Exploration*, 2013, vol. 7.(2), pp. 156–163.
25. Charzyński P., Plak A., Hanaka A. Influence of the soil sealing on the geoaccumulation index of heavy metals and various pollution factors. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, pp. 4801–4811. DOI: 10.1007/s11356-016-8209-5

Received: 23 December 2020.

Information about the authors

Mikhail V. Shabanov, Cand. Sc., associate professor, Saint Petersburg State Agrarian University.

Grigory B. Strekulev, post-graduate student, Saint Petersburg State Agrarian University.

УДК 551.577:51(480+470.22), 519.25

ОЦЕНКА СОСТАВА АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ ТЕРРИТОРИИ ФИНЛЯНДИИ И КАРЕЛИИ МЕТОДАМИ МНОГОМЕРНОГО АНАЛИЗА

Феоктистов Владимир Михайлович¹,
feoklistov@petrsu.ru

Лери Марина Муксумовна²,
lери@krc.karelia.ru

¹ Петрозаводский государственный университет,
Россия, 185910, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33.

² Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр РАН»,
Россия, 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью достоверной оценки состава атмосферных осадков, выявления и распознания источников их загрязнения, а также поиска методик контроля антропогенного воздействия на окружающую среду. Анализируются данные, собранные на территории Финляндии и Республики Карелия в начале 2000-х гг. в рамках международного проекта «Экогеохимия Баренцева региона». Ценность именно этих исходных данных обусловлена тем, что сбор проб атмосферных осадков, их подготовка и аналитическая обработка выполнялись строго по единой методике. Настоящая работа представляет собой продолжение предыдущих исследований, в которых был проанализирован состав атмосферных осадков российской части данного проекта.

Цель: изучить и сравнить химический состав атмосферных осадков нескольких пунктов наблюдений на территории Финляндии и Республики Карелия, оценить возможные источники их загрязнения, классифицировать пункты наблюдений и ассоциации химических элементов в атмосферных осадках.

Объекты: пять пунктов сбора атмосферных осадков на территории Финляндии и два на территории Республики Карелия.

Методы: сбор месячных проб атмосферных осадков и подготовка проб по единой методике, масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой, математическая обработка результатов с помощью углубленных методов многомерного статистического анализа, обобщение материала.

Результаты анализа формирования химического состава атмосферных осадков на территории Финляндии и части Республики Карелия в рамках проекта «Экогеохимия Баренцева региона» посредством иерархического факторного анализа показали определяющее значение нескольких различных факторов первого порядка, обусловленных общими источниками происхождения. В качестве источников формирования состава атмосферных осадков показаны специфические и летучие продукты сжигания топлива, морские, земляные и почвенные аэрозоли. Факторы второго порядка выявили две независимые совокупности ингредиентов, присущие химическому составу атмосферных осадков исследованных пунктов наблюдений в зимнее и летнее время года. Классификация пунктов наблюдения посредством кластеризации показала степень их различия между собой. Кроме того, кластерный анализ элементного состава атмосферных осадков выявил сходную с результатами иерархического факторного анализа картину распределения химических ингредиентов в атмосферных осадках рассматриваемой территории.

Ключевые слова:

Атмосферные осадки, химический состав, кислотность, общие выпадения, МС-ИСП, иерархический факторный анализ, кластерный анализ.

Введение

Химический состав атмосферных осадков (АО) остается одной из актуальных проблем экологических исследований. Первостепенное внимание уделяется поиску природных, городских и антропогенных источников их загрязнения [1–5], влиянию метеорологических условий на перенос загрязнителей [6–8], составу сухих и влажных выпадений [9], качеству дождевой воды для хозяйственных целей [10], а также её влиянию на здоровье человека и окружающую среду [11]. Так, недавно был проведен анализ состава АО Российского Заполярья [12]. Практически во всех вышеперечисленных работах для обобщения полученных аналитических результатов применяются математические методы одномерного и многомерного анализа данных. Использование этих методов обусловлено применением многоэлементных методов анализа (нейтронно-активационный анализ, рентгеновская флуоресценция, масс-спектрометрия с иони-

зацией атомов в индуктивно связанный плазме (МС-ИСП) и др.), которые обеспечивают исследователя большим количеством информации. Осмыслить и интерпретировать такой объем полученных данных методами описательной статистики не представляется возможным.

Цель настоящей работы состояла в том, чтобы проанализировать состав химических ингредиентов, выпадающих с атмосферными осадками в пунктах наблюдений Финляндии и Республики Карелия по проекту «Экогеохимия Баренцева региона», а также установить и оценить возможные источники их загрязнения, классифицировать пункты наблюдений и выявить ассоциации химических элементов.

Объекты и методика исследования

Сбор образцов АО по проекту «Экогеохимия Баренцева региона» выполнен с июня 2000 по май 2001 г. на 25-ти станциях территории Российской Фе-

дерации и на пяти на территории Финляндии. В данной работе рассматриваются результаты химического анализа проб АО, собранных на пяти пунктах территории Финляндии и двух пунктах на территории Республики Карелия. Все пункты сбора АО находятся вблизи небольших населенных пунктов. На территории Финляндии пункты наблюдений АО расположены по разрезу от Лапландии (Vuotsu) до побережья Балтийского моря (Sarkisalo) (рис. 1). Среднее расстояние между пунктами наблюдений – около 300 км. Максимальное число жителей проживает в Kuhmo (около 9 тысяч человек). Ранее [13–15] аналогичное исследование было проведено для станций севера европейской части России.

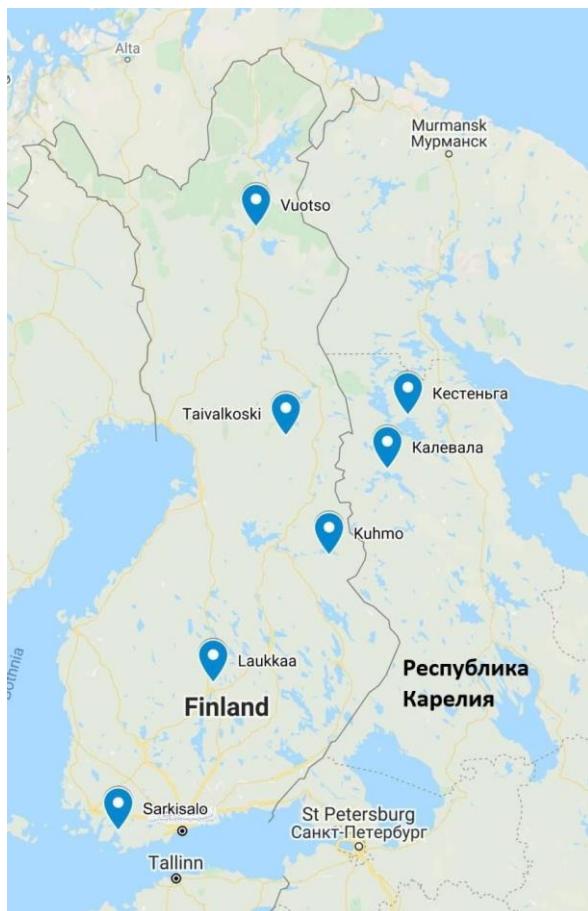


Рис. 1. Пункты отбора проб атмосферных осадков
Fig. 1. Collection stations of atmospheric precipitation samples

Пункты сбора АО на территории Республики Карелия расположены вблизи метеостанций «Кестенъга» и «Калевала» (рис. 1). По климатическим условиям они близки финским пунктам и также находятся на окраинах небольших населенных пунктов (до нескольких тысяч жителей). Здесь нет крупных промышленных предприятий. Приблизительно в 60 км на юго-запад от пгт. Калевала находится крупный источник антропогенных выбросов – Костомушский ГОК с карьерами. В 100 и более километрах севернее п. Кестенъга располагается Кольский полуостров – крупнейший промышленный регион на северо-западе России.

На всей территории Баренцева региона отбор и обработка проб АО выполнялись по единой методике с использованием одинакового оборудования [16]. Подробно методика отбора проб АО и их аналитической обработки рассмотрена ранее в [14, 15]. Пробы АО собирались в одноразовые полиэтиленовые мешки, располагавшиеся внутри сборников АО. Сборник представлял собой картонный цилиндр, снаружи покрытый алюминиевой фольгой. Среднюю пробу АО, выпавших за месяц, собирали автоматической пипеткой в два флакона. Пробы из первого флакона использовались для определения pH, электропроводности и анионов (SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- и F^-) методом ионной хроматографии. Из подкисленной пробы второго флакона с помощью метода МС-ИСП определяли микрокомпоненты: Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Br, Ca, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, I, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Rb, S, Sb, Se, Si, Sn, Sr, Th, Tl, U, V, Zn. Подготовку проб к анализу и аналитические определения проб АО были выполнены в Espoo (Финляндия), в лаборатории Геологической службы.

Полученные результаты химического состава АО характеризуют суммарные (влажные и сухие) выпадения. Достоверность и правильность полученных результатов гарантируется системой аккредитации финской аналитической лаборатории.

В качестве массива исходных данных для статистической обработки используется совокупность результатов химических анализов проб АО всех станций. Из рассмотрения пришлось исключить часть микроэлементов (Ag, Be, Bi, Co, F, Cs, I, Li, Se, Sn, Th, Tl, U), содержание которых в пробах АО было ниже минимальных предельных значений обнаружения метода анализа.

Методика многомерных анализов

Факторный анализ (ФА), как один из методов снижения размерности данных, широко применяется российскими и зарубежными авторами для интерпретации результатов исследований. Цель использования этого анализа в данной работе состоит в сокращении количества исходных переменных путем формирования новых переменных (так называемых факторов) на основе их внутренних взаимосвязей. Факторы, полученные в результате этого, представляют собой интегральные группы ингредиентов, которые позволяют компетентно интерпретировать полученные результаты. Количество факторов существенно меньше числа исходных переменных, что значительно упрощает интерпретацию полученных результатов.

Под понятием «фактор» понимается совокупность химических ингредиентов, объединенных высокими факторными нагрузками. Высокая факторная нагрузка химического ингредиента показывает его значительный вклад в фактор. В факторном анализе, в отличие от метода главных компонент, который широко применяется на практике, можно рассчитать величину значения фактора каждой пробы АО. Эта возможность используется в работе для выявления динамики значений фактора в течение года для всех пунктов наблюдений.

Иерархический факторный анализ (ИФА), использованный в настоящей работе, был опробован ранее в работах [13–15]. Вкратце можно отметить, что проведение этого анализа заключается в том, что из матрицы парных корреляций, стандартизованных значений концентраций химических показателей методом «максимального правдоподобия» с их косоугольным вращением, были получены факторы первого порядка. Они могут быть коррелированы между собой и поэтому могут использоваться для получения независимых друг от друга факторов более высокого порядка [17]. Принадлежность фактора к тому или иному источнику формирования состава АО определялась как по собственным [14–16], так и по литературным данным [1–5].

Факторные нагрузки факторов первого и второго порядка, а также значения факторов первого порядка получены с помощью модуля «Факторный анализ» пакета «Статистика 10.0». Значения факторов второго порядка рассчитаны с помощью множественного регрессионного анализа [17] с использованием ПО «Wolfram Mathematica 9.0».

Кластерный анализ использован в данной работе как для сравнения пунктов наблюдений по совокупности всех результатов химического состава их АО, так и для выявления внутренних взаимосвязей отдельных химических ингредиентов между собой. Стандартизованные значения химических показателей исследуемых пунктов наблюдений обработаны методом Варда [18]. В качестве меры сходства (ближности) между двумя объектами выбрано евклидово расстояние. Достоинством кластерного анализа является возможность наглядного изображения полученных отношений в виде дендрограммы.

Результаты исследования и их обсуждение

Ниже приводятся результаты рассмотрения и анализа химического состава АО на территории Финляндии и России, полученные в проекте «Экогоехимия Баренцева региона» (пять пунктов на территории Финляндии и два на территории Республики Карелия). Географическое положение пунктов сбора АО характеризуется удаленностью от крупных промышленных центров и расположением вблизи небольших населенных пунктов. Особенностью расположения пунктов наблюдения Финляндии является их меридиональное размещение с севера на юг страны, от Лапландии до побережья Ботнического залива. При этом расположение российских пунктов наблюдений АО (рис. 1) соответствует центральной части Финляндии (ближайший финский пункт – Кюхмо).

Химический состав АО отдельного пункта наблюдений обуславливается выбросами в атмосферу местных источников, метеорологическими условиями, а также загрязнителями, поступившими за счет трансграничного переноса с соседних территорий. В табл. 1 представлены среднегодовые и среднесе-

зонные значения для зимнего (ноябрь–март) и летнего (апрель–октябрь) сезонов года концентраций химических ингредиентов для 82 образцов атмосферной влаги. Атмосферные осадки всех пунктов наблюдений имели слабокислую реакцию среды. В течение всего периода наблюдений значения pH для зимнего периода были достаточно однородны и составляли 4,36–4,78. Летом, под воздействием почвенных аэрозолей и золовой пыли, кислотность АО понижалась до 5,04–6,26 ед. pH.

Для большинства показателей химического состава АО на территории Финляндии можно отметить увеличение концентраций с севера на юг. Исключение составляют Mo и Na, кроме прибрежного пункта наблюдений (Sarkisalo). Это объясняется, с одной стороны, тем, что естественные биологические процессы на севере Финляндии существенно заторможены из-за суровых северных условий. С другой стороны, плотность населения в центре и на юге значительно выше, и здесь сосредоточена основная промышленность. Зимой, как правило, наблюдается некоторое увеличение концентраций ряда показателей (As, S, SO_4^{2-} , V), что связано с попаданием в атмосферу продуктов сжигания различных видов топлива. Ранее отмечалось, что загрязнение АО юго-восточной Финляндии продуктами сжигания топлива значительно меньше, чем на территории России [19].

При общем рассмотрении можно отметить, что концентрации химических ингредиентов в составе АО на финской и российской территориях проекта были близки, при этом в АО п. Кестеньга наблюдались максимальные концентрации Al и Fe. Необычно высокие концентрации ряда показателей в составе АО были обнаружены в летние месяцы года в Кюхмо (Mg, K, Mn и Rb). Исключение составляют АО Sarkisalo. Здесь явно прослеживается влияние морских аэрозолей, а также ингредиентов, характерных для антропогенной деятельности – сжигания топлива.

Надо отметить, что все рассматриваемые пункты наблюдений, как финской, так и российской территорий, располагаются вдали от крупных промышленных выбросов. Поэтому каких-либо существенных изменений антропогенной нагрузки на них нами не предполагалось.

Иерархический факторный анализ

Матрица концентраций рассматриваемых ингредиентов состояла из 28 показателей для 82 месячных проб АО. Посредством метода максимального правдоподобия с косоугольным вращением стандартизованных значений концентраций ингредиентов АО были получены шесть факторов первого порядка. На рис. 2 показана динамика месячных значений факторов первого порядка, полученных для рассматриваемых пунктов наблюдений. Для каждого фактора приведены переменные с наибольшими факторными нагрузками.

Таблица 1. Средние концентрации химических показателей за год, зимний (зима) и летний (лето) периоды года, $\mu\text{g/L}$

Пункт/ Station/ Показатель/ Analyte	Vuotsio						Taivalkoski						Kuhmo						Laukkaa						Sarkisalo						Кестенъя Kestenga						Калевала Kalevala					
	год year	зима winter	лето summer	год year	зима winter	лето summer	год year	зима winter	лето summer	год year	зима winter	лето summer	год year	зима winter	лето summer	год year	зима winter	лето summer	год year	зима winter	лето summer	год year	зима winter	лето summer	год year	зима winter	лето summer	год year	зима winter	лето summer	год year	зима winter	лето summer									
Al	6,02	3,21	8,82	5,12	5,42	4,77	10,1	11,6	9,27	15,2	14,0	16,6	14,2	13,8	14,7	22,9	20,2	25,6	10,9	9,61	12,1																					
As	0,097	0,070	0,12	0,103	0,090	0,118	0,100	0,103	0,104	0,121	0,125	0,117	0,194	0,212	0,173	0,181	0,275	0,087	0,126	0,147	0,105																					
B	0,946	0,878	1,01	1,05	0,340	1,87	1,86	0,840	2,86	0,988	0,687	1,34	1,58	0,83	2,46	0,528	0,610	0,445	0,558	0,483	0,633																					
Ba	0,246	0,108	0,38	0,408	0,262	0,578	0,950	0,784	1,03	0,773	0,767	0,780	0,753	0,583	0,952	2,32	3,13	1,50	0,845	0,833	0,857																					
Br	1,750	1,218	2,24	2,52	1,23	4,03	1,87	1,42	2,32	1,57	1,38	1,79	2,96	2,64	3,33	1,91	1,46	2,36	2,29	2,13	2,46																					
Ca	80,9	45,2	116,7	137	108	160	226	195	232	147	141	155	286	173	418	211	262	160	187	172	202																					
Cd	0,025	0,019	0,03	0,038	0,032	0,045	0,043	0,044	0,040	0,059	0,053	0,065	0,072	0,077	0,067	0,067	0,050	0,050	0,036	0,050	0,057	0,044																				
Cr	0,057	0,050	0,06	0,054	0,050	0,059	0,073	0,069	0,083	0,050	0,050	0,050	0,083	0,095	0,069	0,075	0,075	0,074	0,077	0,088	0,083	0,093																				
Cu	0,756	0,566	0,95	0,718	0,435	1,05	0,942	0,420	1,80	0,623	0,415	0,867	0,693	0,612	0,788	0,648	0,498	0,798	1,21	1,47	0,953																					
Fe	5,15	3,50	6,80	5,20	5,40	4,98	8,86	8,64	10,4	16,6	15,0	18,5	17,1	17,7	16,3	21,3	15,4	27,2	10,4	8,90	12,0																					
K	102	19,2	184,0	254	40,0	503	920	97,3	1531	148	67,9	241	278	63,5	529	125	91,1	159	155	55,7	254																					
Li	0,025	0,025	0,025	0,034	0,025	0,044	0,025	0,025	0,025	0,027	0,025	0,025	0,028	0,028	0,025	0,031	0,036	0,033	0,040	0,027	0,029	0,025																				
Mg	34,1	19,7	42,6	44,1	20,3	71,9	138	44,7	183	34,1	28,3	40,9	89,5	55,8	129	46,8	48,3	45,2	40,7	27,3	54,1																					
Mn	2,29	0,41	4,17	6,25	1,00	12,4	21,2	6,03	36,4	3,17	2,43	4,03	5,57	2,01	9,72	6,81	9,38	4,25	4,58	3,84	5,31																					
Mo	0,027	0,028	0,030	0,027	0,025	0,025	0,028	0,020	0,012	0,023	0,022	0,025	0,033	0,035	0,032	0,019	0,022	0,017	0,018	0,020	0,017																					
Na	135	153	118	141	113	169	134	124	144	108	107	108	313	329	295	113	113	113	125	123	127																					
Ni	0,168	0,154	0,18	0,159	0,127	0,197	0,268	0,190	0,354	0,205	0,223	0,183	0,313	0,313	0,313	0,203	0,192	0,213	0,210	0,220	0,200																					
P	51,6	5,00	98,2	169	20,1	342	304	6,12	635	60,1	22,0	105	66,4	8,4	134	27,6	7,08	48,1	59,9	6,63	11,3																					
Pb	0,519	0,456	0,58	0,79	0,80	0,77	0,85	1,04	0,60	1,04	1,09	0,98	1,81	2,44	1,07	0,930	1,22	0,637	1,13	1,40	0,85																					
Rb	0,242	0,042	0,44	0,412	0,082	0,797	1,82	0,250	3,30	0,360	0,220	0,523	0,385	0,140	0,672	0,333	0,277	0,390	0,382	0,135	0,630																					
S	400	400	535	586	484	661	460	862	430	461	400	497	594	400	448	496	400	434	469	400																						
Sb	0,076	0,048	0,100	0,158	0,048	0,287	0,122	0,148	0,102	0,078	0,070	0,087	0,110	0,078	0,147	0,083	0,103	0,063	0,192	0,123	0,260																					
Si	13,9	10,0	17,8	18,2	10,0	27,7	21,4	16,5	27,2	16,5	14,7	18,5	25,1	18,0	33,3	27,7	22,7	32,6	15,5	15,6	15,4																					
Sr	0,433	0,266	0,60	0,466	0,415	0,525	1,10	1,06	0,723	0,783	0,652	1,02	0,752	1,32	1,24	1,72	0,77	0,836	0,913	0,758																						
V	0,192	0,180	0,20	0,231	0,247	0,213	0,258	0,342	0,152	0,355	0,410	0,292	0,587	0,735	0,415	0,331	0,390	0,272	0,304	0,355	0,253																					
Zn	3,69	4,20	3,19	3,61	2,44	4,97	7,31	4,08	9,09	3,75	3,35	4,21	6,72	6,09	7,47	4,73	5,68	3,78	4,59	4,36	4,82																					
pH	5,01	4,53	5,5	5,28	4,50	6,19	5,34	4,36	6,26	4,80	4,56	5,08	4,72	4,42	5,08	4,91	4,78	5,04	4,85	4,53	5,16																					
Cl ⁻	199	252	145	148	147	178	162	195	174	182	165	430	486	375	162	188	135	152	168	137																						
NO ₃ ⁻	633	706	560	898	1120	638	1050	1540	1410	1690	2130	2270	1970	863	1220	508	1110	1260	963																							
SO ₄ ²⁻	1730	2260	1200	2770	3390	2030	2960	4230	1850	3040	3820	2140	4950	6740	2860	1720	2000	1450	3020	4180	1870																					

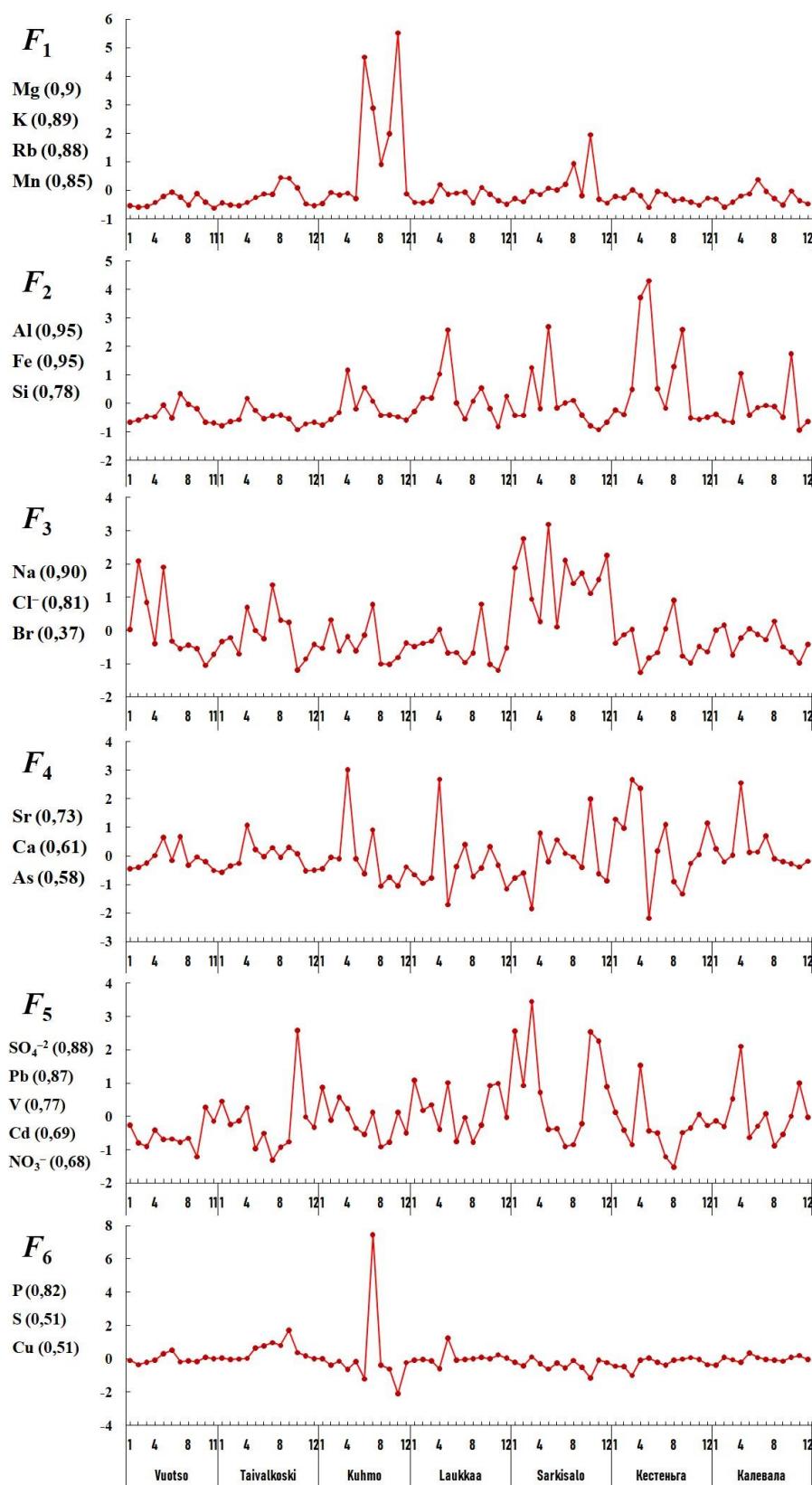


Рис. 2. Выраженность факторов первого порядка по составу и месяцам года по пунктам наблюдений: по оси абсцисс отмечены месяцы года и названия пунктов наблюдений, по оси ординат – значения факторов F_1 – F_6 ; для каждого фактора приведены элементы, вносящие максимальный вклад и величины их факторных нагрузок (в скобках)

Fig. 2. Severity of factors of the first order in composition and months of the year at observation stations: the abscissa marks the months of the year and the names of observation stations, the axis of ordinates shows the factors F_1 – F_6 ; for each factor, elements are presented that make the maximum contribution and the values of their factor loads (in brackets)

Вклад в полную дисперсию первого фактора (F_1) первого порядка составляет 24,4 %. F_1 характеризуется высокими нагрузками элементов Mg, K, Mn и Rb, а также средними нагрузками Zn и Br. Максимальное значение этого фактора наблюдалось в июне и октябре в АО Kuhmo. Для остальных пунктов наблюдений значения этого фактора минимальны (рис. 2). Подобное сочетание элементов (без марганца) встречалось авторами при изучении АО российских районов Баренцева региона [16], а также отмечалось в других работах (например, [19]). Элементный состав данного фактора предусматривает биологическое происхождение и связан в основном с деятельностью почвенных микроорганизмов. Высокая факторная нагрузка марганца, по-видимому, объясняется особенностями данного пункта наблюдений. В условиях кислого гумидного климата, характерного для северных территорий и Финляндии, марганец становится более «подвижным» [20] и может легко выносится из торфяных почв [21, 22]. Можно предположить, что данный пункт наблюдения был выбран неоправданно близко к месту расположения предприятия по добыче или переработке торфа. В результате получилось очень интенсивное местное воздействие почвенных аэрозолей на состав АО данного пункта, что в целом нетипично для территории Финляндии.

Для второго фактора F_2 (22,8 %) обнаружены высокие нагрузки микроэлементов Al, Fe, Si. Наибольшие значения фактора наблюдались для АО п. Кестеньга (апрель, май, сентябрь), Sarkisalo, Laukka (май) и п. Калевала (апрель и октябрь). Состав этого фактора, а также его максимальные значения в весенний и осенний периоды года указывают на то, что его источником является аэрозоль земляной пыли. Так, для п. Кестеньга можно отметить малое количество дорог с асфальтовым покрытием, что и объясняет высокую концентрацию в этом пункте вышеуказанных элементов.

Третий фактор (F_3) (10,3 %) имеет высокие нагрузки для ингредиентов Na и Cl⁻ и среднюю для Br. Эти показатели обусловлены влиянием морских аэрозолей [3, 16]. Для АО Sarkisalo влияние этого фактора обнаруживалось практически весь год, так как этот пункт расположен на берегу моря. Стоит отметить поступление компонентов морского аэрозоля и для континентальных пунктов наблюдений – Vuotso (февраль и май) и Кестеньга (август). Это, по-видимому, сопровождается также затоком холодного воздуха.

Четвертому фактору (F_4) (5,7 %) присущи максимальные значения факторных нагрузок ингредиентов Sr, Ca, As и Ba. Эти элементы наблюдаются в атмосферных выбросах при сжигании древесины, торфа и, частично, каменного угля (например, в п. Кестеньга). Кроме того, Sr, As и Ba могут появляться в АО в результате влияния выбросов автомобильного транспорта [2].

Пятый фактор (F_5) (4,8 %) характеризуется высокими нагрузками ряда специфических показателей (SO₄⁻², Pb, V, Cd, и NO₃⁻). Эти показатели появляются в составе АО при сжигании различных видов топлива

(в частности, мазута) [16]. Из рассматриваемых пунктов наблюдений наиболее характерная выраженность этого фактора отмечена для Sarkisalo. Здесь наблюдались высокие значения этого фактора в зимние месяцы года и резкое их уменьшение в летний период. Это показывает явное антропогенное влияние на состав АО. В других пунктах наблюдений часто отмечаются его высокие значения в начале весны (март, апрель) (рис. 2). Это явление отмечается не только для данного фактора, но также и для факторов F_2 и F_4 . Установлено, что оно связано с более эффективным промыванием атмосферы жидкой каплей воды, чем кристаллической снежинкой [20].

В шестом факторе первого порядка (F_6) (3,6 %) выявлена высокая факторная нагрузка для фосфора P и средние для S и Cu. Максимальное и подавляющее значение этого фактора отмечено для Kuhmo (июль). Этот фактор, по-видимому, связан с первым фактором (F_1), который также характерен для этого пункта наблюдений. Однако в настоящее время источник происхождения фактора F_6 определить трудно.

Отдельные факторы первого порядка показали значительные (>0,5) коэффициенты корреляции между собой (табл. 2). Поэтому были вычислены два фактора второго порядка (Φ_1 и Φ_2) (рис. 3). Они, в соответствии с методикой факторного анализа [17], ортогональны.

Таблица 2. Матрица коэффициентов корреляции между косоугольными факторами первого порядка

Table 2. Matrix of correlation coefficients between oblique factors of the first order

Фактор Factor	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
F_1	1					
F_2	0,32	1				
F_3	0,43	0,37	1			
F_4	0,46	0,71	0,53	1		
F_5	0,16	0,53	0,54	0,59	1	
F_6	0,70	0,39	0,51	0,39	0,21	1

В составе первого фактора второго порядка (Φ_1) высокие факторные нагрузки имели микроэлементы P, Mg, K, Zn, S, Rb, Br. В его состав вошли ингредиенты первого и шестого факторов первого порядка. Максимальные значения Φ_1 отмечены для летнего периода в Kuhmo (июль). В остальных пунктах наблюдения его значения более низкие, но также в летние месяцы года. Как было отмечено выше, фактор F_1 характеризуется вымыванием из атмосферы элементов микробиологического аэрозоля почвы. Сопоставление значений этого фактора на всех пунктах наблюдений свидетельствует о том, что его значение в Kuhmo следует отнести к антропогенному влиянию, нетипичному для природы изучаемого северного региона.

В состав Φ_2 вошла большая группа показателей: As, Cd, Pb, V, Sr, Al, Ca, NO₃⁻, Fe и SO₄⁻². Этот фактор сформирован ингредиентами второго, четвертого и пятого факторов первого порядка. В составе Φ_2 представлены микроэлементы, привносимые аэрозолями земляной пыли, продуктами сжигания различ-

ных видов топлив и, возможно, аэрозолями других антропогенных источников. Наиболее наглядно сочетание элементов этого фактора выражено в зимний период для пункта Sarkisalo. На остальных пунктах он

представлен, как правило, в весенние месяцы. Как было отмечено ранее, это связано с переходом в это время года агрегатного состояния АО от твердого состояния (снег) в жидкое (вода).

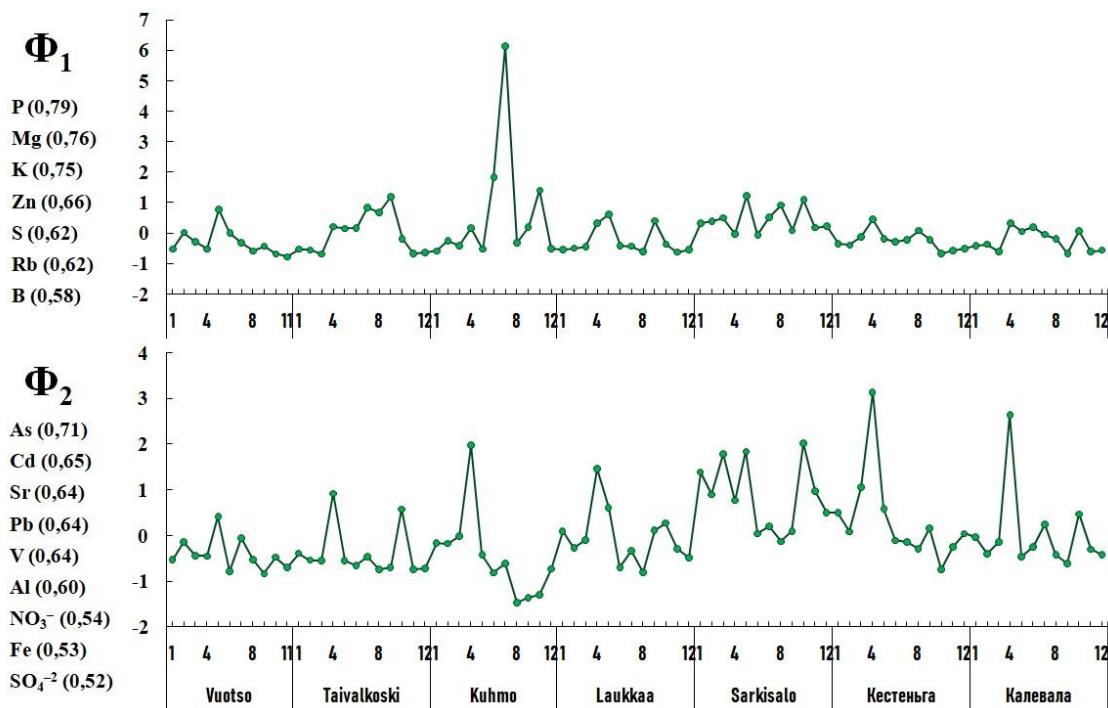


Рис. 3. Выраженность факторов второго порядка (Φ_1 , Φ_2) по составу и месяцам года по станциям наблюдений: см. обозначения к рис. 2

Fig. 3. Severity of factors of the second order (Φ_1 , Φ_2) in composition and months of the year at observation stations: see the notations in Fig. 2

Кластерный анализ

Для оценки степени сходства (различия) рассматриваемых пунктов наблюдений в работе проведен кластерный анализ по совокупности всех показателей. Методом Варда [18] была вычислена мера евклидова расстояния между парами отдельных пунктов наблюдений. Дендрограмма, представленная на рис. 4, показывает, что пункты наблюдений Sarkisalo, Kuhmo и Кестеньга имеют специфический состав АО и могут рассматриваться как отдельные кластеры. Это обусловлено их специфическим расположением на берегу моря (Sarkisalo) или местными условиями (Kuhmo и Кестеньга). Остальные четыре пункта образовали два кластера. По-видимому, условия формирования химического состава АО на севере Финляндии близки, и поэтому пункты Taivalkoski и Vuotso образовали один кластер. Пункты наблюдений Калевала и Laukka также характеризуются близким химическим составом АО.

Кластерный анализ химических показателей образцов АО исходного массива данных приведен на рис. 5. На дендрограмме выделяются два основных кластера – А и В. Кластер А состоит из нескольких под-кластеров, но все они объединены тем, что образованы элементами, входящими в состав почвенной аэрозоли. Эта аэрозоль образуется в процессе жизнедеятельности почвенных микроорганизмов и характерна для летнего сезона года.

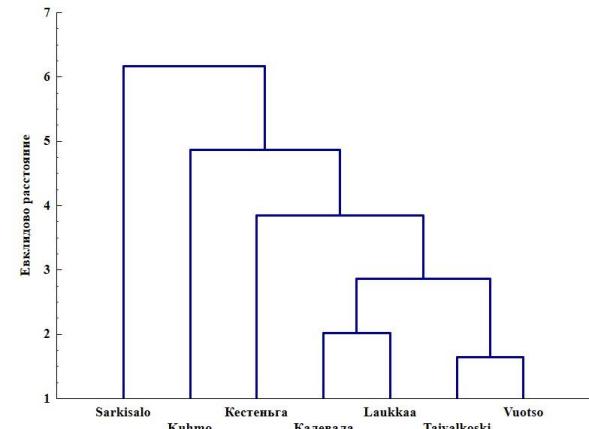


Рис. 4. Дендрограмма классификации станций наблюдений: по оси абсцисс приведены пункты отбора проб АО, по оси ординат – евклидово расстояние

Fig. 4. Observation stations classification dendrogram: the abscissae marks the names of observation stations, the axis of ordinates shows the Euclidean distances

Кластер В имеет более сложное строение. Он представлен под-кластерами нескольких уровней, которые в целом можно определить как кластеры, формирующиеся за счет аэрозолей различной природы. Ингредиенты, образованные из продуктов горения ископаемого топлива входят в кластер С. Элементы

морского происхождения – в кластер D. В состав аэрозоли земляного (пылевого) генезиса и техногенного загрязнения вошли элементы, образующие кластер E. Помимо основных элементов земной коры (Al,

Fe, Si) здесь можно отметить и ресуспендированные элементы от выбросов транспортных средств и, в частности, их тормозных систем (Sb, Cu, Cr, Sr, As, Ba) [2].

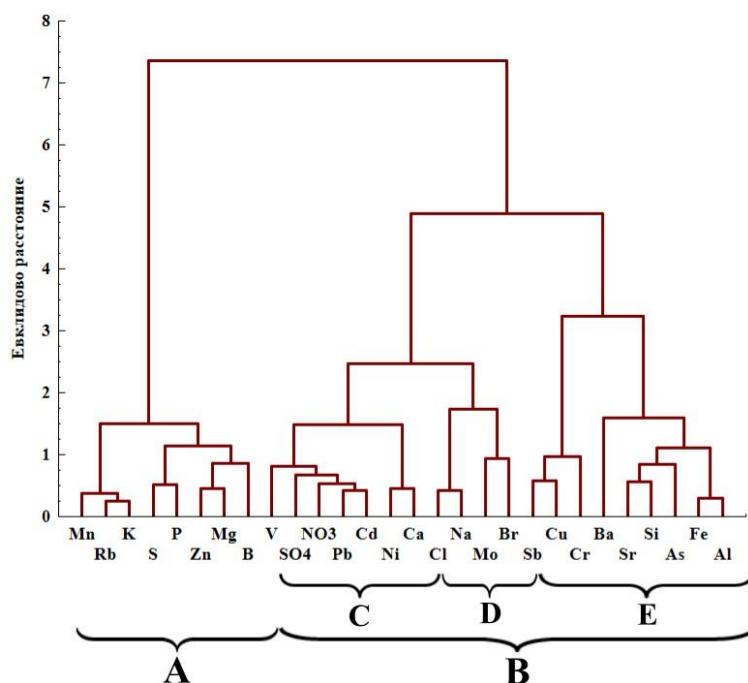


Рис. 5. Дендрограмма классификации рассматриваемых химических элементов, выпадающих с АО на станциях наблюдений

Fig. 5. Dendrogram of classification of the considered chemical elements falling out with atmospheric precipitation at observation stations

Заключение

Качественный и количественный состав АО финской и российской территорий проекта «Экогеохимия Баренцева региона» в начале 2000-х гг. был довольно близок. Несмотря на кажущееся устаревание исходных данных, необходимо отметить, что местоположение рассмотренных в работе пунктов наблюдения и мало изменившееся вблизи их состояние окружающей среды позволяет считать эти результаты актуальными.

Использование иерархического факторного анализа позволило оценить химический состав АО территории Финляндии и Республики Карелия. Факторы первого порядка характеризуют основные источники формирования состава АО (специфические и летучие продукты сжигания топлива, морские, земляные и почвенные аэрозоли). Наибольшие концентрации химических показателей отмечены для АО Sarkisalo. Это связано не только с тем, что данный пункт наблюдения находится на берегу Балтийского моря, но и с выбросами продуктов сжигания ископаемого топлива. Факторы второго порядка (Φ_1 , Φ_2) обнаружили не только две ортогональные друг другу группы химических ингредиентов, но и показали их зависимость от состава АО сезонов года. Так, фактор второго порядка Φ_1 в основном образован химическими показателями деятельности почвенных микроорганизмов и отображает состав АО летнего периода. Для Kuhmo, можно предположить, что высокое значение этого фактора объясняется тем, что

этот пункт был расположен очень близко от источника почвенных аэрозолей.

В факторе второго порядка Φ_2 преобладают ингредиенты аэрозолей земляной пыли и продуктов сжигания различных видов. Наибольшие значения для него отмечены в течение зимнего сезона.

С помощью кластерного анализа проведено классификаирование пунктов наблюдений за АО и показана степень их близости по химическому составу. Дендрограмма распределения химических ингредиентов в АО рассматриваемой территории обнаружила сходство с результатами иерархического факторного анализа.

Полученные результаты по программе проекта «Экогеохимия Баренцева региона» не позволяют оценить взаимное (трансграничное) влияние состава АО на состояние окружающей среды двух соседних стран. Наличие этого влияния не подлежит сомнению, так как для природы границ не существует. В этой связи отметим работу [23], в которой на примере нескольких тяжелых металлов (Pb, Cu, Ni) показано преобладающее влияние Финляндии и других стран Европы на территорию Республики Карелия из-за преобладающего над севером Евразии западного переноса воздушных масс.

Авторы выражают признательность руководителям проекта «Экогеохимия Баренцева Региона» за предоставленные результаты химических анализов проб атмосферных осадков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mehr M.R., Keshavarzi B., Sorooshian A. Influence of natural and urban emissions on rainwater chemistry at a southwestern Iran coastal site // Science of The Total Environment. – 2019. – V. 668. – № 10. – P. 1213–1221.
2. Montoya-Mayor R., Fernández-Espínosa A.J., Ternero-Rodríguez M. Assessment of the sequential principal component analysis chemometric tool to identify the soluble atmospheric pollutants in rainwater // Analytical and Bioanalytical Chemistry. – 2011. – V. 399. – P. 2031–2041.
3. Siudek P., Frankowski M. Atmospheric deposition of trace elements at urban and forest sites in central Poland – Insight into seasonal variability and sources // Atmospheric Research. – 2017. – V. 198. – P. 123–131.
4. Influence of marine, terrestrial and anthropogenic sources on ionic and metallic composition of rainwater at a suburban site (northwest coast of Spain) / J. Moreda-Piñeiro, E. Alonso-Rodríguez, C. Moscoso-Pérez, G. Blanco-Heras, I. Turnes-Carou, P. López-Mahía, S. Muniategui-Lorenzo, D. Prada-Rodríguez // Atmospheric Environment. – 2014. – V. 88. – P. 30–38.
5. Investigation of rainwater contamination sources in the southern part of Brazil / L. Hoinaski, D. Franco, R. Haas, R.F. Martins // Environmental Technology (United Kingdom). – 2014. – V. 35. – № 7. – P. 868–881.
6. Siudek P., Frankowski M. The effect of sources and air mass transport on the variability of trace element deposition in central Poland: a cluster-based approach // Environ. Sci. Pollut. Res. – 2017. – V. 24. – P. 23026–23038.
7. Northeastern Pacific submicrometer aerosol and rainwater composition: a multivariate analysis / R.J. Vong, H.-C. Hansson, H.B. Ross, D.S. Covert, R.J. Charlson // Journal of Geophysical Research. – 1988. – V. 93. – № D2. – P. 1625–1637.
8. Jain C.D., Madhavan B.L., Ratnam M.V. Source apportionment of rainwater chemical composition to investigate the transport of lower atmospheric pollutants to the UTLS region // Environmental Pollution. – 2019. – V. 248. – P. 166–174.
9. Assessment of atmospheric trace metal deposition in urban environments using direct and indirect measurement methodology and contributions from wet and dry depositions / M. Omrani, V. Ruban., G. Ruban, K. Lamprea // Atmospheric Environment. – 2017. – V. 168. – № 11. – P. 101–111.
10. Monitoring of water quality from roof runoff: Interpretation using multivariate analysis / C. Vialle, C. Sablayrolles, M. Lovera, S. Jacob, M.-C. Huau, M. Montrejaud-Vignoles // Water Research. – 2011. – V. 45. – № 12. – P. 3765–3775.
11. Health risk associated with some trace and some heavy metals content of Harvested rainwater in Yatta Area, Palestine / I.A. Al-Khatib, G.A. Arafah, M. Al-Qutob, S. Jodeh, A.R. Hasan, D. Jodeh, M. van der Valk // Water (Switzerland). – 2019. – V. 11. – № 238. – P. 1–16.
12. Семенец Е.С., Свистов П.Ф., Талаш А.С. Химический состав атмосферных осадков Российского Заполярья // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 3. – С. 27–36.
13. Феоктистов В.М., Харин В.Н., Спектор Е.Н. Применение иерархического факторного анализа для интерпретации выпадения химических элементов с атмосферными осадками на территории Карелии // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 12. – С. 58–70.
14. Феоктистов В.М., Харин В.Н., Спектор Е.Н. Структура выпадения химических элементов с атмосферными осадками на севере европейской части территории России, полученная с использованием методов многомерного анализа // Метеорология и гидрология. – 2008. – № 12. – С. 33–47.
15. Феоктистов В.М., Харин В.Н., Спектор Е.Н. Исследование химического состава атмосферных осадков по данным сельских станций Баренцева региона России методами многомерного анализа // Водные ресурсы. – 2014. – Т. 41. – № 4. – С. 393–403.
16. Volden T., Reimann C., Dagestad A. Precipitation sampling manual. Barents Ecogeochemistry. – NGU Report 99-128, 1999. – 9 p.
17. Иберда К. Факторный анализ / Пер. с нем. В.М. Ивановой. – М.: Статистика, 1980. – 398 с.
18. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Дж.-О. Ким, Ч.У. Мюллер, У.Р. Клекка, М.С. Олдендерфер, Р.К. Блашфилд. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 215 с.
19. Сравнительный анализ данных о составе атмосферных осадков и снежного покрова на территории Ленинградской области и юго-восточной Финляндии и уточнение параметров выпадения тяжелых металлов / Э.Я. Яхнин, О.В. Томилина, В.А. Чекушин, Р. Салминен // Экологическая химия. – 2003. – Т. 12. – № 1. – С. 1–12.
20. Мельчаков Ю.Л. Закономерности элементопереноса в системе «почва-атмосфера» (на примере Северного Урала) // Литосфера. – 2008. – № 2. – С. 133–138.
21. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимия марганца в процессах гипергенеза: обзор // Биосфера. – 2013. – Т. 5. – № 1. – С. 21–36.
22. Завгородняя Р.Е. Микроэлементный состав некоторых торфяных почв Карелии разных сроков освоения // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. – 2015. – № 8 (153). – С. 111–114.
23. Виноградова А.А., Иванова Ю.А. Антропогенная нагрузка на экосистемы Костомукшского природного заповедника: Атмосферный канал. – М.: Физматлит, 2013. – 82 с.

Поступила 23.12.2020 г.

Информация об авторах

Феоктистов В.М., кандидат химических наук, доцент кафедры общей химии Института биологии, экологии и агротехнологий Петрозаводского государственного университета.

Лери М.М., кандидат технических наук, научный сотрудник Института прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр РАН».

UDC 551.577:51(480+470.22), 519.25

ASSESSMENT OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION COMPOSITION IN THE TERRITORY OF FINLAND AND KARELIA REPUBLIC USING MULTIVARIATE ANALYSIS METHODS

Vladimir M. Feoktistov¹,
feoktistov@petrsu.ru

Marina M. Leri²,
leri@krc.karelia.ru

¹ Petrozavodsk State University,
33, Lenin avenue, Petrozavodsk, 185910, Russia.

² Institute of Applied Mathematical Research of Karelian Research Centre of Russian Academy of Sciences,
11, Pushkinskaya street, Petrozavodsk, 185910, Russia.

The relevance of the research is caused by the need for a reliable assessment of atmospheric precipitation composition, monitoring of anthropogenic impact on the environment, as well as identifying and recognizing sources of pollution. The article analyzes the data collected in Finland and the Republic of Karelia at the beginning of the 2000s as a part of the international project «Ecogeochemistry of the Barents region». These initial data are valuable as the collection of atmospheric precipitation samples, their preparation and analytical processing were carried out strictly according to a unified methodology. This work is a continuation of previous studies in which the composition of atmospheric precipitation of the Russian part of this project was analyzed.

The main aim of the research is to study and compare the chemical speciation of atmospheric precipitation of several observation stations in the territory of Finland and the Republic of Karelia, to evaluate possible sources of their pollution, to classify observation points and identify associations of chemical elements in atmospheric precipitation.

Objects: five collection stations of atmospheric precipitation on the territory of Finland and two stations in the Republic of Karelia.

Methods: monthly collecting of atmospheric precipitation samples and preparing these samples according to a unified methodology, inductively coupled plasma mass spectrometry, mathematical processing of the results using in-depth methods of multivariate statistical analysis, generalization of the material.

The results of the analysis of formation of atmospheric precipitation chemical composition in the territory of Finland and in the territory of the Republic of Karelia within the framework of the project «Ecogeochemistry of the Barents Region» by using hierarchical factor analysis showed the determining value of several different first-order factors having common sources of origin. Specific and volatile products of fuel consumption, marine, earth and soil aerosols are shown as sources of atmospheric precipitation composition. Second-order factors revealed two independent sets of ingredients inherent in the chemical composition of the atmospheric precipitation of the considered observation points in winter and summer. The classification of observation points by means of clustering analysis showed the degree of difference between these stations. In addition, a cluster analysis of the elemental composition of APs revealed a pattern similar to the results of hierarchical factor analysis of the distribution of chemical ingredients in the atmospheric precipitation of the territory.

Key words:

Precipitation, chemical composition, acidity, total precipitation, ICP MS, hierarchical factor analysis, cluster analysis.

The authors are grateful to the leaders of the project «Ecogeochemistry of the Barents region» for the provided results of chemical analysis of precipitation samples.

REFERENCES

1. Mehr M.R., Keshavarzi B., Sorooshian A. Influence of natural and urban emissions on rainwater chemistry at a southwestern Iran coastal site. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 668, no. 10, pp. 1213–1221.
2. Montoya-Mayor R., Fernández-Espinosa A.J., Ternero-Rodríguez M. Assessment of the sequential principal component analysis chemometric tool to identify the soluble atmospheric pollutants in rainwater. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2011, vol. 399, pp. 2031–2041.
3. Siudek P., Frankowski M. Atmospheric deposition of trace elements at urban and forest sites in central Poland – Insight into seasonal variability and sources. *Atmospheric Research*, 2017, vol. 198, pp. 123–131.
4. Moreda-Piñeiro J., Alonso-Rodríguez E., Moscoso-Pérez C., Blancco-Heras G., Turnes-Carou I., López-Mahía P., Muniategui-Lorenzo S., Prada-Rodríguez D. Influence of marine, terrestrial and anthropogenic sources on ionic and metallic composition of rainwater at a suburban site (northwest coast of Spain). *Atmospheric Environment*, 2014, vol. 88, pp. 30–38.
5. Hoinaski L., Franco D., Haas R., Martins R.F. Investigation of rainwater contamination sources in the southern part of Brazil. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 2014, vol. 35, no. 7, pp. 868–881.
6. Siudek P., Frankowski M. The effect of sources and air mass transport on the variability of trace element deposition in central Poland: a cluster-based approach. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2017, vol. 24, pp. 23026–23038.
7. Vong R.J., Hansson H.-C., Ross H.B., Covert D.S., Charlson R.J. Northeastern Pacific submicrometer aerosol and rainwater composition: a multivariate analysis. *Journal of Geophysical Research*, 1988, vol. 93, no. D2, pp. 1625–1637.
8. Jain C.D., Madhavan B.L., Ratnam M.V. Source apportionment of rainwater chemical composition to investigate the transport of lower atmospheric pollutants to the UTLS region. *Environmental Pollution*, 2019, vol. 248, pp. 166–174.
9. Omrani M., Ruban V., Ruban G., Lamprea K. Assessment of atmospheric trace metal deposition in urban environments using direct and indirect measurement methodology and contributions from wet and dry depositions. *Atmospheric Environment*, 2017, vol. 168, no. 11, pp. 101–111.
10. Vialle C., Sablayrolles C., Lovera M., Jacob S., Huau M.-C., Montrajaud-Vignoles M. Monitoring of water quality from roof runoff: Interpretation using multivariate analysis. *Water Research*, 2011, vol. 45, no. 12, pp. 3765–3775.

11. Al-Khatib I.A., Arafah G.A., Al-Qutob M., Jodeh S., Hasan A.R., Jodeh D., Van der Valk M. Health risk associated with some trace and some heavy metals content of Harvested rainwater in Yatta Area, Palestine. *Water (Switzerland)*, 2019, vol. 11, no. 238, pp. 1–16.
12. Semenets E.S., Svistov P.F., Talash A.S. Chemical composition of atmospheric precipitation in Russian Subarctic. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 3, pp. 27–36. In Rus.
13. Feoktistov V.M., Kharin V.N., Spector E.N. Application of hierarchical factor analysis for interpretation of falling out of chemical elements with precipitation in the territory of Karelia. *Meteorology and hydrology*, 2007, no. 12, pp. 58–70. In Rus.
14. Feoktistov V.M., Kharin V.N., Spector E.N. The structure of falling out of chemical elements with precipitation in the north of the European part of Russia, obtained using multivariate analysis methods. *Meteorology and hydrology*, 2008, no. 12, pp. 33–47. In Rus.
15. Feoktistov V.M., Kharin V.N., Spector E.N. Studying precipitation chemistry by multivariate analysis based on data of rural stations in Russian Barents region. *Water resources*, 2014, vol. 41, no. 4, pp. 393–403. In Rus.
16. Volden T., Reimann C., Dagestad A. *Precipitation Sampling Manual*. Barents Ecgeochemistry, NGU Report 99-128, p. 9.
17. Überla K. *Faktornyiy analiz* [Factor analysis]. Moscow, Statistics Publ., 1980. 398 p.
18. Kim J.-O., Muller C.W., Klecka U.R., Oldenderfer M.S., Blashfield R.K. *Faktorny, diskriminantny i klasterny analiz* [Factor, discriminant and cluster analysis]. Moscow, Finance and statistics Publ., 1989. 215 p.
19. Yakhnin E.Ya., Tomilina O.V., Chekushin V.A., Salminen R. *Sravnenly analiz dannyykh o sostave atmosfernykh osadkov i snezhnogo pokrova na territorii Leningradskoy oblasti i yugovostochnoy Finlyandii i utochnenie parametrov vypadeniya tyazhelykh metallov* [Comparative analysis of data on the composition of atmospheric precipitation and snow cover on the territory of the Leningrad region and South-Eastern Finland and to specify the parameters of the atmospheric deposition of heavy metals]. *Ekologicheskaya khimia*, 2003, vol. 12, no. 1, pp. 1–12.
20. Melchakov U.L. *Zakonomernosti elementoperenosov v sisteme «pochva–atmosfera» (na primere Severnogo Urala)* [Regularities of element transfer in system «soil–atmosphere» (the north Urals as an example)]. *Litosfera*, 2008, no. 2, pp. 133–138.
21. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Geokhimiya margantsa v protsessakh giperogeneza: obzor* [Manganese geochemistry in supergene processes. A review]. *Biosfera*, 2013, vol. 5, no. 1, pp. 21–36.
22. Zavgorodnyaya R.E. *Mikroelementny sostav nekotorykh torfyanikh pochv Karelii raznykh srokov osvoeniya* [Microelement composition research of Karelian peat soils at different stages of utilization]. *Uchenie zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 8 (153), pp. 111–114.
23. Vinogradova A.A., Ivanova Yu.A. *Antropogennaya nagruzka na ekosistemy Kostomukshskogo prirodnogo zapovednika: atmosferny kanal* [Anthropogenic load on ecosystems of Kostomuksha natural reserve: atmospheric channel]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013. 82 p.

Received: 23 December 2020.

Information about the authors

Vladimir M. Feoktistov, Cand. Sc., associate professor, Petrozavodsk State University.

Marina M. Leri, Cand. Sc., research associate, Institute of Applied Mathematical Research of Karelian Research Centre of RAS.

УДК 621.313.333:62–83

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Шубин Станислав Сергеевич¹,
rusoil@mail.ru

Ямалиев Виль Узбекович¹,
rusoil@mail.ru

Глазырин Александр Савельевич^{2,3},
asglazyrin@tpu.ru

Буньков Дмитрий Сергеевич⁴,
bunkovds@tpu.ru

Кладиев Сергей Николаевич²,
kladiev@tpu.ru

Раков Иван Витальевич²,
rakovivan@live.com

Боловин Евгений Владимирович²,
orange@tpu.ru

Ковалев Владимир Захарович³,
vz_kovalev@mail.ru

Хамитов Рустам Нуриманович^{5,6},
apple_27@list.ru

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

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

³ Югорский государственный университет,
Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16.

⁴ ООО «Элетим»,
Россия, 634021, г. Томск, ул. Алтайская, 161А.

⁵ Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

⁶ Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

Одной из основных проблем в процессе эксплуатации скважин, оборудованных установками электрических центробежных насосов, является определение технического состояния погружного электрооборудования и предотвращение его отказов. Среди различных подходов к решению данной задачи можно выделить метод определения технического состояния установки электроцентробежных насосов с использованием полной настраиваемой математической модели установки,ключающей модель погружного электродвигателя. Рассмотрен подход к определению и восстановлению необходимых параметров для настройки модели погружного электродвигателя на основании данных, приведенных в протоколе испытаний погружного электродвигателя.

Цель: разработка методики по восстановлению параметров схемы замещения для погружного электродвигателя на основании типовых данных, содержащихся в протоколе приёмо-сдаточных испытаний.

Методы. Предложенный подход основан на совместном использовании настраиваемой динамической модели асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором и алгоритмом дифференциальной эволюции. Фактически решение задачи по определению параметров схемы замещения погружного электродвигателя сводится к решению задачи глобальной оптимизации, т. е. к задаче на поиск глобального (наилучшего) минимума функции.

Результаты. Разработан подход для восстановления параметров схемы замещения погружного электродвигателя, который позволяет устанавливать приемлемые для практики значения параметров схемы замещения для погружного электродвигателя по результатам испытаний; проверена работоспособность разработанного подхода идентификации с применением методов глобальной оптимизации и математического моделирования погружных асинхронных электродвигателей; полученные оценки являются устойчивыми для всех параметров схемы замещения кроме параметра механической подсистемы.

Ключевые слова:

Идентификация, асинхронная машина, генетические алгоритмы, эвристика, погружной электродвигатель, дифференциальная эволюция, многомерная математическая оптимизация, многомерные данные, стохастические алгоритмы.

Описание работы и объекта исследования

Действующий фонд скважин, оснащённый установками электроцентробежных насосов (УЭЦН), в Российской Федерации составляет более 50 % и име-

ет долговременную тенденцию к росту, что вызвано необходимостью обеспечить максимальные отборы скважин. Для обеспечения контроля эксплуатации УЭЦН выделяется большое количество ресурсов – как на сбор, так и на обработку информации.

Имеющиеся решения контроля действующего фонда скважин фактически являются средством визуализации промысловой информации, например, электротехнические параметры эксплуатации погружного электродвигателя. Назначение таких инструментов в области контроля работы фонда скважин сводится к сигнализации при достижении граничных значений контролируемых параметров. Выбор граничных значений отслеживаемых параметров, как правило, осуществляется на основании расчётов, полученных для каталожных характеристик оборудования. Фактически оборудование, применяемое в нефтегазовой отрасли, в том числе погружные электродвигатели, имеет уникальный набор параметров, обусловленный особенностями технологии изготовления этого оборудования. Использование каталожных характеристик приводит к неточностям при подборе оборудования, а также к невозможности осуществления непрерывного мониторинга параметров эксплуатации фонда скважин, менеджмента энергоэффективности и затрудняет реализацию такого направления, как комплексная интегрированная разработка месторождения. Дополнение имеющихся методов и подходов к подбору и мониторингу оборудования, в основе которых лежат стационарные модели с «примитивной» логикой контроля, методами и способами, базирующимися на эвристических алгоритмах, позволит добиться ряда существенных преимуществ, наиболее очевидным из которых можно назвать повышение точности расчётов при подборе оборудования и мониторинге параметров эксплуатации. Менее явными, но ожидаемыми преимуществами будут служить формализация и использование некоторых лучших практик в области мониторинга процесса эксплуатации, таких как внедрение экспертных систем по работе с глубинно-насосным оборудованием. В конечном итоге достигается реализация полноценной задачи оптимизации для целевых параметров месторождения в целом. Неотъемлемой частью преодоления вышеназванных трудностей является верификация математической модели асинхронного погружного электродвигателя, идентификация параметров которого является сложной и нетривиальной задачей, одно из перспективных решений которой будет описано в данной работе.

Целью данной статьи является разработка методики по восстановлению параметров схемы замещения погружного электродвигателя (ПЭД) на основании типовых данных, содержащихся в протоколе приёмо-сдаточных испытаний.

Возможность реализовать надёжные и эффективные методы мониторинга и управления УЭЦН связана с разработкой методов определения электромагнитных параметров ПЭД на основе доступных данных. На данный момент известен ряд методов, позволяющих восстанавливать параметры асинхронных электродвигателей [1–12]. Зачастую их реализация для условий добывающей компании практически невозможна, поскольку требует специальных испытательных стендов и нагрузочных устройств, также данные подходы малоприменимы в связи с низкой информативностью типовых протоколов испытаний, предоставляемых ремонтными цехами согласно ГОСТ Р 53472-09 [13].

Предложен подход, позволяющий восстанавливать параметры схемы замещения на основании результатов испытаний ПЭД, включая испытание холостого хода и испытание на номинальной нагрузке. На данном этапе исследований авторы предлагают осуществлять идентификацию параметров ПЭД на основании результатов испытаний, полученных в условиях сервисных предприятий. Применение предлагаемого метода к УЭЦН, находящимся в скважинных условиях, затрудняется учётом электромагнитных процессов в погружном кабеле, повышающем трансформаторе и синус-фильтре [7, 8]. Модификация предложенного алгоритма идентификации с учетом данных электромагнитных процессов является предметом дальнейших исследований и в этой работе не рассматривается.

Предложенный подход основан на совместном использовании настраиваемой динамической модели асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором (*induction motor model, IMM*) и алгоритмом дифференциальной эволюции (*differential evolution, DE*).

Методология восстановления параметров схемы замещения ПЭД

Предложенный в работе подход по определению параметров схемы замещения ПЭД сводится к решению задачи глобальной оптимизации, т. е. к задаче на поиск глобального (наилучшего) минимума функции. В данном случае в роли целевой функции выступает функция приспособленности (*fitness function*), которая, в свою очередь, рассчитывается на основе суммы разностей целевых значений, полученных из протоколов испытаний ПЭД и аналогичных параметров, но определённых при использовании настраиваемой математической модели асинхронного электродвигателя.

Далее рассмотрим основные составляющие предложенной методологии более подробно.

Динамическая модель асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором (induction motor model, IMM) является основой разработанного подхода. В (1) приведём систему уравнений, описывающую электромагнитные и электромеханические процессы, происходящие в асинхронном двигателе и представленные в неподвижной системе координат α, β [14, 15]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{1\alpha}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_1} U_{1\alpha} - \frac{R_2}{\sigma L_1} I_{1\alpha} + \frac{R_2' L_m}{\sigma L_1 L_2} \Psi_{2\alpha} + \frac{L_m}{\sigma L_1 L_2} z_p \omega \Psi_{2\beta} \\ \frac{dI_{1\beta}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_1} U_{1\beta} - \frac{R_2}{\sigma L_1} I_{1\beta} + \frac{R_2' L_m}{\sigma L_1 L_2} \Psi_{2\beta} - \frac{L_m}{\sigma L_1 L_2} z_p \omega \Psi_{2\alpha} \\ \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} = -\frac{R_2'}{L_2} \Psi_{2\alpha} + \frac{R_2' L_m}{L_2} I_{1\alpha} - z_p \omega \Psi_{2\beta} \\ \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} = -\frac{R_2'}{L_2} \Psi_{2\beta} + \frac{R_2' L_m}{L_2} I_{1\beta} + z_p \omega \Psi_{2\alpha} \\ M_{\text{эм}} = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} z_p (\Psi_{2\alpha} I_{1\beta} - \Psi_{2\beta} I_{1\alpha}) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_{\text{эм}} - M_c), \end{array} \right. \quad (1)$$

где $U_{1\alpha} = U_{1m} \sin(2\pi f_1) = \sqrt{2} U_1 \sin(2\pi f_1)$ – синусоидальная по форме составляющая напряжения статора по оси α

ортогональной неподвижной системы координат α, β, B ; $U_{1\beta} = U_{1m} \cos(2\pi f_1) = \sqrt{2}U_1 \cos(2\pi f_1)$ – косинусоидальная по форме составляющая напряжения статора по оси β системы координат α, β, B ; $U_{1m} = \sqrt{2} \cdot U_1$ – амплитудное значение фазного напряжения статорной обмотки, B ; U_1 – действующее значение фазного напряжения статорной обмотки, B ; f_1 – частота напряжения статора, Гц; $I_{1\alpha}, I_{1\beta}$ – составляющие тока статора в системе координат α, β, A ; $\Psi_{2\alpha}, \Psi_{2\beta}$ – составляющие потокосцепления ротора в системе координат α, β, B ; $M_{\text{эм}}$ – электромагнитный момент двигателя, Н·м; M_c – момент статического сопротивления на валу двигателя, включая собственный момент трения двигателя, Н·м; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}$ – коэффициент рассеяния; J – момент инерции двигателя, кг·м²; $L_1 = L_{1\sigma} + L_b$ – эквивалентная индуктивность статорной обмотки, Гн; $L_2 = L'_{2\sigma} + L_m$ – эквивалентная индуктивность роторной обмотки, Гн; L_m – индуктивность главного контура намагничивания, Гн; $L_{1\sigma}$ – индуктивность рассеяния обмотки статора, Гн; $L'_{2\sigma}$ – приведенная к статору индуктивность рассеяния обмотки ротора, Гн; z_p – число пар полюсов; R_1 – активное сопротивление статорной обмотки, Ом; R'_2 – приведенное к статору активное сопротивление роторной обмотки, Ом; $R_{1\sigma} = R_1 + \frac{R'_2 \cdot L_m^2}{L_2^2}$ – эквивалентное сопротивление статора, Ом.

Дифференциальная эволюция (differential evolution, DE) [16, 17] является одной из модификаций стандартного генетического алгоритма (*genetic algorithm, GA*). Данный алгоритм был предложен сравнительно недавно, в 1995 г., в работе R. Storn и K. Price [16]. Метод дифференциальной эволюции предназначен для нахождения глобального минимума недифференцируемых, нелинейных, мультимодальных (имеющих, возможно, большое число локальных экстремумов) функций от многих переменных [18].

В качестве основных аспектов, повлиявших на выбор данного метода, можно выделить следующие:

- возможность осуществления поиска решения в широком диапазоне значений для функций от большого количества переменных;
- метод прост в реализации и использовании (содержит мало управляющих параметров, требующих подбора) и обеспечивает возможность распараллеливания;
- возможность строго ограничить диапазон поиска для каждой из искомых переменных.

В своей базовой реализации данный алгоритм (рис. 1) управляет двумя параметрами – силой мутации (*mutation factor, F*) и вероятностью рекомбинации (*crossover probability, CR*). Как и у классического *GA*, в *DE* начальная популяция формируется как совокупность случайных точек, выбранных из некоторого генерального распределения. На каждой итерации проводится преобразование текущей популяции, согласно установленным правилам. Основным отличием

DE от *GA* является следующее: в *DE* в качестве источника возмущений используется не внешний генератор случайных чисел, а внутренний, реализованный как разность между случайно выбранными векторами текущей популяции. В соответствии с этим, каждая особь в популяции подвергается мутации и рекомбинации, после чего полученные потомки сравниваются с родительскими особями с использованием функции приспособленности и лучшие переходят в следующее поколение, т. е. фактически происходит процесс селекции. Данная особенность обеспечивает быстрое движение по поверхности целевой функции вдоль узких вытянутых «оврагов». Для градиентных же методов в аналогичных условиях характерна колебательная динамика «от стенки к стенке» [19–21].

Рассмотрим параметры, применённые в работе для настройки *DE*:

- *Размерность* искомой области (*Dimension of parameter vector, D*), соответствующая числу параметров, оцениваемых алгоритмом, выбрана 4 (R'_2, L_σ, L_m, J), где $L_\sigma = L_{1\sigma} = L'_{2\sigma}$, Гн. При этом принятное допущение о равенстве индуктивностей рассеяния [17] уменьшает объем требуемых вычислений и ускоряет работу алгоритма.
- Значение *размера популяции* (*population size, NP*) принято равным 15 исходя из размерности каждой особи (*D*).
- Значение *силы мутации* (*mutation factor, F*) задано в диапазоне [0,0, 2,0], причём наиболее применимым диапазоном можно считать [0,5, 1,0]. При подборе необходимо учитывать, что данный параметр в значительной степени влияет на скорость конвергенции и его увеличение позволяет расширить «радиус поиска» для преодоления преждевременной сходимости к локальному (нежелательному) экстремуму на многоэкстремальной гиперповерхности целевой функции, но этот фактор исследователю следует выбирать с осторожностью, на основе своего эмпирического опыта, иначе необоснованное расширение этого диапазона негативно скажется на скорости сходимости алгоритма:

$$\vec{v}_{i,G+1} = \vec{x}_{p,G} + F \cdot (\vec{x}_{q,G} - \vec{x}_{r,G}),$$

где G – текущее поколение; F – мутация; p, q, r – случайно выбранные индексы в интервале от 1 до NP так, чтобы $x_{p,G} \neq x_{q,G} \neq x_{r,G}$.

- Значение *рекомбинации* (*crossover probability, CR*) задано в диапазоне [0,0, 1,0]. Увеличение данного параметра позволяет повысить интенсивность мутаций в следующем поколении, при этом необходимо контролировать скорость стабилизации популяции (её вырождение), данный параметр был принят равным 0,7:

$$u_{i(j),G+1} = \begin{cases} v_{i(j),G+1}, & \text{if } r_i \leq CR \text{ or } j = J_r \\ x_{i(j),G}, & \text{if } r_i > CR \text{ or } j \neq J_r \end{cases}$$

$$\{i, j\} = 1, 2, \dots, NP,$$

где $r_i \sim U[0,1]$, J_r – случайное целое в диапазоне $[1, 2, \dots, D]$, обеспечивающее следующее $\vec{v}_{i,G+1} \neq \vec{x}_{i,G}$.

- Селекция (*selection*) является реализацией оператора выбора, где вектор $\vec{x}_{i,G}$ сравнивается с тестовым вектором $\vec{u}_{i,G+1}$:

$$x_{i,G+1} = \begin{cases} \vec{u}_{i,G+1}, & \text{if } f(\vec{u}_{i,G+1}) \leq f(\vec{x}_{i,G}) \\ \vec{x}_{i,G}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, NP,$$

где $f(\vec{x})$ – целевая функция, подвергаемая оптимизации.

- Начальное распределение популяции было принято с применением метода *latin hypercube sampling (LHS)* [22], являющимся статистическим методом для создания псевдослучайной выборки значений параметров из многомерного распределения.

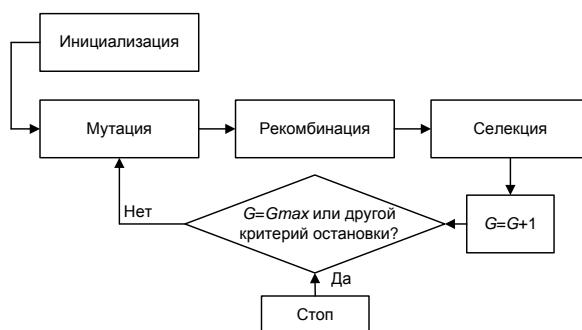


Рис. 1. Схема алгоритма дифференциальной эволюции
Fig. 1. Diagram of differential evolution algorithm

Функция приспособленности (*fitness function, FF*) – это функция оценки, определяющая меру приспособленности полученного решения. В работе была разработана *FF*, устанавливающая связь между целевыми показателями, полученными из протокола испытаний ПЭД (рис. 2), и аналогичными параметрами, полученными из модели *IMM*.

При проведении испытаний по входному контролю на специализированном предприятии по ремонту УЭЦН испытания ПЭД выполняются согласно ГОСТ Р 53472-09 [13]. В рамках испытаний проводятся следующие опыты:

- опыт короткого замыкания;
- опыт холостого хода;
- испытание при номинальной нагрузке.

По результатам испытаний формируется следующий протокол (рис. 2).

Среди значений, приведённых на рис. 2, были выбраны следующие замеренные параметры:

- «опыт холостого хода» – напряжение разгона, ток холостого хода, сопротивление фаз обмоток статора при постоянном токе в нагретом состоянии;
- «испытания при номинальной нагрузке» – номинальное напряжение, номинальный ток, величина момента проворачивания вала электродвигателя, момент.

Выбор данных параметров основан на следующих доводах и допущениях:

- ряд параметров из протокола испытаний принятые как постоянные для модели *IMM* (сопротивление фаз обмоток статора при постоянном токе в нагретом состоянии (R_1), число пар полюсов (z), номинальная частота питающего тока (f));

- при стендовых испытаниях асинхронная машина работает при различных режимах, тем самым обеспечивается возможность идентификации её параметров. Существует возможность подбора таких параметров схемы замещения, при которых поведение и значения параметров реального ПЭД и его аналога (настраиваемой математической модели) будут идентичны. Можно предположить, что разность между модельными данными и реальными показателями контролируемых параметров (номинальный ток, ток холостого хода, момент) при установленвшемся режиме работы ПЭД будет минимальной.

В результате проведённой работы была получена функция оценки (*FF*), состоящая из четырёх основных частей, достаточных для решения задачи восстановления параметров схемы замещения:

- первая и вторая части выражены в виде функций, описывающих разность между значением замеренного тока, полученного на «испытании при номинальной нагрузке» и «опыте холостого хода», и соответствующими им аналогами в модели *IMM*, причём значение момента нагрузки, прикладываемого к валу двигателя (для испытания при номинальной нагрузке) было рассчитано согласно следующей формуле:

$$M_c = M_{\text{ном}} = \frac{1000 \cdot P_{\text{ном}}}{2 \cdot \pi \cdot f / z_p},$$

где $P_{\text{ном}}$ – мощность, кВт; z_p – число пар полюсов; f – частота питающего тока.

При этом стоит отметить, что фактически значения амплитуды тока были вырождены в единичное значение, рассчитываемое как модуль разности измеренного значения при проведении испытаний и среднего арифметического, полученного из верхней огибающей тока в модели *IMM* (рис. 3, в):

$$\text{dist}_{1,i} = |I_{\text{nom exper}} - \text{mean}(H(f_i(t_{\text{stable}})))|$$

$$i = 1, 2, \dots, NP,$$

где $f_i(t)$ – выходное значение тока по фазе настраиваемой математической модели ПЭД при моно режиме; $H(\cdot)$ – функция для формирования огибающей; $\text{mean}(\cdot)$ – среднее арифметическое из функции; $I_{\text{nom exper}}$ – номинальное значение тока из протокола испытаний.

- третья и четвёртая части функции приспособления учитывают отклонение развиваемого момента (по результатам моделирования) и целевых значений моментов, полученных в процессе натурных испытаний.

Все расчёты проводились с использованием модифицированной версии библиотеки *scipy* [23–26] и модели *IMM* собственной реализации. На основании полученных результатов проведена апробация метода определения параметров ПЭД с применением имеющегося протокола испытаний (рис. 2).

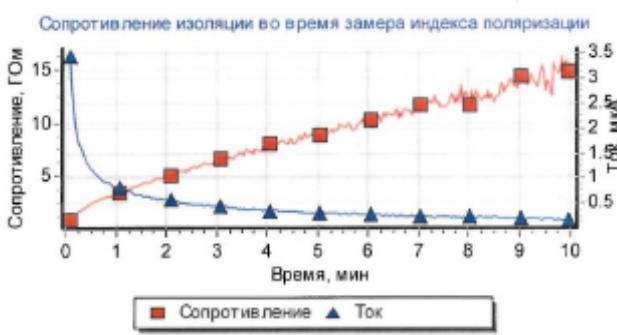
ПРИЭПУ

Протокол приемо-сдаточных испытаний №

ПЭД 45-117 МЭВ5

Дата		Время	09:20:44
Заводской №	830310	Оператор	
Ином, В	1400	Ином, А	26.00
Завод изготовитель		Вид ремонта	к.р.
Предел текуч.	110	Ø вала	28 мм

Виды испытаний и проверок		Ед. изм-я	Требования	Измеренные параметры
Вылет вала электродвигателя		мм		18.00
Величина момента проворачивания вала электродвигателя		кгс*м		5.00
Проверка герметичности электродвигателя		кгс/см ²	10.00	
Сопротивление изоляции обмотки статора относительно корпуса в практических холодном состоянии		МОм	>=1000.00	3358.00
Индекс поляризации			>=2.00	4.51
Сопротивление фаз обмотки статора при постоянном токе в практических холодном состоянии		Ом	1.470/1.470/1.470	1.420/1.405/1.421
Отклонение сопротивлений фаз ПЭД		%	±5.00%	-3.42/-4.40/-3.32
Расхождение сопротивлений (в холодном состоянии)		%	±3.00%	0.30/-0.71/0.40
Направление вращения вала				Правое
Опыт короткого замыкания				
Напряжение короткого замыкания		В		602.42
Ток короткого замыкания		А	>=63.00	66.13
Потери короткого замыкания		кВт	<=51.00	38.47
Обкатка электродвигателя		ч		1.00
Уровень вибрации		мм/с	<=6	5.50
Опыт холостого хода				
Напряжение разгона		В	<=430.00	394.52
Ток холостого хода		А	<=12.00	9.66
Потери холостого хода		кВт	<=3.40	2.79
Испытание межвитковой изоляции обмотки статора на электрическую прочность		В	1820.00	Прошел
Время выбега ротора		с	>=2.50	5.40
Сопротивление изоляции обмотки статора относительно корпуса в нагретом состоянии		МОм	>=1000.00	1825.00
Сопротивление фаз обмотки статора при постоянном токе в нагретом состоянии		Ом		1.668/1.653/1.668
Испытание изоляции обмотки статора относительно корпуса на электрическую прочность		В	3800.00	Прошел
Температура обмотки статора		°C		66.05
Пробивное напряжение масла, взятого из электродвигателя после обкатки		кВ	30.00	
Испытания приnominalной нагрузке				
Номинальное напряжение		В		1394.18
Номинальный ток		А		27.87
Коэффициент мощности				0.85
Скорлужение		%		7.43
КПД		%		78.51
Мощность механическая		кВт		45.00
Момент		Н*м		15.36



Время, мин	R, ГΩ	I, мА	U, В
0.10	0.81	3.447	2795.00
1.07	3.40	0.8227	2794.00
2.08	4.98	0.561	2794.00
3.07	6.50	0.4297	2794.00
4.07	7.98	0.3501	2794.00
5.05	8.79	0.318	2794.00
6.05	10.34	0.2701	2794.00
7.05	11.77	0.2374	2794.00
8.03	11.67	0.2394	2794.00
9.05	14.43	0.1935	2794.00
9.98	14.91	0.1874	2794.00

По результатам испытаний, ПЭД признан годным к эксплуатации

Рис. 2. Форма акта испытаний ПЭД

Fig. 2. Form of the submersible induction motor test report

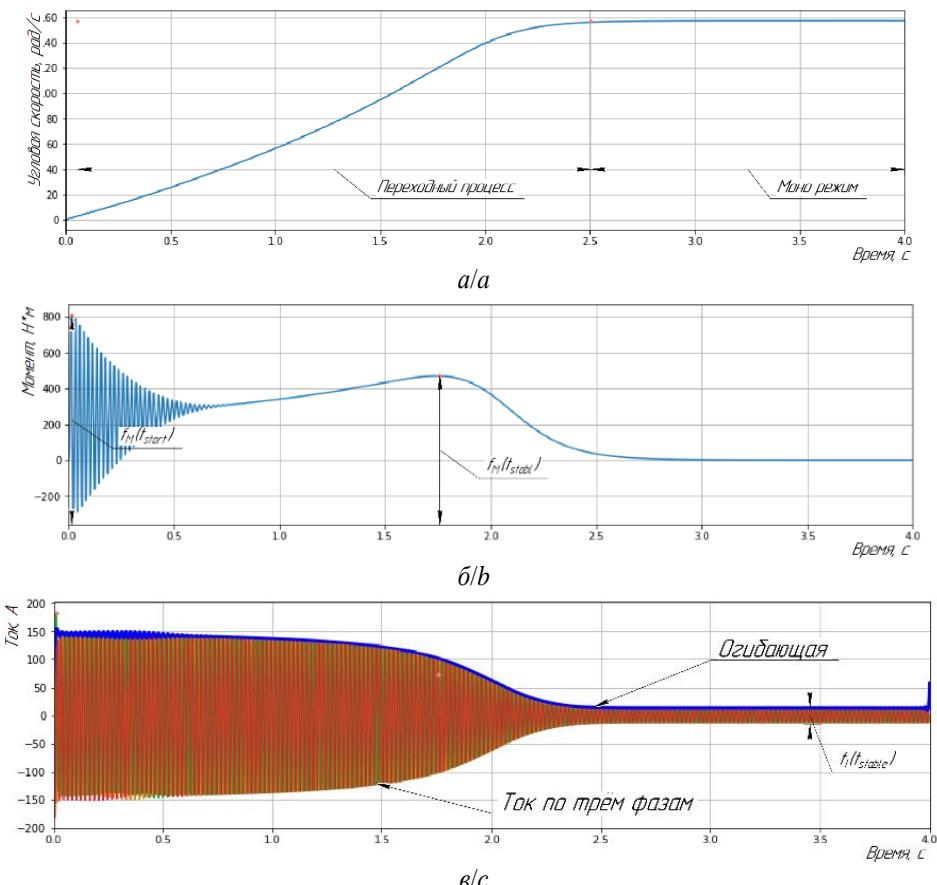


Рис. 3. Пример выходных данных, полученных из модели ПЭД: а) угловая скорость; б) момент; в) фазные токи

Fig. 3. Example of output data obtained from the submersible induction motor model: a) angular velocity; b) moment; c) phase currents

Результаты и обсуждение

Проверка работоспособности предложенной методики по восстановлению параметров схемы замещения для ПЭД была выполнена для погружного асин-

хронного электродвигателя ПЭД 45–117 МЭВ5 (протокол испытаний приведён на рис. 2). В качестве входных данных для расчёта использовались следующие параметры (табл. 1).

Таблица 1. Данные из протокола испытаний для ПЭД 45–117 МЭВ5

Table 1. Data from the test report for the PED 45–117 MEV5

Наименование параметра Parameter name	Тип испытания Experiment type	Единицы измерения Unit measure	Значение Value
Номинальный ток Rated current	Испытания при номинальной нагрузке Test at rated load	А/А	27,87
Ток холостого хода No-load current	Опыт холостого хода No-load test	А/А	9,66
Напряжение номинальное Nominal voltage	Испытания при номинальной нагрузке Test at rated load	В/В	1394,18
Напряжение разгона Acceleration voltage	Опыт холостого хода No-load test	В/В	394,52
Мощность механическая Mechanical power	Испытания при номинальной нагрузке Test at rated load	кВт/кВ	45,00
Сопротивление фаз статора при постоянном токе в нагретом состоянии Stator phase resistance at constant current in a heated state	Опыт холостого хода No-load test	Ом/Ohm	1,653

Общая структура подхода представлена на рис. 4. Настройка подпрограммы-решателя осуществляется в следующем порядке:

- определяются граничные условия для области поиска решения, т. е. для каждого восстанавливаемо-

мого параметра устанавливаются минимальное и максимальное значение –

$$R_2 \in [1,200] * 10^{-2} [\text{Ом}], L_6 \in [1,100] * 10^{-2} [\text{Гн}], \\ L_m \in [1,1000] * 10^{-2} [\text{Гн}], J \in [1,50] * 10^{-1} [\text{кг} * \text{м}^2];$$

- выполняется начальная инициализация (первая популяция) по методу *LHS* [17], и устанавливается значение желаемой;
- в качестве целевых параметров принимаются данные, приведённые в табл. 1;
- искомые переменные в системе уравнений (1) принимаются равными 0 (при инициализации);
- временной интервал, для которого разрешается система, определяется исходя из опытных данных. В примере интервал принят от 0 до 25 с.

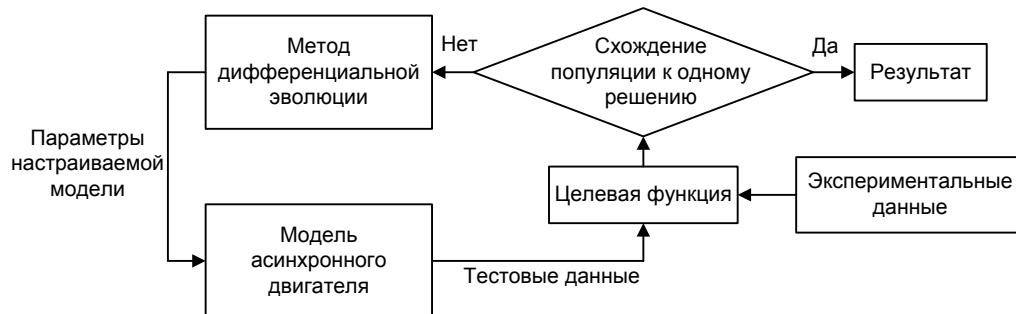


Рис. 4. Блок-схема предложенного подхода
Fig. 4. Block diagram of the proposed approach

В процессе восстановления параметров схемы замещения алгоритм формирует популяцию решений с

указанием их близости к целевым параметрам согласно *FF*, на рис. 5 приведён пример популяции решений.

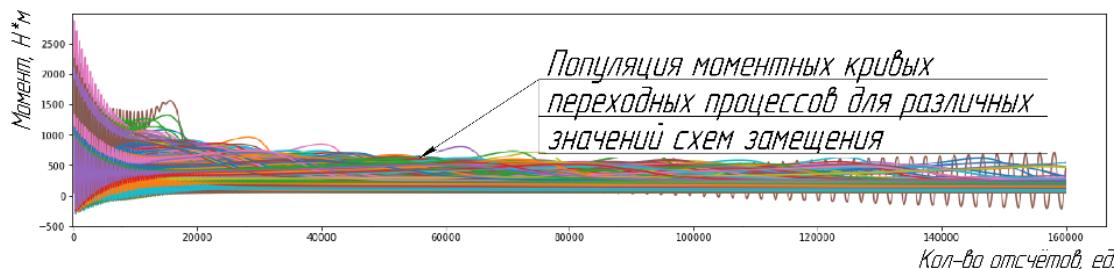


Рис. 5. Популяция моментных кривых, полученных при решении задачи оптимизации
Fig. 5. Population moments curve when solving optimization problems

Более подробно рассмотрим первые три решения с наименьшим значением *FF* (R_2' , L_σ , L_m , J) (табл. 2), являющиеся наиболее близкими к целевым параметрам (табл. 1). Согласно результатам, приведённым в табл. 2, можно сказать о наличии значительной девиации при определении параметра J , что свидетельствует о недостаточности исходных данных для его установления, т. е. его влияние на поведение функции приспособления минимально.

Рассмотрим поведение модели асинхронного двигателя при подстановке параметров, соответствую-

щих первым двум решениям, полученным с помощью алгоритма дифференциальной эволюции, и количественно опишем отличия в переходных процессах (рис. 6). Фактически отличие полученных решений заключается в моментной кривой (2100 Н·м – Вариант 1 и 3100 Н·м – Вариант 2) и времени разгона (0,6 с – Вариант 1 и 0,2 с – Вариант 2), целевые параметры и потребляемые токи при установленном режиме близки между собой. Таким образом, в качестве лучшего решения будет принято решение с наименьшим значением *FF*.

Таблица 2. Три лучших решения с минимальными значениями *FF*
Table 2. Three best solutions with the minimum values of *FF*

№	$R_2' \cdot 10^{-2}$, Ом/Оhm	$L_\sigma \cdot 10^{-2}$, Гн/Н	$L_m \cdot 10^{-2}$, Гн/Н	$J \cdot 10^{-1}$, кг·м ² /kg·m ²	$FF(R_2', L_\sigma, L_m, J)$
1	146,47905067	9,72921514	220,81600766	43,16887615	5,481924
2	130,61609658	5,03123803	224,46268807	25,04266715	5,758319
3	137,01406269	4,12017481	203,52997571	7,64558847	7,104389

Проведённый анализ полученных результатов (рис. 6, табл. 2) позволяет утверждать, что все полученные оценки являются устойчивыми и приемлемыми [27], что говорит о работоспособности разработанной методологии восстановления параметров схемы замещения ПЭД и о принципиальной возможности применения рассмотренного подхода для монито-

ринга параметров УЭЦН. Необходимо отметить направления для дальнейших улучшений, позволяющие повысить достоверность получаемых результатов без изменения базовой структуры (рис. 4) предложенного подхода, а именно:

- учёт влияния механической подсистемы ПЭД в математической модели асинхронного двигателя

- либо реализация идентификации параметров электромагнитной и механической подсистем раздельно аналогично работам [7, 8, 25];
- использование в качестве опорной траектории не только модуля результирующего вектора тока статора ПЭД, а также и другие опорные траектории или их сочетание. В качестве перспективных для построения опорных траекторий следует рассматривать сигналы мгновенных реактивной и активной мощностей статора, которые легко получить, применив операции скалярного и векторного произведения векторов тока и напряжения статора в неподвижной ортогональной системе координат α, β [25];
 - дополнение FF мерой близости параметров, получаемых при проведении испытаний на короткое замыкание, т. к. данные результаты позволяют

обеспечить «отсев» решений, не позволяющих достичь максимального момента на валу ПЭД;

- проведение дальнейших исследования по так называемому «предобусловливанию» решаемой задачи, т. е. описание целевой функции таким образом, что её поверхность профиля «улучшается» и увеличиваются расстояния между экстремумами, увеличивается глубина глобального экстремума;
- формализация и реализация механизма формирования границ области поиска на основании опыта и лучших практик в области проектирования и испытания асинхронных машин;
- реализация распределения решений на отдельные потоки для увеличения скорости работы предложенного подхода.

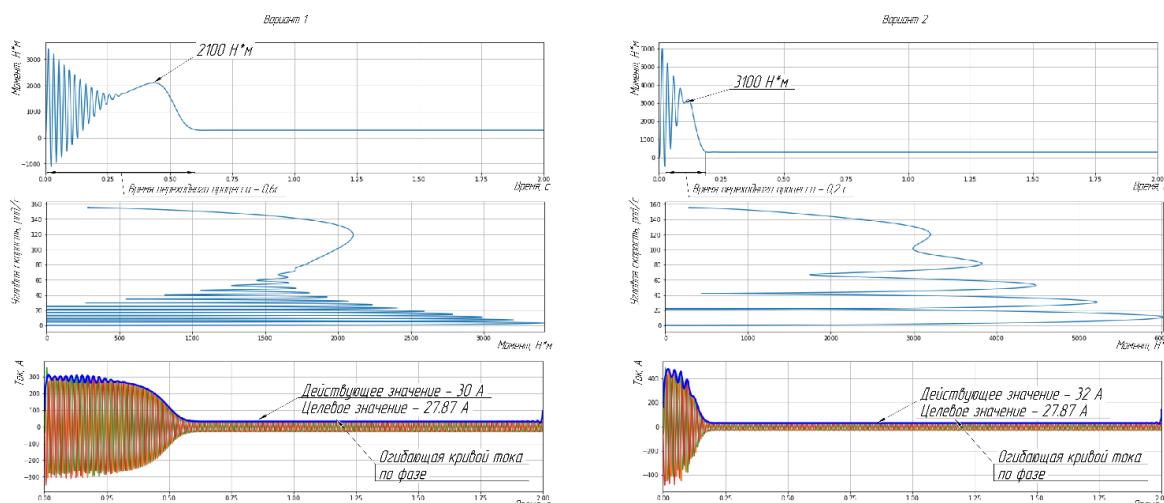


Рис. 6. Сравнение графиков переходных процессов для двух решений согласно табл. 2

Fig. 6. Comparison of the graphs of the input processes for two solutions according to Table 2

Выводы

1. Разработан подход для восстановления параметров схемы замещения ПЭД, который позволяет устанавливать приемлемые для практики значения параметров схемы замещения для ПЭД по результатам испытаний.
2. Проверена работоспособность разработанного подхода идентификации с применением методов глобальной оптимизации и математического мо-

делирования погружных асинхронных электродвигателей. Полученные оценки являются устойчивыми для всех параметров схемы замещения кроме параметра механической подсистемы.

3. Предложенный подход имеет значительный потенциал для своего улучшения как в области повышения точности оценивания параметров настраиваемой модели погружного двигателя, так и в области снижения вычислительных затрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kouhi Ya., Kertzsch J. An online nonlinear identification method for estimation of magnetizing curve and parameters of an induction motor // IFAC – PapersOnLine. – 2017. – V. 50. – Iss. 1. – P. 1577–1582.
2. Jirdehi M.A., Rezaei A. Parameters estimation of squirrel-cage induction motors using ANN and ANFIS // Alexandria Engineering Journal. – 2016. – V. 55. – Iss. 1. – P. 357–368.
3. Horen Yo., Strajnikov P., Kuperman A. Simple mechanical parameters identification of induction machine using voltage sensor only // Energy Conversion and Management. – 2015. – V. 92. – P. 60–66.
4. Боловин Е.В., Глазырин А.С. Метод идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроприводных центробежных насосов для добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 123–131.

5. Tkachuk R.Yu., Glazyrin A.S., Polichshuk V.I. Induction motor drive's parameters identification using genetic algorithms // 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012. – 2012. – V. 2. – P. 586–589.

6. Применение эвристических алгоритмов в анализе данных для решения задачи диагностирования УЭЦН / Р.И. Валиахметов, В.У. Ямалиев, С.С. Шубин, А.В. Алфёров // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 159–167.

7. Разработка наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей / А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, К.С. Афанасьев, В.В. Тимошкин, И.Г. Слепнёв, В.И. Полищук, Halász Sándor // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 118–126.

8. Каширских В.Г. Динамическая идентификация параметров и управление состоянием электродвигателей приводов горных машин: дис. ... д-ра техн. наук. – Кемерово, 2005. – 335 с.
9. Investigation on SVM-Backstepping sensorless control of five-phase open-end winding induction motor based on model reference adaptive system and parameter estimation / K. Saad, K. Abdellah, H. Ahmed, A. Iqbal // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2019. – V. 22 (4). – P. 1013–1026.
10. Kun-Yung Chen, Wen-Hao Yang, Rong-Fong Fung. System identification by using RGA with a reduced-order robust observer for an induction motor // Mechatronics. – 2018. – V. 54. – P. 1–15.
11. Adaptive observer design for a class of nonlinear systems. Application to speed sensorless induction motor / M. Farza, M. M'Saad, T. Ménard, A. Ltaief, T. Maatoug // Automatica. – 2018. – V. 90. – P. 239–247.
12. Improved identification method of doubly-fed induction generator based on trajectory sensitivity analysis / H. Li, Y. Wu, Q. Li, L. Gong, X. Xie, Z. Chaia, W. Yang // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2021. – V. 125. – P. 1–10.
13. ГОСТ Р 53472-09. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний (с Изменениями № 1, 2). – М.: Изд-во стандартов, 2009. – 41 с.
14. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
15. Bai L., Ma W. Energy-saving Principles and Technologies for Induction Motors. – Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons Limited, 2019. – 227 p.
16. Storn R., Price K. Differential evolution – a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces // Journal of Global Optimization. – 1995. – № 23 (1). – P. 1–12.
17. Storn R., Price K., Lampinen J. Differential evolution: a practical approach to global optimization. – Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2005. – 285 p.
18. Пантелеев А.В. Метаэвристические алгоритмы поиска глобального экстремума. – М.: МАИ, 2009. – 160 с.
19. Звонков В.Б., Попов А.М. Сравнительное исследование классических методов оптимизации и генетических алгоритмов // Сибирский журнал науки и технологий. – 2013. – № 4 (50). – С. 23–27.
20. Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Ханнанова В.Н. Идентификация параметров трехфазного асинхронного двигателя при изменении начальных значений оценок в широком диапазоне // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 11. – С. 87–96.
21. Каширских В.Г. Определение параметров асинхронных электродвигателей в процессе их работы // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 5. – С. 96–102.
22. Shields M.D., Zhang J. The generalization of Latin hypercube sampling // Reliability Engineering & System Safety. – 2016. – V. 148. – P. 96–108.
23. SciPy is a Python-based ecosystem of open-source software for mathematics, science, and engineering // SciPy developers. 2019. URL: <https://www.scipy.org/> (дата обращения 18.10.2020).
24. Глазырин А.С. Способы и алгоритмы эффективной оценки переменных состояния и параметров асинхронных двигателей регулируемых электроприводов: дис. ... д-ра тех. наук. – Томск, 2016. – 376 с.
25. Corrêa F.C., Seixas L.D. Comparison between genetic algorithm and differential evolution tuning a fuzzy controller // Mathematics in Engineering, Science and Aerospace MESA – 2020. – V. 11. – № 3. – P. 557–567.
26. A parallel adaptive differential evolution algorithm for electric motor design / M.R. Essaid, L. Idoumghar, J. Lepagnot, M. Brévilliers // 7th International Conference on Metaheuristics and Nature Inspired computing Meta. – Marrakesh, Morocco, 2018. – V. 1 – P. 204–207.
27. Meyer M.C. Probability and mathematical statistics: theory, applications, and practice in R. – Philadelphia, USA: SIAM, 2019. – 707 p.

Поступила 18.01.2020 г.

Информация об авторах

Шубин С.С., кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

Ямалиев В.У., доктор технических наук, профессор кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов, Уфимский государственный нефтяной технический университет.

Глазырин А.С., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета; профессор Института нефти и газа Югорского государственного университета.

Буньков Д.С., инженер-программист, ООО «Элестим».

Кладиев С.Н., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Раков И.В., аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Боловин Е.В., кандидат технических наук, старший преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ковалев В.З., доктор технических наук, профессор Института нефти и газа Югорского государственного университета.

Хамитов Р.Н., доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электрической техники Омского государственного технического университета; профессор кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

UDC 621.313.333:62–83

ESTIMATION OF SUBMERSIBLE INDUCTION MOTOR EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS BASED ON TEST DATA

Stanislav S. Shubin¹,
rusoil@mail.ru

Vil U. Yamaliev¹,
rusoil@mail.ru

Alexander S. Glazyrin^{2,3},
asglazyrin@tpu.ru

Dmitriy S. Bunkov⁴,
bunkovds@tpu.ru

Sergey N. Kladiev²,
kladiev@tpu.ru

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

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

³ Yugra State University,
16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russia.

⁴ Eletim Ltd,
161A, Altayskaya street, Tomsk, 634021, Russia.

⁵ Omsk State Technical University,
11, Mira avenue, Omsk, 644050, Russia.

⁶ Tyumen Industrial University,
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

Ivan V. Rakov²,
rakovivan@live.com

Evgeniy V. Bolovin²,
orange@tpu.ru

Vladimir Z. Kovalev³,
vz_kovalev@mail.ru

Rustam N. Khamitov^{5,6},
apple_27@mail.ru

One of the main problems in operation of wells equipped with installations of electric centrifugal pumps is determining the technical condition of submersible electrical equipment and preventing its failures. Among the various approaches to solving this problem, one can single out a method for determining the technical state of an installation of electric centrifugal pumps using a complete customizable mathematical model of the installation, including a model of a submersible induction motor. This article discusses an approach to determining and restoring the necessary parameters for tuning a submersible induction motor model based on the data given in the submersible induction motor test report.

The main aim of the research is to develop a methodology for restoring the parameters of the equivalent circuit for submersible induction motor on the basis of typical data contained in the acceptance test report.

Methods. The proposed approach is based on the combined use of a tunable dynamic model of a squirrel-cage induction motor and a differential evolution algorithm. The actual solution to determine the parameters of submersible induction motor damage is reduced to solving the global optimization problem, i. e. to the problem of finding the global (best) minimum of a function.

Results. The authors have developed an approach for restoring the parameters of the submersible induction motor equivalent circuit, which allows setting the values of the equivalent circuit parameters for the submersible induction motor, acceptable for practice, according to the test results; the performance of the developed identification approach was tested using global optimization methods and mathematical modeling of submersible induction motors; the obtained estimates are stable for all parameters of the equivalent circuit except for the parameter of the mechanical subsystem.

Key words:

Identification, induction machine, genetic algorithms, heuristics, submersible induction motor, differential evolution, multivariate mathematical optimization, multivariate data, stochastic algorithms.

REFERENCES

1. Kouhi Ya., Kertzscher J.. An online nonlinear identification method for estimation of magnetizing curve and parameters of an induction motor. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, vol. 50, Iss. 1, pp. 1577–1582.
2. Jirdehi M.A., Rezaei A. Parameters estimation of squirrel-cage induction motors using ANN and ANFIS. *Alexandria Engineering Journal*, 2016, vol. 55, Iss. 1, pp. 357–368.
3. Horen Yo., Strajnikov P., Kuperman A. Simple mechanical parameters identification of induction machine using voltage sensor only. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 92, pp. 60–66.
4. Bolovin E.V., Glazyrin A.S. Method for identifying parameters of submersible induction motors of electrical submersible pump units for oil production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, № 1, pp. 123–131. In Russ.
5. Tkachuk R.Yu., Glazyrin A.S., Polichshuk V.I. Induction motor drive's parameters identification using genetic algorithms. *7th In-*

- ternational Forum on Strategic Technology, IFOST 2012*, 2012, vol. 2, pp. 586–589.
6. Valiakhmetov R.I., Yamaliev V.U., Shubin S.S., Alferov A.V. Application of heuristic algorithms in analyzing data to solve the problem of detection of electric centrifugal pumping units. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 159–167. In Rus.
 7. Glazyrin A.S., Kladiev S.N., Afanasiev K.S., Timoshkin V.V., Slepnev I.G., Polischuk V.I., Halasz S. Design of full order observer with real time monitoring of load torque for submersible induction motors. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 118–126. In Rus.
 8. Kashirskikh V.G. *Dinamicheskaya identifikatsiya parametrov i upravlenie sostoyaniem elektrodvigateley privodov gornykh mashin*. Diss. Dr. Nauk [Dynamic identification of parameters and control of the state of electric motors of drives of mining machines. Dr. Diss]. Kemerovo, 2005. 335 p.
 9. Saad K., Abdellah K., Ahmed H., Iqbal A. Investigation on SVM-Backstepping sensorless control of five-phase open-end winding induction motor based on model reference adaptive system and parameter estimation. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2019, vol. 22 (4), pp. 1013–1026.
 10. Kun-Yung Chen, Wen-Hao Yang, Rong-Fong Fung. System identification by using RGA with a reduced-order robust observer for an induction motor. *Mechatronics*, 2018, vol. 54, pp. 1–15.
 11. Farza M., M'Saad M., Ménard T., Ltaief A., Maatoug T.. Adaptive observer design for a class of nonlinear systems. Application to speed sensorless induction motor. *Automatica*, 2018, vol. 90, pp. 239–247.
 12. Li H., Wu Y., Li Q., Gong L., Xie X., Chaia Z., Yang W. Improved identification method of doubly-fed induction generator based on trajectory sensitivity analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, vol. 125, pp. 1–10.
 13. GOST R 53472-09. *Mashiny elektricheskie vrashayushiesya. Dvigateli asinkhronnye. Metody ispytanii (s Izmeneniyami № 1, 2)* [State Standard 7217-87. Rotating machines. Induction motors. Test methods (with Amendments No. 1, 2)]. Moscow, StandardInform Publ., 2009. 41 p.
 14. Sreyner R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC electric drives with semiconductor frequency converters]. Ekaterinburg, URO RAN Publ., 2000. 654 p.
 15. Bai L., Ma W. *Energy-saving principles and technologies for induction motors*. Hoboken, New Jersey, USA, John Wiley & Sons Limited, 2019. 227 p.
 16. Storn R., Price K. Differential evolution – a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 1995, no. 23 (1), pp. 1–12.
 17. Storn R., Price K., Lampinen J. *Differential evolution: a practical approach to global optimization*. Berlin, Germany, Springer-Verlag, 2005. 285 p.
 18. Panteleev A.V. *Metaevresticheskie algoritmy poiska globalnogo ekstremuma* [Metaheuristic algorithms for finding a global extremum]. Moscow, Moscow Aviation Institute Publ., 2009. 160 p.
 19. Zvonkov V.B., Popov A.M. Sravnitelnoe issledovanie klassicheskikh metodov optimizatsii i geneticheskikh algoritmov [Comparative study of classical optimization methods and genetic algorithms]. *Siberian journal of science and technology*, 2013, no. 4 (50), pp. 23–27.
 20. Afanasiev A.Yu., Makarov V.G., Khannanova V.N. Identifikatsiya parametrov trekhfaznogo asinkhronnogo dvigatelya pri izmerenii nachalnykh znachenii otsenok v shirokom diapozone [Identification of the parameters of a three-phase asynchronous motor when changing the initial values of the estimates in a wide range]. *Power engineering: research, equipment, technology*, 2015, no. 11, pp. 87–96.
 21. Kashirskikh V.G. Opredelenie parametrov asinkhronnykh elektrodvigateley v protsesse ikh raboty [Induction motors parameters estimation during their operation]. *Vestnik KuzGTU*, 2015, no. 5, pp. 96–102.
 22. Shields M.D., Zhang J. The generalization of Latin hypercube sampling. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, vol. 148, pp. 96–108.
 23. *SciPy is a Python-based ecosystem of open-source software for mathematics, science, and engineering*. SciPy developers. 2019. Available at: <https://www.scipy.org/> (accessed 18 October 2020).
 24. Glazyrin A.S. *Sposoby i algoritmy effektivnoi otsenki peremennykh sostoyaniya i parametrov asinkhronnykh dvigateley reguliruemnykh electroprivodov*. Diss. Dr. nauk [Methods and algorithms for effective estimation of the state and parameters of induction motors of variable speed drives. Dr. Diss.]. Tomsk, 2016. 376 p.
 25. Corrêa F.C., Seixas L.D. Comparison between genetic algorithm and differential evolution tuning a fuzzy controller. *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace MESA*, 2020, vol. 11, no. 3, pp. 557–567.
 26. Essaid M., Idoumghar L., Lepagnot J., Brévilliers M. A parallel adaptive differential evolution algorithm for electric motor design. *7th International Conference on Metaheuristics and Nature Inspired computing Meta*. Marrakesh, Morocco, 2018. Vol. 1, pp. 204–207.
 27. Meyer M.C. *Probability and mathematical statistics: theory, applications, and practice in R*. Philadelphia, USA, SIAM, 2019. 707 p.

Received: 18 January 2020.

Information about the authors

Stanislav S. Shubin, Cand. Sc., senior research scientist, Ufa State Petroleum Technological University.

Vil U. Yamaliev, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Alexander S. Glazyrin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University; professor, Yugra State University.

Dmitriy S. Bunkov, software engineer, Eletim Ltd.

Sergey N. Kladiev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ivan V. Rakov, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Evgeniy V. Bolovin, Cand. Sc., senior lecture, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vladimir Z. Kovalev, Dr. Sc., professor, Yugra State University.

Rustam N. Khamitov, Dr. Sc., professor, Omsk State Technical University; professor, Tyumen Industrial University.

**Компьютерная верстка О.Ю. Аршинова
Корректура и перевод на английский язык С.В. Жаркова
Дизайн обложки Т.В. Буланова**

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 28.01.2021. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 25,01. Уч.-изд. л. 22,62.
Заказ 09-21. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ