

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»



ISSN 2413-1830

ИЗВЕСТИЯ

ТОМСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Инжиниринг георесурсов

Том 326, № 9, 2015

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ

г. Томск

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА.
Инжиниринг георесурсов**

Редакционная коллегия

Дьяченко А.Н., гл. редактор, д-р тех. наук (Россия)
Рихванов Л.П., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Шварцев С.Л., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Коробочкин В.В., д-р техн. наук (Россия)
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)
Тойпель У., Dsc (Германия)
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
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 (Турция)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)
Кириянова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)
Глазырин А.С., выпуск. редактор, канд. 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 по каталогу агентства «Роспечать» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2015

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 № 77-16615 от 24 октября 2003 г.

ISSN 2413-1830

Импакт-фактор РИНЦ 2013 – 0,217

«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
- Прикладные задачи технологий георесурсов.

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

Ministry of Education and Science of the Russian Federation
National Research Tomsk Polytechnic University



ISSN 2413-1830

BULLETIN

OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY

Geo Assets Engineering

Volume 326, № 9, 2015

TPU  PUBLISHING

Tomsk

**BULLETIN
OF THE TOMSK
POLYTECHNIC
UNIVERSITY.
Geo Assets Engineering**

Editorial Board

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

© Tomsk Polytechnic University, 2015

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 № 77-166615, October 24, 2003 from the RF Ministry of Press, Broadcasting and Mass Communications).

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

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

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

- Geo Assets Exploration and Refining;
- Geo Assets Mining;
- Geo Assets Transportation;
- Geo Assets Deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets;
- Applied Aspects of Geo Assets technologies.

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

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

The publication of manuscripts is free of charge.

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

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Палеофациальные предпосылки нефтегазоносности доюрских отложений юго-восточного склона Александровского мегавала (Томская область)** 6
Линдт А.Ю.
- Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности сверхтонких жидких композиционных теплоизолирующих покрытий** 15
Анисимов М.В., Рекунов В.С.
- Литологические факторы формирования коллекторов в палеозойском разрезе Ледянского поднятия (Северо-Тунгусская Нефтегазоносная область)** 23
Вараксина И.В., Тумашов И.В.
- К вопросу о выборе фоновых концентраций химических элементов в лишайниках-эпифитах** 33
Большунова Т.С., Рихванов Л.П., Барановская Н.В.
- Расчет параметров распределенной схемы замещения обмоток трансформатора с учетом влияния скин-эффекта** 47
Исаев Ю.Н., Старцева Е.В., Щекотуев А.В.
- Генетические особенности самородного железа и продуктов его окисления в девонских гранитоидах алейско-змеиногорского комплекса (северо-западная часть Рудного Алтая)** 56
Новоселов К.Л.
- Повышение надежности систем автоматического управления газотурбинными двигателями с применением алгоритмических методов** 68
Августинович В.Г., Кузнецова Т.А.
- Внутреннее строение рудовмещающей структуры комплексного золотоуранового месторождения Северное (Эльконский урановорудный район)** 78
Зайченко А.П., Домаренко В.А., Перегудина Е.В.
- Взаимодействие природных и техногенных рассолов Верхнекамского месторождения солей с основными минералами соляной толщи** 87
Фетисов В.В., Катаева Е.П., Фетисова Н.Ф.
- Энергоэффективное производство и преобразование энергии на основе георесурсов** 95
Никонец А.Л., Венгер Вл.П., Венгер В.П.
- Низкосторное топливо Томской области: перспективы энергетического использования** 106
Табакеев Р.Б., Хаустов С.А., Черкашина Г.А., Казаков А.В.
- Влияние модифицирования поверхностных слоев никелида титана кремнием в условиях плазменно-иммерсионной обработки на его коррозионную стойкость в хлоридсодержащих средах** 114
Коршунов А.В., Лотков А.И., Кашин О.А., Абрамова П.В., Борисов Д.П.
- Лидарное зондирование озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере: методика и результаты измерений** 124
Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.А., Невзоров А.В., Романовский О.А., Харченко О.В.
- О методике определения фоновых и аномальных значений гидрогеохимических показателей** 133
Савичев О.Г., Нгуен Ван Луен
- Реконфигурация электрических сетей с распределенной генерацией и мультиагентным управлением** 143
Фишов А.Г., Мукатов Б.Б.
- Paleofacies prerequisites of pre-Jurassic crusts petroleum-and-gas content in south-eastern slope of Aleksandrovskiy megashaft (Tomsk region)** 6
Lindt A.Yu.
- Experimental determination of thermal conductivity coefficient of superthin liquid composite thermal insulation coatings** 15
Anisimov M.V., Rekunov V.S.
- Lithological features of forming paleozoic collectors of the ledyansk uplift (north tunguska oil-and-gas area)** 23
Varaksina I.V., Tumashov I.V.
- On the issue of choosing the background concentrations of chemical elements in the epiphytic lichens** 33
Bolshunova T.S., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V.
- Calculation of equivalent distributed circuit parameters of transformer winding under the influence of skin effect** 47
Isaev Y.N., Startseva E.V., Shchekotuev A.V.
- Genetic features of native iron and products of its oxidation in Devonian granitoids of the aleysk-zmeinogorsky complex (north-western area of Rudny Altai)** 56
Novoselov K.L.
- Enhancement of gas-turbine engine control reliability using algorithmic procedures** 68
Avgustinovich V.G., Kuznetsova T.A.
- Internal architecture of ore-bearing structure of complex gold-uranium deposit Severnoe (Elkon uranium ore region)** 78
Zaychenko A.P., Domarenko V.A., Peregudina Y.V.
- Interaction of natural and technogeneous brines of Verkhnekamskoe salt deposit with basic minerals of salt strata** 87
Fetisov V.V., Kataeva E.P., Fetisova N.F.
- Energy efficient production and transformation based on geo assets** 95
Nykonets A.L., Venger V.P., Venger V.P.
- Low-grade fuels of Tomsk region: prospects for energy use** 106
Tabakaev R.B., Khaustov S.A., Cherkashina G.A., Kazakov A.V.
- Influence of surface modification of nitinol with silicon using plasma-immersion ion implantation on the alloy corrosion resistance in chloride-containing solutions** 114
Korshunov A.V., Lotkov A.I., Kashin O.A., Abramova P.V., Borisov D.P.
- Lidar sensing of ozone in the upper troposphere – lower stratosphere: technique and results of measurements** 124
Burlakov V.D., Dolgii S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V.
- The technique of determining background and extreme values of hydrogeochemical parameters** 133
Savichev O.G., Nguen Van Luen
- Reconfiguration of electric networks with distributed generation and multi-agent control** 143
Fishov A.G., Mukatov B.B.

УДК 553.98:551.73(571)

ПАЛЕОФАЦИАЛЬНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ДОЮРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮГО-ВОСТОЧНОГО СКЛОНА АЛЕКСАНДРОВСКОГО МЕГАВАЛА (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Линдт Анна Юрьевна,

мл. науч. сотр. сектора оперативного картопостроения и факторного анализа Центра сопровождения проектов разработки и обустройства месторождений ОАО ТомскНИПИнефть, Россия, 636780, г. Стрежевой, ул. Промысловая, 11. E-mail: annalindt@mail.ru

На территории Томской области основными нефтегазоносными объектами считаются терригенные породы верхнеюрского и нижнемелового возраста. Однако залежи углеводородов в породах осадочного чехла в настоящее время находятся на последних стадиях разработки. Поэтому всё большее значение приобретают отложения доюрского возраста, в которых выявлены залежи нефти и газа, но их модели, условия образования ловушек, пути миграции УВ до конца не изучены. Поскольку бурение глубоких скважин (свыше 3000 м) при низкой степени геолого-геофизической изученности палеозойских пород фундамента на сегодняшний день не является приоритетным направлением для нефтегазодобывающих компаний, необходим комплексный подход при обосновании и разработке методики прогноза и оценки перспектив нефтегазоносности, с учетом набора критериев, дающих наиболее достоверные выводы для каждой территории индивидуально. В данной работе автором предложена оценка перспективности территории юго-восточного склона Александровского мегавала с помощью палеофациальной реконструкции древних обстановок осадконакопления.

Цель работы: выявить комплексы пород, условия осадконакопления которых могли способствовать образованию древних карбонатных массивов, способных впоследствии формировать ловушки, вмещать и сохранять залежи нефти и газа на территории юго-восточного склона Александровского мегавала. Также важным является определение площадного распространения комплексов пород-«покрышек» отложений, обладающих свойствами флюидоупоров.

Методы исследования: анализ описания керна и шлифов глубоких скважин юго-восточного склона Александровского мегавала (Томская область), сопоставление результатов проведённого анализа керна скважин с литолого-палеогеографическими картами СССР под редакцией А.П. Виноградова (1968–1969 гг.) и картой вещественного состава поверхности фундамента Томской области М.П. Нагорского (1977 г.).

Результаты исследования. Проведено уточнение палеофациальных обстановок и климатических зон осадконакопления юго-восточного склона Александровского мегавала в доюрский период. Проанализированы палеофациальные и палеогеографические обстановки осадконакопления. Выявлены участки и комплексы пород, благоприятные для последующего формирования, накопления и сохранения залежей углеводородов, а также стратиграфические подразделения и районы формирования пород-«покрышек».

Key words:

Palaeozoic, Aleksandrovskiy megashaft, carbonate rocks, deposit, renovation, sea, climate.

Территория Томской области давно известна своим богатым нефтегазоносным потенциалом. На сегодняшний день здесь открыто более 120 нефтяных и газовых месторождений [1]. Основными продуктивными горизонтами считаются песчаные отложения верхнеюрского и нижнемелового возраста. Однако большая часть таких залежей находится на третьей, а то и четвертой стадиях разработки. Поэтому всё большее значение приобретают ловушки нефти и газа, выявленные в отложениях палеозойского возраста, модели залежей которых до конца не изучены.

В настоящее время установлено, что нефтегазоносные области обычно приурочены к крупным тектоническим структурам, к которым относятся краевые прогибы, внутриплатформенные, межгорные, предгорные и другие впадины, выполненные мощной толщей осадочных образований [2].

Александровский мегавал – структура первого порядка. Его юго-восточный склон – одна из довольно хорошо изученных глубоким бурением территорий Томской области. Здесь выявлен ряд залежей углеводородов в породах доюрского комплекса. Наиболее перспективными объектами в плане обнаружения новых залежей в этих породах счита-

ются древние карбонатные массивы [3–5], вскрытые рядом глубоких скважин вдоль всего юго-восточного склона Александровского мегавала. В целом же карбонатная формация данного региона изучена довольно слабо, особенно мало информации по карбонатному комплексу центрального района, где получил широкое территориальное распространение гранитоидный батолит Назино-Сенькинского антиклинория [6–8].

На сегодняшний день изучение палеозойского комплекса глубоким бурением не является приоритетным направлением в нефтегазодобывающих компаниях, поскольку требует дополнительных и не всегда оправданных затрат на бурение. Поэтому при анализе вероятности получения положительного результата по итогам глубокого бурения на той или иной площади геологам приходится прибегать к косвенным методам оценки нефтегазоперспективности доюрского комплекса района работ.

Довольно много геологических задач помогает решить палеофациальный анализ. Изучение условий формирования осадков, выяснение закономерности изменения их состава и размещения в пространстве помогает более точно прогнозировать районы возможной локализации залежей нефти и газа [9].



Рис. 1. Фрагмент литолого-палеогеографической карты СССР. Поздний протерозой. Венд (с уточнением по керну скважин) [10]

Fig. 1. Fragment of the lithological-paleogeographical map of the USSR. Late Proterozoic. Vendian (with specification on a core of wells) [10]

В данной работе палеофациальная реконструкция и восстановление древних обстановок седиментации юго-восточного склона Александровского мегавала основывается на совместном рассмотрении: описания керна и шлифов скважин, древних климатических зон, палеонтологических остатков и 3-х томов литолого-палеогеографических карт СССР под редакцией А.П. Виноградова (1968–1969 г.) [10–12].

Итак, в позднем протерозое, благодаря проявлению байкальской складчатости, был окончательно сформирован фундамент древних платформ, возникли и начали своё развитие большие геосинклинальные пояса [13, 14].

Томская область в эпоху позднего протерозоя принадлежала Саяно-Алтайской геосинклинальной области, которая обрамляла восточную часть Сибирской платформы, и представляла собой морской бассейн, разделённый грядами островов (рис. 1) [13]. Накопление осадков в среднем и позднем протерозое в геосинклинальных областях проходило в тектонически напряжённых условиях. Поэтому отложения данного периода состоят в основном из метаморфических и магматических образований, в том числе и интрузивных [14].

Большая часть территории Александровского мегавала принадлежала юго-востоку древнего Тобольского острова, что подтверждается глубоким бурением на Вахском, Чебачьем, Кондаковском, Таёжном и Назинском месторождениях. Лишь район Чкаловской площади оказался во власти тёплых вод Казахстанского моря [6].

Палеогеографические обстановки:



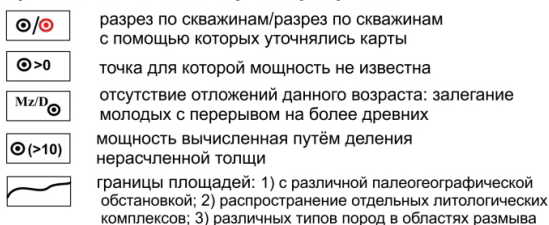
1 - низкие горы; 2 - возвышенная равнина, плато; 3 - холмистая равнина; 4 - низменная равнина, межгорная впадина; 5 - равнина прибрежная, временами заливавшаяся морем; 6 - море внутреннее, залив, озеро с повышенной солёностью; 7 - море, мелкая часть шельфа и прибрежная зона; 8 - море, глубокая часть шельфа; 9 - море, батимальная область

Тип отложений:

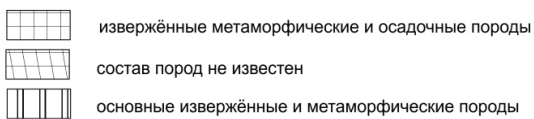


1 - известняки; 2 - известняки органогенные; 3 - известняки битуминозные; 4 - глинистые пески и песчаные глины; 5 - глины; 6 - кремнистые породы; 7 - метаморфические и извержённые разности; 8 - вулканические образования основного состава (пирокластические); 9 - вулканические образования среднего состава (пирокластические); 10 - вулканические образования основного состава (излившиеся, экструзивные и субвулканические); 11 - вулканические образования среднего состава (излившиеся, экструзивные и субвулканические)

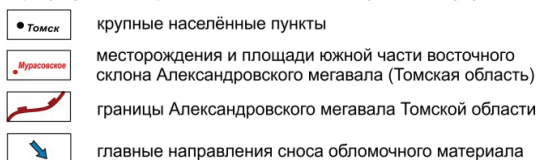
Границы и точки опорных разрезов:



Типы пород в областях размыва древней суши:



Примечание: Штриховка не даётся в областях древней суши, где наряду с условиями размыва могли иметь место условия аккумуляции



Условия в морских бассейнах того времени существенно отличались от современных. Воды океанов содержали довольно большое количество углекислоты и обладали пониженной солёностью. Однако к началу венда, благодаря фотосинтезу, содержание свободного кислорода в атмосфере увеличилось, а солёность океанической воды достигла практически современного уровня [14]. Такой температурный режим, насыщенность атмосферы и морей углекислым газом способствовали развитию строматолитов и микрофитолитов [13], благодаря чему в шельфовых зонах древних морей шло активное накопление высокомагнезиальной карбонатно-терригенной формации.

На территории Западной Сибири на протяжении всего допалеозойского периода сохранялся тёплый морской климат. По данным палеотермометрии, температура среды обитания строматолитов во второй половине венда колебалась в пределах 35–45 °C [13].

На Чкаловском месторождении отложения позднего венда представлены окремнёнными, трещиноватыми, серыми до чёрного цвета доломитами. Фаунистические остатки охарактеризованы строматолитами [15].

В конце венда – раннем кембрии наблюдается интенсивное погружение Сибирской платформы. С её прогибанием связана трансгрессия Казахстанского моря, вследствие которой Тобольский остров становится возвышенностью (рис. 2).

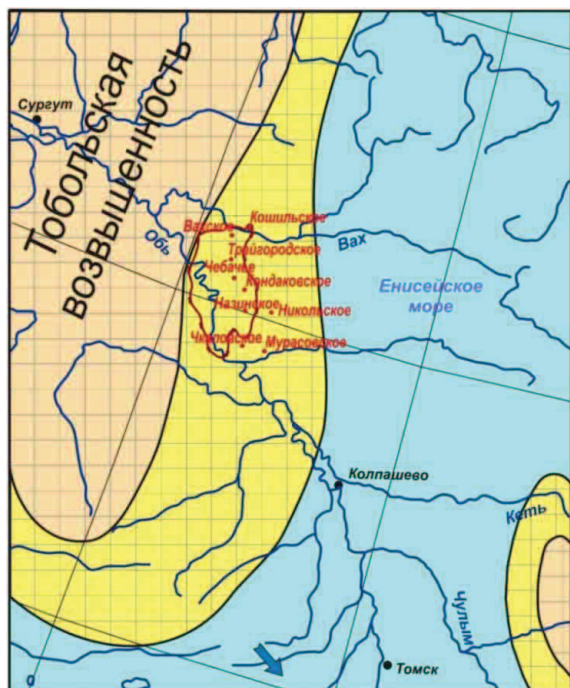


Рис. 2. Фрагмент литолого-палеогеографической карты СССР. Кембрийский период. Майский век [10]

Fig. 2. Fragment of the lithological-paleogeographical map of the USSR. Cambrian. May age [10]

Климат становится сухим и жарким, о чём свидетельствуют раннекембрийские соленосные отложения Сибирской платформы [16].

Отсутствие в изучаемом районе осадков, накопленных в кембрии, вероятно, говорит о том, что юго-восточный склон Александровского мегавала представлял собой в этот период зону денудации.

После трансгрессии, максимум которой пришёлся на средний кембрий, в начале ордовика, вновь началась регрессия моря, связанная с проявлением каледонского цикла тектогенеза [16].

На территории Томской области, практически повсеместно, установились платформенные условия осадконакопления (рис. 3). Здесь, в условиях жаркого климата, в наземной обстановке формировалась пёстрая, красноцветная формация, представленная песчаниками, алевролитами, аргиллитами, пачками грубообломочных конгломератов, реже глинистыми сланцами и кислыми лавами [7]. В Алтайском море отлагались карбонатно-терригенные илы, пески и развивались богатые биоценозы [16].

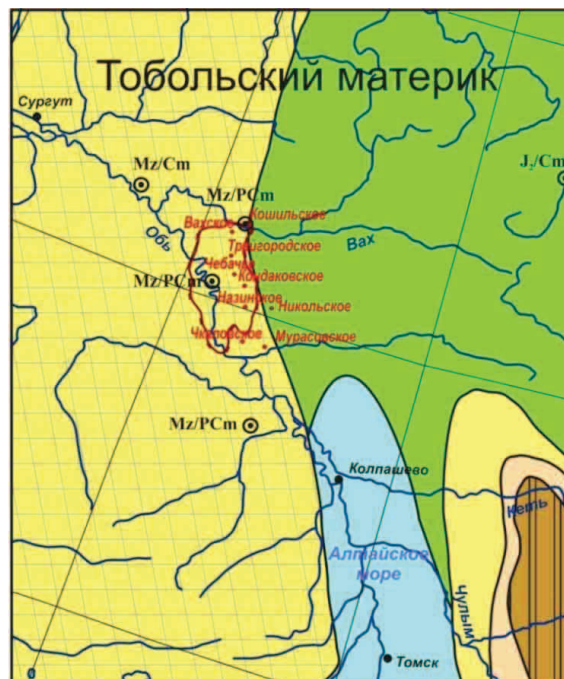


Рис. 3. Фрагмент литолого-палеогеографической карты СССР. Ордовикский период. Ранний ордовик [10]

Fig. 3. Fragment of the lithological-paleogeographical map of the USSR. Ordovician. Early Ordovician [10]

В силуре продолжают движения каледонского цикла тектогенеза: характерны интенсивные складкообразовательные движения [16]. Море начинает своё наступление на Тобольский материк (рис. 4).

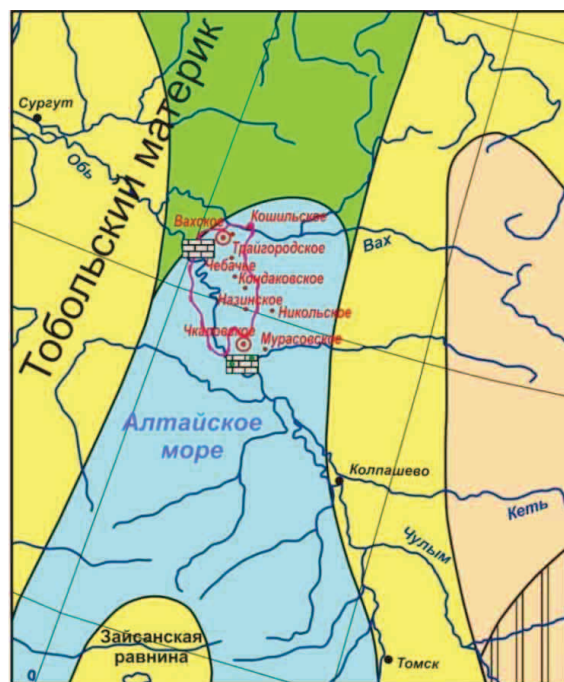


Рис. 4. Фрагмент литолого-палеогеографической карты СССР. Силурийский период. Тиверский век [10]

Fig. 4. Fragment of the lithological-paleogeographical map of the USSR. Silurian. Tiver age [10]

В пределах Обь-Зайсанской системы, в глубоководных условиях, происходят подводные излияния [13]. Формируется Зайсанская равнина, обособляется Алтайское море.

Характер осадков на Северном, Вахском, Чкаловском, Григорьевском и Приграничном месторождениях (рис. 4) говорит о том, что здесь существовал мелководный морской бассейн с коралловыми рифами – залив Алтайского моря, который сохранялся в течение всего силура. Его сообщение с другими морями было затруднено, о чём свидетельствует эндемичная фауна [17].

Похолодание в позднем ордовике привело к снижению температуры силурийских морей. Карбонатные отложения силура в пределах территории Западной Сибири характеризуются повышенным содержанием магния и обеднёнными комплексами кораллов, брахиопод и граптолитов [18].

Согласно результатам глубокого бурения силурийские отложения на территории южной части юго-восточного склона Александровского мегавала представлены переслаиванием трещиноватых глинистых от серых до чёрного цвета известняков и доломитов с зеленоватым оттенком. Фаунистические остатки охарактеризованы фрагментами строматопорат на Чкаловском месторождении.

В раннем девоне в Центральноазиатском поясе происходит интенсивное прогибание. Особенно сильно прогибалась Обь-Зайсанская система [13]. Уральская и Обь-Зайсанская геосинклинали оказались под водой, образовав Уральское и Обь-Зайсанское моря, объединённые Демьяновским проливом (рис. 5). Тобольский материк становится частью Пурской низменности. Территория Александровского мегавала была затоплена и представляла собой мелководную часть шельфа Обь-Зайсанского моря.

Воды морей характеризовались нормальной солёностью [13]. Там шло накопление рифогенных известняков и рифовых массивов.

Раннедевонский комплекс выявлен по результатам глубокого бурения на Кошильском и Трайгородском месторождениях. Разрез представлен органическими серыми известняками с голубовато-серым или зеленовато-серым оттенками. Фаунистические остатки охарактеризованы табулятоморфными кораллами на Вахском месторождении [17].

Климатическая зональность в девонский период была более чёткой, чем в начале палеозоя. Территория Томской области располагалась в зоне аридного климата. Среднее значение палеотемператур составляло 20–24 °C [13].

Нарастающая трансгрессия моря, обусловленная общим повышением уровня Мирового океана, достигла своего максимума в пределах Обь-Зайсанской системы к концу раннего девона. На территории юго-восточного склона Александровского мегавала этот период характеризуется накоплением глубоководно-морской терригенной формации, что подтверждается полным отсутствием органики. Отложения этого периода представлены пересла-

иванием тёмно-зелёных, кремво-бурых до чёрных аргиллитов и светло-серых до чёрных песчаников.

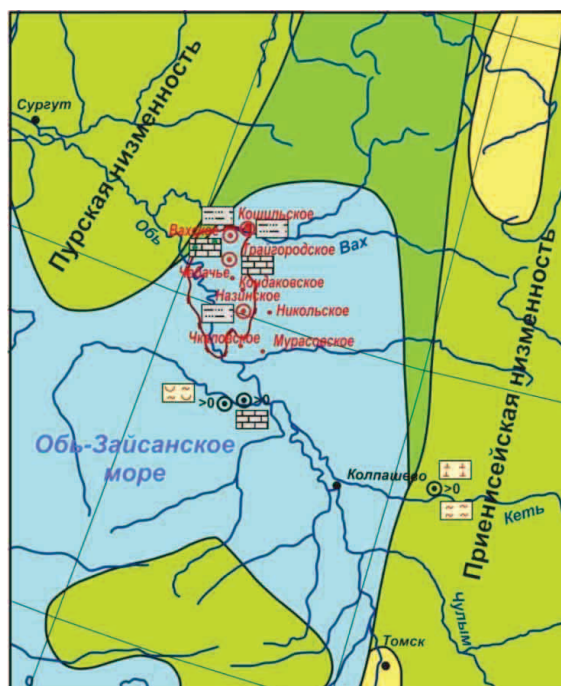


Рис. 5. Фрагмент литолого-палеогеографической карты СССР. Девонский период. Раннедевонская эпоха [11]

Fig. 5. Fragment of the lithological-paleogeographical map of the USSR. Devonian. Early Devonian [11]

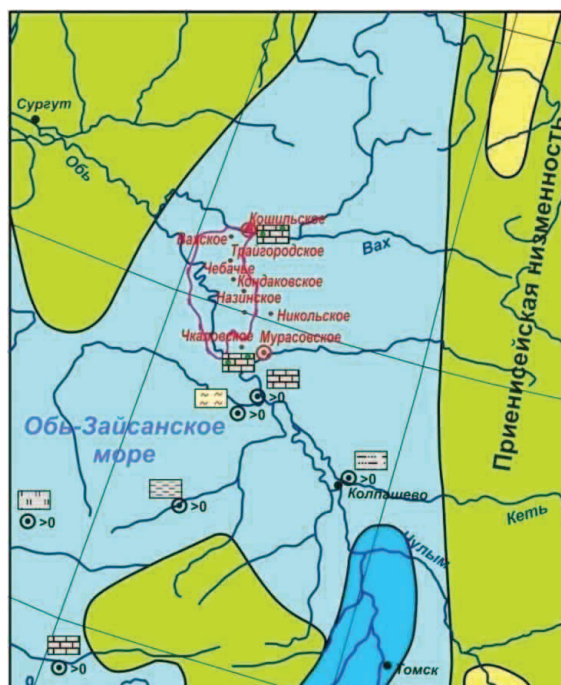


Рис. 6. Фрагмент литолого-палеогеографической карты СССР. Девонский период. Среднедевонская эпоха. Живетский век (с уточнением по керну скважин) [11]

Fig. 6. Fragment of the lithological-paleogeographical map of the USSR. Devonian. Middle Devonian epoch. Givetian age (with specification on a core of wells) [11]

В среднем и позднем девоне Центральноазиатский пояс вступил в зрелую стадию развития.

Климат стал более влажным. С течением времени постепенно исчезают глубоководные области [13]. Расширяются шельфовые зоны (рис. 6, 7), области накопления флиша, и усиливается андезитовый вулканизм [16]. В морях отлагаются органогенные известняки, формируются рифовые массивы.

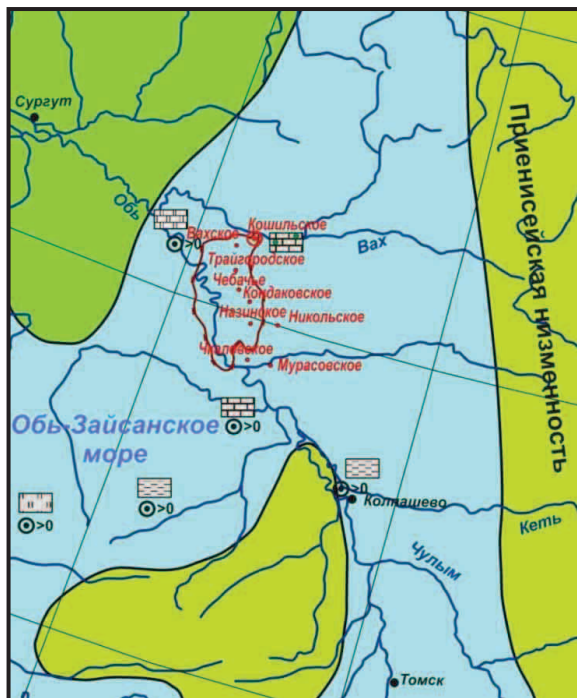


Рис. 7. Фрагмент литолого-палеогеографической карты СССР. Девонский период. Позднедевонская эпоха. Франский век (с уточнением по керну скважин) [11]

Fig. 7. Fragment of the lithological-paleogeographical map of the USSR. Devonian. Early Devonian. Frasnian age (with specification on a core of wells) [11]

Отложения среднего девона вскрыты большим количеством скважин на Кошильском месторождении, а также на Мурасовской площади. Среднедевонский разрез представлен органогенными известняками: серыми с коричневатым оттенком в северной части юго-восточного склона Александровского мегавала и чёрными с кремовым оттенком – в южной. Фаунистически средний девон охарактеризован табулятами, фораминиферами и кораллами Мурасовской площади [6, 8]. В северной части территории исследования согласно анализу керна скважин мелководно-морская обстановка сменяется глубоководно-морской: в карбонатных отложениях появляется глинистая и кремнисто-глинистая появляющиеся, отсутствует органика [7].

Отложения позднего девона согласно результатам глубокого бурения вскрыты лишь на Кошильской площади и представлены тонкополосчатыми известняками грязно-серого цвета с буроватым оттенком, с видимыми ходами илоедов и пиритизацией. Фаунистически данный комплекс представлен остатками: конодонтов, брахиопод, акритархов, а также изучен споро-пыльцевой комплекс [6, 7].

В карбоне активизировались тектонические движения, связанные с проявлением герцинского цикла тектогенеза, максимум которых пришёлся на вторую половину карбона. В завершающую стадию входит развитие Центральноазиатского пояса [13]. На большей части платформ, каледонских складчатых областей и геосинклиналей преобладало море.

В раннекаменноугольный период территория Александровского мегавала находилась в глубоководно-морской обстановке Обь-Зайсанского моря, спокойной по гидродинамике. Отложения этого периода характеризуются наличием глинисто-песчанистой составляющей (рис. 7). Данный комплекс вскрыт скважиной № 330Р на Кошильской площади и представлен чёрной глинисто-кремнисто-известковой формацией [7].

Но уже в середине каменноугольного периода наметилась тенденция к освобождению значительных участков земной коры от морских вод. Море регрессировало (рис. 8). В геосинклинальных зонах в это время возникли горные хребты, площадь морских бассейнов сократилась, а сами бассейны расчленились на множество самостоятельных водоёмов [14].

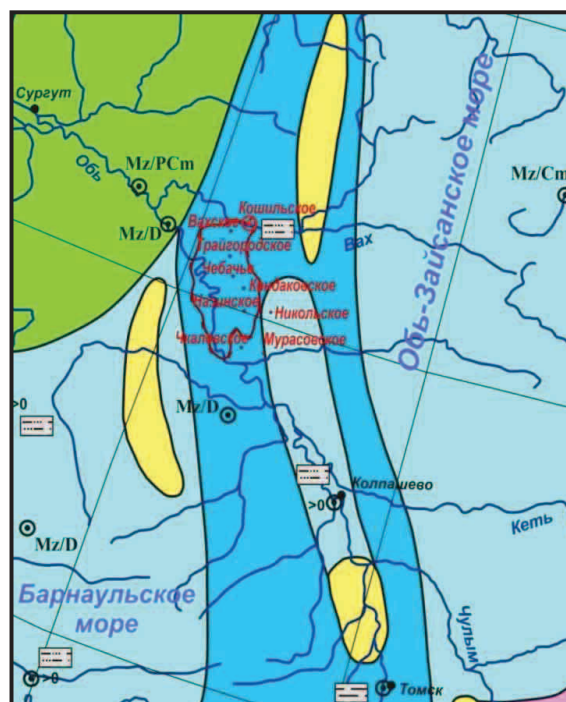


Рис. 8. Фрагмент литолого-палеогеографической карты СССР. Каменноугольный период. Турнейский век (с уточнением по керну скважин) [11]

Fig. 8. Fragment of the lithological-paleogeographical map of the USSR. Carboniferous. Tournaisian age (with specification on a core of wells) [11]

На территории Западной Сибири существовал тропический климат с обильным увлажнением. Палеотемпература Земли в карбоне составляла 24–26 °С. К среднему и позднему карбону климат сильно изменился. Прогрессивно развивается похолодание. Средняя глобальная температура Зе-

или в позднем карбоне оказалась ниже на 10–15 °С, чем в раннем.

На рубеже позднекаменноугольной и пермской эпох территория юго-восточного склона Александровского мегавала располагалась в лагунной зоне морского бассейна. По результатам бурения скважин на Амбарской площади отложения представлены терригенно-карбонатной формацией [6].

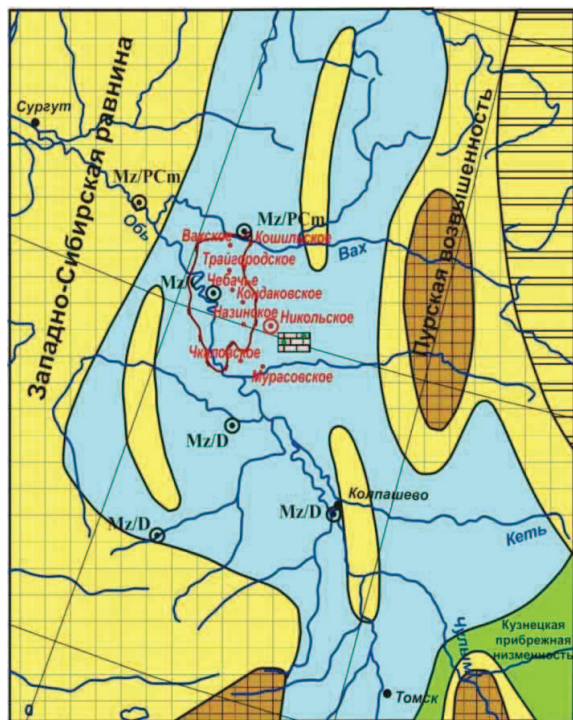


Рис. 9. Фрагмент литолого-палеогеографической карты СССР. Каменноугольный период. Позднекаменноугольная эпоха (с уточнением по керну скважин) [11]

Fig. 9. Fragment of the lithological-paleogeographical map of the USSR. Carboniferous. Late Carboniferous (with specification on a core of wells) [11]

В пермскую эпоху и платформы, и геосинклинальные области были почти полностью выведены из-под уровня моря [14]. На территории юго-восточного склона Александровского мегавала комплекс пермского возраста вскрыт и изучен на Никольской площади (рис. 9). Отложения представлены грубообломочными породами континентальной молассы. Фаунистические остатки представлены органическим веществом, в виде точечных включений, реже волокон [7].

К поздней перми на континентах происходит максимум регрессии моря, что, вероятно, связано с орогенным этапом герцинского тектогенеза (рис. 10). Его последние фазы сопровождалось мощным интрузивным, эффузивным (преимущественно наземным) и траповым магматизмом [18]. На обширных сильнообводнённых озёрно-аллювиальных низменностях Западной Сибири формировались сероцветные терригенные осадки, обогащённые углистым материалом [13]. Морские фации имели ограниченное распространение [13].

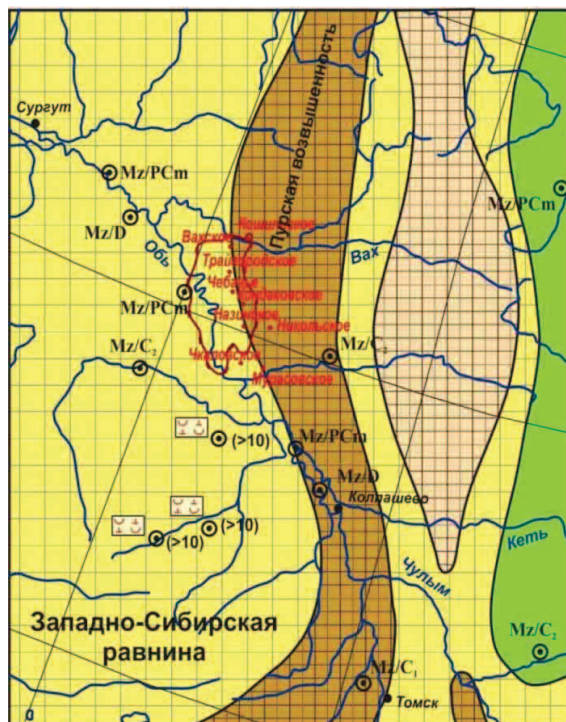


Рис. 10. Фрагмент литолого-палеогеографической карты СССР. Пермский период. Татарский век [11]

Fig. 10. Fragment of the lithological-paleogeographical map of the USSR. Permian. Tatarian age [11] (с уточнением по керну скважин)

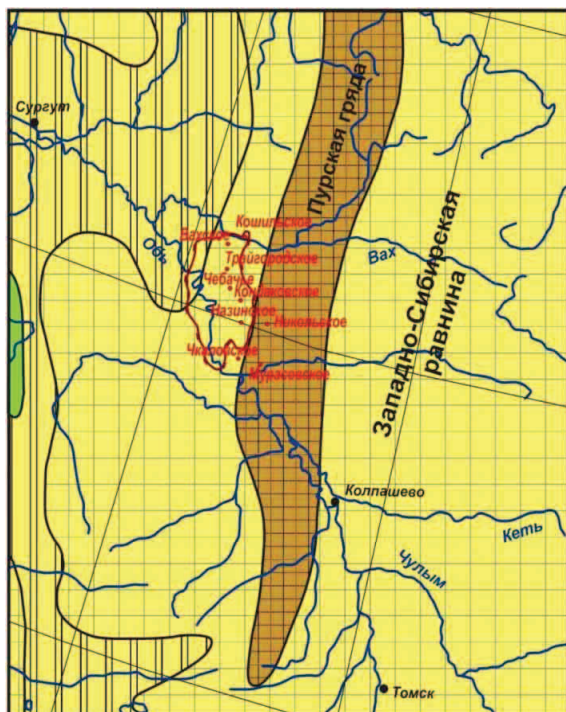


Рис. 11. Фрагмент литолого-палеогеографической карты СССР. Триасовый период. Среднетриасовая эпоха [12]

Fig. 11. Fragment of the lithological-paleogeographical map of the USSR. Triassic. Middle Triassic epoch [12]

В поздней перми климатическая зональность не претерпела значительных изменений в температурном отношении, но заметно повысилась засушливость. Территория Западной Сибири оказалась за пределами тропического климата: в области с относительно умеренными температурами (субтропические условия).

Триасовая эпоха характеризуется затуханием тектонической и магматической активности. Отмечается возникновение новых и оживление старых разломов. Опускание блоков ведёт к образованию и оживлению рифтовых зон. По разломам наблюдается вулканическая деятельность [14]. Продолжается регрессия, начавшаяся в позднем палеозое [14]. Формируется вулканогенно-осадочная формация.

К середине триасового периода территория исследования оставалась приподнятой выше уровня океана (рис. 11) и служила областью денудации [13].

Климатически территория Западной Сибири оказалась в зоне с переменено-влажными тропическими условиями. В этот период осадконакопление связано с основными изверженными, метаморфическими и осадочными породами. Происходит формирование серо-цветных терригенных толщ и коры выветривания. Карбонатное осадконакопле-

ние подавлялось мощным поступлением терригенного материала [13].

Выводы

1. Наиболее благоприятными климатическими и мелководно-морскими условиями для накопления органогенных карбонатных отложений и рифовых комплексов территория исследования обладала в период позднего венда (район Чкаловской площади), силура, девона, а также на рубеже позднего карбона – начала перми.
2. Глубоководно-морская фация, связанная с формированием мощных глинистых толщ на юго-восточном склоне Александровского мегавала, формировалась в раннем карбоне. Она, вероятно, может служить покрывкой для залежей девонского возраста [19].
3. В триасовый период, а также в венде, кембрии, ордовике и средней-поздней перми изучаемый регион находился в платформенных условиях осадконакопления и представлял собой зону денудации. Благодаря этому образовались переделы в осадконакоплении данного региона, к которым вполне могут быть приурочены залежи нефти и газа [20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кайдалина Т.Е., Макарова П.Г. Прогноз нефтегазоносности кембрийско-вендского осадочного комплекса востока Томской области // Проблемы геологии и освоения недр: Труды IX междунар. науч. симпозиума им. академика М.А. Усова студентов и молодых учёных. – Томск, 11–15 апреля 2005. – Томск: ТПУ, 2005. – С. 330–332.
2. Машкович К.А. Методы палеотектонических исследований в практике поисков нефти и газа. – М.: Недра, 1976. – 213 с.
3. Хэлбути М.Т. Геология гигантских месторождений нефти и газа / пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – 431 с.
4. Багринцева К.И. Карбонатные породы – коллекторы нефти и газа. – М.: Недра, 1977. – 232 с.
5. Запивалов Н.П., Попов И.П. Флюидодинамические модели залежей нефти и газа. – Новосибирск: СО РАН «Гео», 2003. – 198 с.
6. Линдт А.Ю. Перспективы нефтегазоносности доюрских пород восточного склона Александровского мегавала // Современные технологии и результаты геологических исследований в изучении и освоении недр Земли: Труды лауреатов Всероссийского конкурса НИР студентов и аспирантов в области науки о Земле. – Томск, 10 июля – 30 августа 2011. – Томск: ТПУ, 2011. – С. 58–63.
7. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Палеозой Западной Сибири / Е.А. Ёлкин, В.И. Краснов, Н.К. Бахарев и др. – Новосибирск: СО РАН филиал «Гео», 2001. – 163 с.
8. Исаев Г.Д. Кораллы, биостратиграфия и геологические модели палеозоя Западной Сибири. – Новосибирск: СО РАН «Гео», 2007. – 248 с.
9. Ильин В.Д., Фортунатова Н.К. Методы прогнозирования и поисков нефтегазоносных рифовых комплексов. – М.: Недра, 1988. – 201 с.
10. Атлас литолого-палеогеографических карт СССР. Докембрий, кембрийский, ордовикский и силурийский периоды. Масштаб 1:7500000 и др. / гл. ред. А.П. Виноградов; ред. Б.М. Кеплер, Н.Н. Предтеченский. – М.: ВСЕГЕИ, 1968. – Т. 1. – 52 л.
11. Атлас литолого-палеогеографических карт СССР: Девонский, каменноугольный и пермский периоды. Масштаб 1:7500000 и

др. / гл. ред. А.П. Виноградов; ред. В.Д. Наливкин, В.М. Познер. – М.: ВСЕГЕИ, 1969. – Т. 2 – 65 л.

12. Атлас литолого-палеогеографических карт СССР: Триасовый, юрский и меловой периоды. Масштаб 1:7500000 и др. / гл. ред. А.П. Виноградов; ред. В.Н. Верещагина, А.Б. Рогова. – М.: ВСЕГЕИ, 1968. – Т. 3. – 71 л.
13. Хаин В.Е., Короновский Н.В., Ясаманов Н.А. Историческая геология. – М.: МГУ, 1997. – 448 с.
14. Гаврилов В.П. Историческая геология и региональная геология СССР. – М.: Недра, 1979. – 301 с.
15. Гашилова О.А. Уточнение геологической модели и оперативный подсчёт запасов Чкаловского нефтегазоконденсатного месторождения по результатам бурения скважины 501Р // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XI Междунар. симпозиума им. академика М.А. Усова студентов и молодых учёных. – Томск: ТПУ, 2007. – С. 286–288.
16. Парфёнова М.Д. Историческая геология с основами палеонтологии. – Томск: Изд-во НТЛ, 1999. – 524 с.
17. Линдт А.Ю. Стратиграфическое расчленение и нефтегазоносность карбонатных пород доюрского комплекса восточного склона Александровского мегавала (Томская область) // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVIII междунар. науч. симпозиума им. академика М.А. Усова студентов и молодых учёных. – Томск: ТПУ, 2014. – Т. 1. – С. 317–319.
18. Коваленко С.Н. Геология и геохимия. – Иркутск, 2010. URL: <http://kafgeo.igpu.ru/web-text-books/geology/r5-2.htm> (дата обращения: 14.02.2014).
19. Запивалов Н.П., Исаев Г.Д. Критерии оценки нефтегазоносности палеозойских отложений Западной Сибири // Вестник ТГУ. – 2010. – № 341. – С. 226–232.
20. Критерии прогноза нефтегазоносности палеозоя Западно-Сибирской плиты / Г.Д. Исаев, Н.Ф. Столбова, Ю.В. Киселев, М.С. Паровинчак, Н.Л. Запивалов, Б.А. Канарейкин // Известия ТПУ. – 2001. – Т. 304. – № 1. – С. 49–56.

Поступила 13.03.2015 г.

UDC 553.98:551.73(571)

PALEOFACIES PREREQUISITES OF PRE-JURASSIC CRUSTS PETROLEUM-AND-GAS CONTENT IN SOUTH-EASTERN SLOPE OF ALEKSANDROVSKIY MEGASHAFT (TOMSK REGION)

Anna Yu. Lindt,

TomskNIPneft Corp., 11, Promislovaya street, Strezhevoy, 636780, Russia.

E-mail: annalindt@mail.ru

The main petroleum and gas objects in Tomsk region are terrigenous rocks of upper-Jurassic and under-chalk age. However, the hydrocarbon deposits in rocks of the settled cover are at the last stages of development now. Therefore, the pre-Jurassic deposits, where oil and gas deposits have been found out, become more important, but their models, trap occurrence conditions, ways of hydrocarbon migration are not studied very well at present time. As deep wells (more than 3000 m) drilling under low degree of geologic and geophysical studying of Paleozoic rocks of foundation is not the priority tendency today for Petroleum and Gas Extracting Companies, the complex approach to development and basis forecast system and estimation of oil and gas-bearing prospects is required considering the set of criteria which can show the most reliable conclusions for every territory separately. The author offers the estimation of availability of south-eastern slope of Aleksandrovskiy megashaft with the help of paleofacies reconstruction of sedimentation ancient conditions.

The main aim of the study is to disclose rock complexes, which sedimentation conditions could promote the formation of ancient carbonate blast. The latter can form traps, accumulate and keep oil and gas deposits on the territory of south-eastern slope of Aleksandrovskiy megashaft. Determination of area spreading of rock-«lid» deposit complexes, with features of fluid traps is one more important thing.

The methods used in the study: analysis of description of cores and joints of deep wells in south-eastern slope of Aleksandrovskiy megashaft (Tomsk region), comparison of the results of the carried out analysis of well core with lithological and paleogeographic maps of the USSR maps, edited by A.P. Vinogradov (1968–1969) and the material composition map of Tomsk region foundation surface by M.P. Nagorskiy (1977).

The results. The author corrected the paleofacies conditions and climate zones of sedimentation in south-eastern slope of Aleksandrovskiy megashaft in pre-Jurassic period. The paleofacies and paleogeographic conditions of sedimentation were analyzed and the localities and rock complexes, which are profitable for further formation, stocking and keeping of hydrocarbon deposits, and stratigraphic subdivisions and regions of the rock-«lid» formation were revealed.

Ключевые слова:

Палеозой, Александровский мегавал, карбонатные породы, залежь, реконструкция, море, климат.

REFERENCES

- Kaydalina T.E., Makarova P.G. Prognoz neftegazonosnosti kembriysko-vendского osadochnogo kompleksa vostoka Tomskoy oblasti [Prediction of petroleum potential of Cambrian-Vendian sedimentary complex in the east of Tomsk region]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy IX mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh* [Proc. 9th Int. Earth science. Symp. Problems of geology and entrails development]. Tomsk, 2005. pp. 330–332.
- Mashkovich K.A. *Metody paleotektonicheskikh issledovaniy v praktike poiskov nefti i gasa* [Paleotectonic research methods in oil and gas exploration]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 213 p.
- Khelbuti M.T. *Geologiya gigantikh mestorozhdeniy nefti i gasa* [Geology of giant oil and gas fields]. Transl. from English. Moscow, Mir Publ., 1973. 431 p.
- Bagrintseva K.I. *Karbonatnye porody – kollektory nefti i gasa* [Carbonate rocks are reservoirs of oil and gas]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 232 p.
- Zapivalov N.P., Popov I.P. *Flyuidodinamicheskie modeli zalezhey nefti i gasa* [Flyudodynamic models of oil and gas]. Novosibirsk, Geo Publ., 2003. 198 p.
- Lindt A.Yu. Perspektivy neftegazonosnosti doyrskikh porod vostochnogo sklona Aleksandrovskogo megavala [Petroleum prospects of pre-Jurassic rocks of eastern slope of Aleksandrovskiy megashaft]. *Sovremennye tekhnologii i rezultaty geologicheskikh issledovaniy v izuchenii i osvoenii Zemli. Trudy laureatov vserossiyskogo konkursa NIR studentov i aspirantov v oblasti nauki o Zemle* [Proc. Int. Earth science. All-Russian competition. Modern technology and the results of geological investigations in the study and development of the Earth's interior]. Tomsk, 2011. pp. 58–63.
- Elkin E.A., Krasnov V.I., Bakharev N.K. *Stratigrafiya neftegazonosnykh basseynov Sibiri. Paleozoy Zapadnoy Sibiri* [Stratigraphy of oil and gas basins of Siberia. Paleozoic of Western Siberia]. Novosibirsk, Geo Publ., 2001. 163 p.
- Isaev G.D. *Korally, biostratigrafiya i geologicheskie modeli paleozoya Zapadnoy Sibiri* [Corals, biostratigraphy and geological models of Paleozoic of Western Siberia]. Novosibirsk, Geo Publ., 2007. 248 p.
- Ilin V.D., Fortunatova N.K. *Metody prognozirovaniya i poiskov neftegazonosnykh rifovykh kompleksov* [Methods of orecasting and searching for oil and gas reef complexes]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 201 p.
- Atlas litologo-paleogeograficheskikh kart SSSR. Dokembriy, kembriy, ordovikiyskiy i siluriyskiy periody. Masshtab 1:7500000 [Atlas of the lithological-paleogeographical maps of the USSR. Pre-Cambrian, Cambrian, Ordovician and Silurian. Scale 1:7500000]. Ch. ed. A.P. Vinogradov; Eds. B.M. Kepler, N.N. Predtechenskiy. Moscow, VSEGEI Press, 1968. Vol. 1.
- Atlas litologo-paleogeograficheskikh kart SSSR. Devonkiy, karnenougolny i permskiy periody. Masshtab 1:7500000 [Atlas of the lithological-paleogeographical maps of the USSR. Devonian, Carboniferous and Permian. Scale 1:7500000]. Ch. Ed. A.P. Vinogradov; Eds. V.D. Nalivkin, V.M. Pozner. Moscow, VSEGEI Press, 1969. Vol. 2.
- Atlas litologo-paleogeograficheskikh kart SSSR. Triasovy, Yurkiy i melovoy periody. Masshtab 1:7500000 [Atlas of the lithological-paleogeographical maps of the USSR. Triassic, Jurassic and Cretaceous. Scale 1:7500000]. Ch. Ed. A.P. Vinogradov; Eds. V.N. Vereshchagin, A.B. Ronov. Moscow, VSEGEI Press, 1968. Vol. 3.
- Khain V.E., Koronovskiy N.V., Yasmanov N.A. *Istoricheskaya geologiya* [Historical geology]. Moscow, MGU Publ., 1997. 448 p.

14. Gavrilov V.P. *Istoricheskaya geologiya i regionalnaya geologiya SSSR* [Historical geology and regional geology of the USSR]. Moscow, Nedra Publ., 1979. 301 p.
15. Gashilova O.A. Utochnenie geologicheskoy modeli i operativny podschet zapasov Chkalovskogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya po rezultatam bureniya skvazhiny 501R [Geological model and operational estimation of reserves of Chkalov oil and gas field by the results of drilling 501R well]. *Problemy geologii i osvoeniya neдр. Trudy ?? mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh* [Proc. 11th Int. Earth science. Symp. Problems of geology and entrails development]. Tomsk, 2007. pp. 286–288.
16. Parfenova M.D. *Istoricheskaya geologiya s osnovami paleontologii* [Historical geology with the basics of paleontology]. Tomsk, NTL Publ., 1999. 524 p.
17. Lindt A.Yu. Stratigraficheskoe raschlenenie i neftegazonosnost karbonatnykh porod doyrskogo kompleksa vostochnogo sklona Aleksandrovskogo megavala (Tomskaya oblast) [Stratigraphy and petroleum potential of the complex of pre-Jurassic carbonate rocks of the eastern slope of the Alexandrovskiy megashalf (Tomsk region)]. *Problemy geologii i osvoeniya neдр. Trudy XVI-II mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh* [Proc. 18th Int. Earth science. Symp. Problems of geology and entrails development]. Tomsk, 2014. Vol. 1, pp. 317–319.
18. Kovalenko S.N. *Geologiya i geokhimiya* [Geology and geochemistry]. Irkutsk, 2010. Available at: <http://kafgeo.igpu.ru/web-text-books/geology/r5-2.htm> (accessed 14 February 2014).
19. Zapivalov N.P., Isaev G.D. Kriterii otsenki neftegazonosnosti paleozoyskikh otlozheniy Zapadnoy Sibiri [Criteria for assessing the petroleum potential of paleozoic deposits of Western Siberia]. *Tomsk state university journal*, 2010, no. 341, pp. 226–232.
20. Isaev G.D., Stolbova N.F., Kiselev Yu.V., Parovinchak M.S., Zapivalov N.L., Kanareykin B.A. Kriterii prognoza neftegazonosnosti paleozoya Zapadno-Sibirskoy plity [Criteria for prediction of oil and gas potential of the Paleozoic of West Siberian Plate]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2001, vol. 304, no. 1, pp. 49–56.

Received: 13 March 2015.

УДК 536.2.08

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СВЕРХТОНКИХ ЖИДКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

Анисимов Максим Васильевич,

канд. техн. наук, доцент кафедры «Охрана труда и окружающей среды»
Томского государственного архитектурно-строительного университета,
Россия, 634003, пл. Соляная, 2. E-mail: teploproekt@list.ru

Рекунов Виталий Сергеевич,

канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение»
Томского государственного архитектурно-строительного университета,
Россия, 634003, пл. Соляная, 2. E-mail: Rekunovvs@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью экспериментальной проверки значений коэффициента теплопроводности сверхтонких жидких композиционных теплоизолирующих покрытий и определения их истинных значений.

Цель работы: проведение обзора существующих методик определения теплопроводности жидких теплоизолирующих покрытий; проведение эксперимента по определению значений коэффициента теплопроводности сверхтонких жидких композиционных покрытий нормативным методом; анализ полученных данных.

Методы исследования: проведение эксперимента по существующей нормативной методике при стационарном тепловом режиме.

Результаты. Экспериментально определены значения коэффициента теплопроводности некоторых сверхтонких жидких композиционных теплоизолирующих покрытий. Выполнен расчет погрешности измерений. В результате проделанной работы был экспериментально определен коэффициент теплопроводности сверхтонких жидких композиционных теплоизолирующих покрытий. Он составил для образца № 1 $\lambda=0,086 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, для образца № 2 $\lambda=0,091 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$. Реальный коэффициент теплопроводности исследуемых образцов оказался выше заявленного. Данное расхождение возможно вследствие того, что производители жидких покрытий при лабораторном определении теплопроводности либо использовали некие «идеальные» условия, либо коэффициент был получен путем теоретического решения задачи теплопроводности в жидких композиционных теплоизолирующих средах. Несмотря на это, подобные жидкие теплоизоляционные покрытия представляют собой большой интерес для строителей, т. к. позволяют утеплять объекты сложной геометрической формы (корпуса задвижек, сложные узлы и т. п.), что в ряде случаев делает их практически незаменимыми. Правильный учет теплотехнических качеств красок позволит избежать сверхнормативных увеличений тепловых потерь изолированных трубопроводов с теплоносителем или строительных ограждающих конструкций, а также защитит их от возможного размораживания в период отрицательных температур.

Ключевые слова:

Эксперимент, коэффициент теплопроводности, теплоизоляция, жидкие сверхтонкие покрытия, тепловая защита.

Анализ проблемы

В настоящее время на строительном рынке имеется широкий выбор различных теплоизоляционных материалов. К уже имеющимся и неплохо себя зарекомендовавшим пенополистирольным, минераловатным утеплителям добавляются все новые и новые материалы, которые фирмы-изготовители предлагают использовать потребителям в различных климатических и строительных условиях [1–3].

Сравнительно недавно некоторые фирмы стали предлагать для утепления фасадов домов, а также инженерных коммуникаций современные сверхтонкие жидкие композиционные теплоизолирующие покрытия (далее теплоизолирующие краски). По мнению самих производителей красок, они обладают исключительными теплоизолирующими качествами (например, коэффициент теплопроводности таких материалов находится на уровне $\lambda=0,001\text{--}0,0015 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$). В качестве сравнительного примера часто приводятся данные о том, что слой такой краски, толщиной от 1 до 3 мм, нанесенный на инженерные трубопроводы, может с успехом заменить изоляцию в несколько сантимен-

тров толщины широко известных минераловатных утеплителей [4, 5].

Как известно, наилучшими теплоизолирующими качествами обладает вакуум (коэффициент теплопроводности равен $\lambda=0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$), а в земных условиях – воздух ($\lambda=0,025 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$). Иными словами, производители подобного рода теплоизолирующих красок «поместили» свою продукцию, по их теплоизоляционным качествам, между вакуумом и воздухом. Подобного рода выводы вызывают некоторые сомнения, т. к. изготовители не приводят теоретического обоснования тепловых эффектов, которые привели бы к такому результату, или они неоднозначны.

В сфере жилищно-коммунального хозяйства применение таких теплоизоляционных материалов может привести к существенной экономии энергоресурсов [6]. Однако теплотехнические свойства представляемых данных теплоизолирующих покрытий до конца еще не изучены. Имеющиеся исследования различных авторов [7–10] по определению коэффициента теплопроводности одних и тех же типов теплоизолирующих красок зачастую показывают существенную разницу.

Следует отметить, что неправильный учет реальных теплоизоляционных качеств строительных материалов может привести к сверхнормативному увеличению тепловых потерь теплоизолированных трубопроводов с теплоносителем или строительных ограждающих конструкций. Кроме того, в ряде случаев это может привести к их возможному размораживанию в период отрицательных температур и прочим проблемам. Последующая замена жидких теплоизоляционных материалов на классические приведет к необоснованному перерасходу материалов, что противоречит ресурсосберегающей политике нашего государства, тем более что указанные теплоизолирующие краски имеют высокую цену.

В связи с этим было принято решение о проведении экспериментального определения коэффициента теплопроводности некоторых образцов теплоизолирующих красок (как одного из основных теплотехнических характеристик таких покрытий) с целью выявить их истинные значения.

Обзор существующих методов определения коэффициентов теплопроводности строительных материалов

На сегодняшний день существуют несколько нормативных методов определения коэффициентов теплопроводности различных строительных материалов [11, 12]. Так, например, в методике [12] используют измерительный комплекс, состоящий:

- из первичного преобразователя, предназначенного для преобразования импульса электрической энергии в тепловую и создания электрического сигнала, характеризующего изменение температуры поверхности материала изделия под воздействием теплового импульса;
- вторичного измерительного прибора для регистрации электрического сигнала;
- импульсного источника тока с таймером теплового импульса, обеспечивающего нагрев пластины первичного преобразователя.

В качестве вторичного измерительного прибора применяют вольтметр чувствительностью не ниже $1 \cdot 10^{-6}$ В с цифропечатающим автономным или встроенным устройством и таймером опроса датчика, задающим интервалы регистрации.

При проведении испытаний изделий толщиной менее 15 мм теплопроводность исследуемого материала для одного измерения вычисляют по формулам, представленным в [12].

Для измерения эффективной теплопроводности и термического сопротивления по методике [11] при стационарном тепловом режиме применяют приборы, собранные по асимметричной схеме, оснащенные одним тепломером, который расположен между испытываемым образцом и холодной плитой прибора или между образцом и горячей плитой прибора.

Относительная погрешность определения эффективной теплопроводности и термического со-

противления по методу [12] не превышает $\pm 3\%$, если испытание проведено в полном соответствии с требованиями стандарта.

Эффективную теплопроводность материала образца λ_{effu} вычисляют по формуле (1) [12]

$$\lambda_{effu} = \frac{d_u}{\frac{\Delta T_u}{q_u} - 2R_L}, \quad (1)$$

где d_u – толщина образца в процессе испытания, м; ΔT_u – разность температур лицевых граней испытываемого образца, °С; q_u – плотность стационарного теплового потока, проходящего через испытываемый образец, Вт/м²; R_L – термическое сопротивление листового материала, из которого изготовлены дно и крышка ящика для образца насыпного материала, (м²·°С)/Вт.

При проведении обзора методик определения коэффициентов теплопроводности материалов следует отметить работу таких авторов как Ю.Ю. Головач (ФГУП НИИ «Сантехники»), А.В. Швецов (Capstone Manufacturing), Ю.Ф. Колхир (ЗАО «Предприятие Итиль»)) [8]. Данный способ определения коэффициента теплопроводности сверхтонких жидких теплоизоляционных покрытий λ_u с использованием устройства, включающего сосуд из нержавеющей стали, наполненный водой, нагреваемой до температуры кипения, к которому прикрепляются три камеры из пенопласта соответствующих размеров, разделенные металлическими пластинами. Между первой и второй камерами стоит пластина с нанесенным на нее сверхтонким жидким теплоизоляционным покрытием. Данный способ [8] определяет коэффициент теплопроводности изоляции при строго определенных внешних условиях, чего достигнуть не всегда возможно.

Известен способ определения коэффициента теплопроводности с помощью «вспомогательной стенки» [13], включающей два слоя материала, размещаемые на источнике тепла, один из которых с известным коэффициентом теплопроводности, у второго определяются коэффициент теплопроводности по формуле (2)

$$\lambda_2 = \delta_2 \frac{\lambda_1 t_T - t_1}{\delta_1 t_1 - t_2}, \quad (2)$$

где δ_1 и λ_1 – толщина и коэффициент теплопроводности материала с известным коэффициентом теплопроводности; t_T – температура источника тепла; t_1 – температура между слоями стенки; t_2 – температура наружной поверхности второго слоя; δ_2 – толщина слоя, коэффициент теплопроводности которого определяется. Этот слой может быть теплоизоляцией [13].

По указанному способу можно определить коэффициент теплопроводности традиционных теплоизоляторов. Способ основан на равенстве удельных тепловых потоков, применять его при определении коэффициента теплопроводности сверхтонких жидких теплоизоляционных покры-

тий возможно при известной теплопроводности одного из слоев, что не всегда возможно.

Также существует запатентованный метод определения коэффициента теплопроводности сверхтонких жидких теплоизоляционных покрытий [14]. Суть метода заключается в использовании многослойной плоскопараллельной стенки, состоящей из двух слоев материала, установленных на источник тепла, измерении температуры источника тепла, температур между двумя слоями материала и наружной поверхности, в определении λ_u по расчетной формуле (3).

Согласно изобретению, температуру неизолированной наружной поверхности верхнего слоя t_u вычисляют как разность удвоенной температуры между слоями материала и температуры источника тепла по равенству: $t_u=2t-t_s$. Затем закрепляют на наружной поверхности верхнего слоя материала тонкую металлическую пластину с нанесенным на нее сверхтонким жидким теплоизоляционным покрытием, измеряют температуру в контактной поверхности верхнего слоя материала и металлической пластины с теплоизоляцией t_u и определяют коэффициент теплопроводности сверхтонкого жидкого теплоизоляционного покрытия λ_u по формуле:

$$\lambda_u = \delta_u \frac{\lambda}{\delta} \left(1 - \frac{t_s}{t_u} \right), \quad (3)$$

где λ_u – коэффициент теплопроводности сверхтонкого теплоизоляционного покрытия; δ_u – толщина сверхтонкого теплоизоляционного покрытия; δ – толщина слоя материала; λ – коэффициент теплопроводности материала; t_u – температура неизолированной наружной поверхности верхнего слоя; t_s – температура в контактной поверхности верхнего слоя материала и металлической пластины с теплоизоляцией.

Анализ условий применимости существующих методов показал, что нормативный метод [11] разработан для измерения коэффициента теплопроводности в основном сыпучих материалов, что не отвечает начальным требованиям. Метод [8] весьма требователен к точности поддержания температурных условий. Метод [14] разработан для области $\lambda=0,01-0,009$ Вт/(м·°С), что не отвечает требованиям к диапазону измерений.

Кроме работ российских ученых в области определения коэффициента теплопроводности теплоизолирующих красок был проанализирован аналогичный опыт зарубежных специалистов в решении схожих задач [15–20].

В соответствии с проведенным анализом существующих методик, было принято решение об использовании для экспериментального определения коэффициента теплопроводности некоторых образцов теплоизолирующих красок нормативного метода [12] с заменой тепломера на слой материала с известной теплопроводностью. Такая замена является корректной и не противоречит теории ис-

следования тепловых процессов [13]. Метод [12] отвечает всем требованиям к проведению эксперимента (стандарт не распространяется на материалы и изделия с теплопроводностью более 1,5 Вт/(м·°С) и относительная погрешность определения эффективной теплопроводности и термического сопротивления по методу [12] не превышает $\pm 3\%$).

Описание проведения эксперимента

Для проведения эксперимента авторами был рассмотрен перечень наиболее известных фирм-производителей жидких теплоизолирующих покрытий.

На строительном рынке России можно встретить достаточно большое количество жидких теплоизоляционных покрытий (например, mascoat, tsmceramic, thermalcoat, Изоллат, Астратек, Альфатек, Теплокотт, Корунд и т. п.).

Для исследований были выбраны два образца из вышеперечисленных марок жидких утеплителей, которые получили наименование «Образец» (далее Образец № 1 и Образец № 2). Некоторые характеристики образцов приведены в табл. 1. Производители теплоизоляционных красок зачастую не предоставляют полную информацию о физико-химическом составе производимых ими теплоизолирующих покрытий, поэтому состав теплоизолирующих красок исследуемых образцов был получен с официальных сайтов заводов-изготовителей. В состав красок входят: микросферы стеклокерамические, связующие, диспергаторы, наполнители, пигменты, разбавители. Как правило, поставщики не приводят процентного соотношения ингредиентов.

Таблица 1. Некоторые заявленные характеристики экспериментальных образцов

Table 1. Specifications of the experimental samples

Наименование характеристики Characteristic	Ед. измерения Unit	Образец Sample	
		№ 1	№ 2
Цвет покрытия Coat color		Белый White	
Теплопроводность Heat conductivity	Вт/(м·°С) W/(m·°C)	0,0011	0,002–0,007
Плотность Density	кг/м³/kg/m³	390	280
Паропроницаемость Vapor permeability	мг/(м·ч·Па) mg/(m·h·Pa)	0,012	
Водопроницаемость Water conductivity	кг/(ч·м·0,1 атм) kg/(h·m·0,1 atm)	менее 30 less than 30	
Тепловсприятие Heat absorption	Вт/м·°С W/m·°C	1,78	
Теплоотдача Heat transfer		1,58	
Блеск покрытия Coating shine	%	7,4	7,1

Для проведения эксперимента был разработан измерительный комплекс, который включал в себя:

1. Устройство для тестирования образцов (рис. 1).
2. Прибор марки «Терем-4.0» для измерения показаний от термопар.
3. Термопары «хромель-копелевые», изготовленные из проводов толщиной $\delta=0,2$ мм.
4. Пластина из материала с известным коэффициентом теплопроводности (оргстекло, толщина $\delta=3,2$ мм, $\lambda=0,19$ Вт/(м·°C)), которая являлась заменой тепломеру.

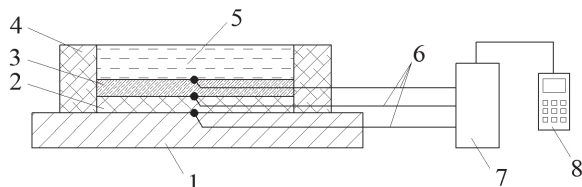


Рис. 1. Принципиальная схема измерительного комплекса: 1 – источник стационарного теплового потока; 2 – слой материала с известной толщиной и коэффициентом теплопроводности (оргстекло); 3 – слой теплоизолирующей краски; 4 – теплоизолятор (пенопласт); 5 – «холодильник» (емкость с водой); 6 – термопары между слоями; 7 – коммутатор; 8 – прибор измерения «Терем-4.0»

Fig. 1. Diagram of the measuring system: 1 is the source of continuous heat flux; 2 is the layer of the material with known thickness and heat conductivity coefficient (plexiglass); 3 is the layer of heat insulating paint; 4 is the heat insulator (foam plastics); 5 is the «refrigerator» (container with water); 6 are the thermocouples between the layers; 7 is the switching device; 8 is the measuring device «Terem-4.0»

Краска слоя № 3 (рис. 1) наносилась равномерно на медную пластину, толщиной 0,5 мм. Сопротивление теплопередаче медной пластины учитывалось при расчете по формуле (1) как составляющая R_L .

Удельный тепловой поток q_u , Вт/м², в зависимости (1) определялся по формуле:

$$q_u = \frac{\lambda_{\text{слой 2}} (t_1 - t_2)}{\delta_{\text{слой 2}}},$$

где $\lambda_{\text{слой 2}}$, $\delta_{\text{слой 2}}$ – коэффициент теплопроводности и толщина слоя оргстекла (рис. 1); t_1 , t_2 – температуры на границах «источник теплоты – слой оргстекла» и «слой оргстекла – испытуемый образец», соответственно (рис. 1).

Теплопроводность медной пластины, толщиной $\delta=0,5$ мм, равна $\lambda=384$ Вт/(м·°C). Температура воздуха в помещении при проведении эксперимента была равна $t_a=24$ °C, относительная влажность воздуха $\varphi=40$ %.

Для стабилизации показаний прибора в процессе его «прогрева» и перевода теплового потока в стационарный режим (выравнивания тепловых потоков) были проведены контрольные замеры динамики показаний прибора по 3-м датчикам термопар в течение 0,5 часа с шагом проведения измерения 5 мин (рис. 2).

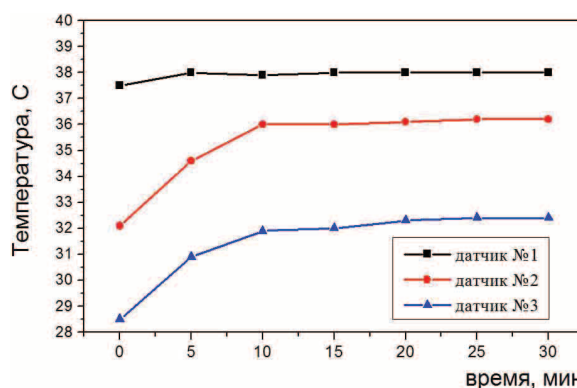


Рис. 2. Показания прибора по данным от 3-х датчиков термопар по времени

Fig. 2. Readings of the unit according to the data of three thermocouple detectors by time

Из представленного графика видно, что показания прибора выходили на стационарный уровень через 20 мин после начала его работы, что было учтено при проведении экспериментов.

Для вычисления индивидуальной погрешности датчиков термопар перед началом экспериментов были проведены замеры температур для каждого датчика, погруженного в сосуд «Дьюара», наполненного талым снегом. Полученные отклонения температур от температуры 0 °C были учтены при проведении экспериментов.

Для проверки адекватности разработанного устройства измерения теплопроводности теплоизолирующих красок вначале были произведены поверочные работы. Вместо слоя № 3 (рис. 1) в устройство была помещена пластина из оргстекла, аналогичная по габаритам, толщине и теплопроводности пластине в слое № 2. Были проведены поверочные измерения. По результатам этих измерений было получено, что теплопроводность тестируемой пластины из оргстекла составила $\lambda=0,186$ Вт/(м·°C).

Погрешность метода измерения теплопроводности составляет

$$\Delta = \frac{0,19 - 0,186}{0,19} 100 \% = 2,1 \%$$

Полученные данные свидетельствуют, что погрешность по данному методу не превышает погрешности, заявленной в ГОСТ [12] (± 3 %), что говорит о корректности выбранной схемы исследования.

Анализ результатов эксперимента

Для анализа динамики изменения коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры образцов краски «Образец № 1» и «Образец № 2» тестировались в разных температурных режимах при различном тепловом потоке [21]. Исходные данные эксперимента приведены в табл. 2. Полученные результаты представлены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, средняя величина коэффициента теплопроводности с увеличением температуры образца краски также увеличивается. Данное наблюдение удовлетворительно согласуется с аналогичными результатами, представленными в [10].

Таблица 2. Исходные данные к проведению эксперимента

Table 2. Initial conditions before the experiment

Исходные данные Initial conditions	Образец Sample	
	№ 1	№ 2
Влажностное состояние образцов Sample humidity condition	Сухой dry	
Толщина краски (мм) Paint thickness (mm)	5,35	5,15
Толщина медной пластины (мм) Coper plate thickness (mm)	0,5	
Температура воздуха в помещении (°C) Air temperature indoors (°C)	23–24	
Относительная влажность воздуха в помещении (%) Relative air humidity indoors (%)	38–42	
Теплопроводность меди ($\rho_{\text{мед}}=8500 \text{ кг/м}^3$) (Вт/м·°C) Coper thermal conductivity ($\rho_{\text{coper}}=8500 \text{ kg/m}^3$) (W/m·°C)	384	

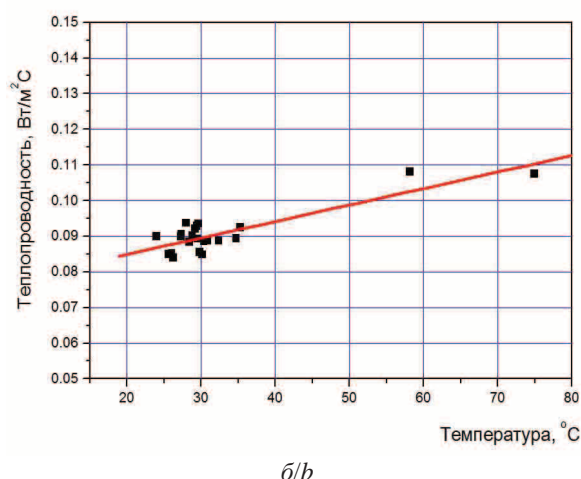
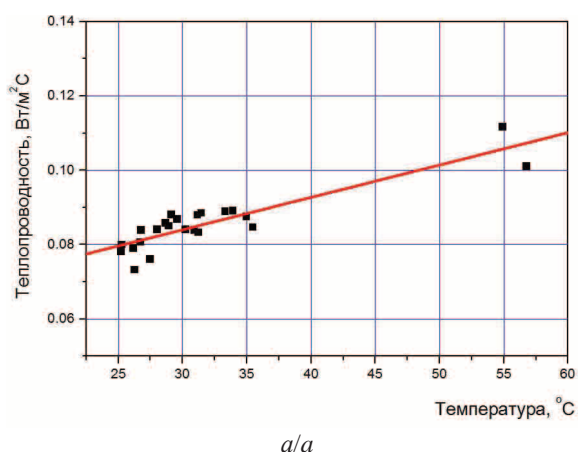


Рис. 3. Результаты эксперимента по определению теплопроводности образцов краски: а) Образец № 1; б) Образец № 2

Fig. 3. Experimental results on determination of paint sample thermal conductivity: a) sample № 1; b) sample № 2

Как показал эксперимент, у образца № 1 средний коэффициент теплопроводности составил $\lambda=0,086 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, у образца № 2 – $\lambda=0,091 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$.

Расчет погрешности измерений проводился по зависимостям (4)–(6) [22]

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n}, \quad (4)$$

где A – измеряемая величина; \bar{A} – среднее значение измеряемой величины; $\Delta\bar{A}$ – абсолютная погрешность среднего значения измеряемой величины, определяемая по формуле:

$$\Delta\bar{A} = t_{y,n-1} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}{n-1}}, \quad (5)$$

где $t_{y,n-1}$ – коэффициент Стьюдента (при $t_{95\%,23}=2,074$).

Относительная погрешность среднего значения измеряемой величины рассчитывается по зависимости [20]

$$\varepsilon = \frac{\Delta\bar{A}}{\bar{A}}. \quad (6)$$

Погрешность измерения составила $\varepsilon=1,85 \%$.

Итоговая погрешность определения теплопроводности с учетом погрешности метода исследования (3 %) и погрешности прибора (1 %) составила 5,85 %.

Заключение

В результате проделанной работы был экспериментально определен коэффициент теплопроводности сверхтонких жидких композиционных теплоизолирующих покрытий. Он составил для «Образца № 1» $\lambda=0,086 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, для «Образца № 2» – $\lambda=0,091 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$.

Бесспорно, данные жидкие покрытия можно отнести к утеплителям. По своим теплотехническим характеристикам они не уступают, например, минеральной вате ($\lambda=0,07 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$) или пеностеклу ($\lambda=0,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$). Тем не менее, их реальный коэффициент теплопроводности оказался выше заявленного. Данное расхождение возможно вследствие того, что производители жидких покрытий при лабораторном определении теплопроводности либо использовали некие «идеальные» условия, либо коэффициент был получен путем теоретического решения задачи теплопроводности в жидких композиционных теплоизолирующих средах.

Несмотря на это, подобные жидкие теплоизоляционные покрытия представляют собой большой интерес для строителей, т. к. позволяют утеплять объекты сложной геометрической формы (корпуса задвижек, сложные узлы и т. п.), что в ряде случаев делает их практически незаменимыми.

Правильный учет теплотехнических характеристик красок позволит избежать сверхнормативного увеличения тепловых потерь изолированных

трубопроводов с теплоносителем или строительных ограждающих конструкций, а также защитит их от возможного размораживания в период отрицательных температур.

Данное исследование не претендует на роль «окончательного» и скорее направлено

на предпосылки к дальнейшему изучению теплоизоляционных свойств современных жидких композиционных теплоизолирующих покрытий, т. к. их теплофизические свойства на сегодняшний день еще недостаточно изучены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изолонпенполиэтилен. Физические свойства // Сайт компании ООО «Изолон-Трейд». 2015. URL: isolon-trade.ru (дата обращения: 30.05.2014).
2. Теплоизоляционные материалы торговой марки «ТЕРМОСИЛАТ» // Сайт компании «Термохаус». URL: <http://thermo-house.ru> (дата обращения: 29.05.2014).
3. Теплоизоляционные материалы Elastopor® Н. Пенополиуретановая изоляция труб // Сайт химической компании BASF. URL: basf.ru (дата обращения: 30.05.2014).
4. Домбровский Л.А. Моделирование теплового излучения полимерного покрытия, содержащего полые микросферы // Теплофизика высоких температур. – 2005. – Т. 43. – № 1. – С. 1–11.
5. Герман М.Л., Гринчук П.С. Математическая модель расчета теплозащитных свойств композиционного покрытия «керамические микросферы – связующее» // Инженерно-физический журнал. – 2002. – Т. 75. – № 6. – С. 43–53.
6. Комков В.А., Тимахова Н.С. Энергосбережение в жилищно-коммунальном хозяйстве. – М.: Инфра-М, 2010. – 320 с.
7. Ширинян В.Т. Поход жидко-керамического «супертеплоизоляционного» покрытия по тепловым сетям России // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 9. – С. 46–51.
8. Метод постановки опыта и расчета коэффициента теплопроводности для сверхтонких тепловых изоляционных материалов / Ю.Ю. Головач, А.В. Швецов, Ю.Ф. Колхир и др. Казань, 2008. URL: <http://inn-t.com/teploprovodnost/index.html> (дата обращения: 30.05.2014).
9. Экспериментальное определение коэффициентов теплопроводности и эффективности сверхтонких теплоизоляционных покрытий / И.О. Манешев, Ю.И. Правник, Р.А. Садыков, И.А. Сафин, С.А. Еремин // Известия КазГАСУ. – 2013. – № 1 (23). – С. 135–142.
10. Логинова Н.А. Определение эффективности тонкопленочных теплоизоляционных покрытий применительно к системам теплоснабжения: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2010. – 133 с.
11. ГОСТ 30290–94. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности поверхностным преобразователем. – Введ. 01.01.1996. – М.: Госстрой России, 1996. – 12 с.
12. ГОСТ 7076–99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. – Введ. 01.04.2000. – М.: Госстрой России, 2000. – 20 с.
13. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Высш. школа, 1973. – 309 с.
14. Способ определения коэффициента теплопроводности сверхтонких жидких теплоизоляционных покрытий: пат. РФ № 2478936, МПК G01N25/18, G01N25/20; заявл. 07.11.2011, опубл. 10.04.2013. – 5 с.
15. Thermal conductivity measurement of liquids in a microfluidic device / D. Kuvshinov, M.R. Bown, J.M. MacInnes, R.W.K. Allen, R. Ge, L. Aldous, C. Hardacre, N. Doy, M.I. Newton, G. McHale // Microfluid Nanofluid. – 2011. – V. 256. – P. 123–132.
16. Gustavson M., Nagai H., Okutani T. Thermal effusivity measurements of insulating liquids using microsized hot strip probes / Rev. Sci. Instrum. – 2003. – V. 5018. – № X. – P. 4542–4548.
17. Hammerschmidt U. A quasi-steady state technique to measure the thermal conductivity // Int. J. Thermophys. – 2003. – V. 355. – P. 291–312.
18. Kuntner J., Kohl F., Jakoby B. Simultaneous thermal conductivity and diffusivity sensing in liquids using a micromachined device // Sens Actuators. – 2006. – V. 128. – P. 62–67.
19. Short hot wire technique for measuring thermal conductivity and thermal diffusivity of various materials / H. Xie, H. Gu, M. Fujii, X. Zhang // Meas. Sci. Technol. – 2006. – V. 312. – P. 208–214.
20. An improved hotprobe for measuring thermal conductivity of liquids // Zhang H., Zhao G., Ye H., Ge X., Cheng S. // Meas. Sci. Technol. – 2005. – V. 535. – P. 430–435.
21. Мусин И.А. Планирование эксперимента при моделировании погрешности измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 138 с.
22. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента: справочное руководство. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

Поступила 27.02.2015 г.

UDC 536.2.08

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT OF SUPERTHIN LIQUID COMPOSITE THERMAL INSULATION COATINGS

Maksim V. Anisimov,

Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya square,
Tomsk, 634003, Russia. E-mail: teploproekt@list.ru

Vitaly S. Rekunov,

Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya square,
Tomsk, 634003, Russia. E-mail: Rekunovvs@mail.ru

The relevance of the research is caused by the necessity of experimental check of the values of thermal conductivity coefficient of superthin liquid composite thermal insulation coatings and determination of their true values.

The aim of the work is to carry out the experiment to determine the values of thermal conductivity coefficient of superthin liquid composite thermal insulation coatings by standard method and to analyze the obtained data.

Methods of research: the experiment using the existing standard technique at a stationary thermal regime.

Results. The authors have determined the values of thermal conductivity coefficient of some superthin liquid composite heat insulating coverings and calculated the measurement error. The thermal conductivity coefficient of superthin liquid composite heat insulating coverings was experimentally defined. It amounts $\lambda=0,086$ Wt/m²°C for sample № 1, and $\lambda=0,091$ Wt/m²°C for sample № 2. The real thermal conductivity coefficient of the investigated samples was higher than the declared one. The given discrepancy is possible due to the fact that the manufacturers of liquid coverings at laboratory definition of heat conductivity used certain «ideal» conditions or the coefficient was received by the theoretical decision of a problem of heat conductivity in liquid composite heat insulating media. In spite of this fact the similar liquid heat insulating coverings are of great interest for builders, since they allow insulating objects with the complex geometrical form (valves, complex assemblies, etc.) that makes them almost irreplaceable in some cases. The correct account of thermotechnical qualities of paints allows avoiding supernormative increase in thermal losses of isolated pipelines with the heat-carrier or building envelopes, and it will also protect them from possible thawing at subzero temperatures.

Key words:

Experiment, coefficient of heat conductivity, heat insulation, superthin liquid coatings, thermal shielding.

REFERENCES

1. Izolonpenopoliatilen. Fizicheskie svoystva [Izolonpenopoliatilen. Physical properties]. *Izolon-Treid*. 2015. Available at: izolon-trade.ru (accessed 30 May 2014).
2. Teploizolyatsionnye materialy torgovoi marky «TERMOSILAT» [Insulation materials brand «TERMOSILAT»]. *Termokhays*. Available at: http://thermohouse.ru (accessed 29 May 2014).
3. Teploizolyatsionnye materialy Elastopor® H. Penopolietanovaya izolyatsiya trub [Thermal insulation materials Elastopor® H. Polyurethane foam pipe insulation]. *BASF*. 2014. Available at: basf.ru (accessed 30 May 2014).
4. Dombrovsky L.A. Modelirovaniye teplovogo izlucheniya polimernogo pokrytiya soderzhashchego polye microsferi [Modeling of thermal radiation of polymeric coating containing hollow microspheres]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2005, vol. 43, no. 1, pp. 1–11.
5. German M.L. Matematicheskaya model rascheta teplozashchitnykh svoystv kompozitsionnogo pokrytiya «keramicheskie microsferi – svyazuyushchee» [Mathematical model of calculating thermal properties of composite coating «ceramic microspheres – binder»]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2002, vol. 75, no. 6, pp. 43–53.
6. Komkov V.A., Timakhova N.S. *Energoberezheniye v zhilishchno-kommunalnom khozyaystve* [Energy saving in housing and communal services]. Moscow, Infa-M Publ., 2010. 320 p.
7. Shirinian V.T. Pokhod zhidko-keramicheskogo «syperteploizolyatsionnogo» pokrytiya po teplovyim setiam Rossii [Hike liquid ceramic «superteploizolyatsionnogo» coverage for Russian heat networks]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2007, no. 9, pp. 46–51.
8. Golovach Yu.Yu., Shvetsov A.V., Kolkhir Yu.F. *Metod postanovki opyta i rascheta koeffitsienta teploprovodnosti dlya sverkh-tonkikh teplovykh izolyatsionnykh materialov* [The method of the experiment and the calculation of the thermal conductivity for ultra-thin thermal insulation materials]. Kazan. 2008. Available at: http://inn-t.com/teploprovodnost/index.html (accessed 30 May 2014).
9. Maneshev I.O., Pravnik Hu.I., Sadykov R.A., Safin I.A., Eremin S.A. Eksperimentalnoye opredeleniye koeffitsientov teploprovodnosti i effektivnosti sverkh-tonkikh teploizolyatsionnykh pokryty [Experimental determination of thermal conductivity coefficients and efficiency of ultrathin thermal insulation coatings]. *Izvestia KazGASY*, 2013, no. 1 (23), pp. 135–142.
10. Loginova N.A. *Opredeleniye effektivnosti tonkoplenochnykh teploizolyatsionnykh pokryty primenitelno k sistemam teplosnabzheniya*. Dis. Kand. nauk [Efficiency of thin-film thermal insulation coatings in centralized heat supply systems. Cand. Diss.]. Moscow, 2010. 133 p.
11. *GOST 30290–94. Materialy i izdeliya stroitelnye. Metod opredeleniya teploprovodnosti poverkhnostnykh preobrazovatelem. Zdaniya zhilye i obshchestvennye. Parametry mikroklimata v pomeshcheniyakh* [State Standard 30290–94. Building materials and products. The method of determining the thermal conductivity of the surface transducer]. Moscow, 1996. 12 p.
12. *GOST 7076–99. Materialy i izdeliya stroitelnye. Metod opredeleniya teploprovodnosti i termicheskogo soprotivleniya pri stacionarnom teplovom rezhime* [State Standard 7076–99. Building materials and products. Method for determination of thermal conductivity and thermal resistance under steady-state thermal conditions]. Moscow, 2000. 20 p.
13. Mikheev M.A. *Osnovy teploperedachi* [Bases of thermal conductivity]. Moscow, Visshaya shkola publ., 1973. 309 p.
14. Pravnik Yu.I., Sadykov R.A., Ivanova R.V. *Sposob opredeleniya koeffitsienta teploprovodnosti sverkh-tonkikh zhidkikh teploizolyatsionnykh pokryty* [A method for determining the thermal conductivity of ultrathin liquid insulation coating]. Patent RF, no. 2478936, 2013.

15. Kuvshinov D., Bown M.R., MacInnes J.M., Allen R.W.K., Ge R., Aldous L., Hardacre C., Doy N., Newton M.I., McHale G. Thermal conductivity measurement of liquids in a microfluidic device. *Microfluid Nanofluid*, 2011, vol. 256, pp. 123–132.
16. Gustavson M., Nagai H., Okutani T. Thermal effusivity measurements of insulating liquids using microsized hot strip probes. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, no. X, vol. 5018, pp. 4542–4548.
17. Hammerschmidt U. A quasi-steady state technique to measure the thermal conductivity. *Int. J. Thermophys.*, 2003, vol. 355, pp. 291–312.
18. Kuntner J., Kohl F., Jakoby B. Simultaneous thermal conductivity and diffusivity sensing in liquids using a micromachined device. *Sens Actuators*, 2006, vol. 128, pp. 62–67.
19. Xie H., Gu H., Fujii M., Zhang X. Short hot wire technique for measuring thermal conductivity and thermal diffusivity of various materials. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, vol. 312, pp. 208–214.
20. Zhang H., Zhao G., Ye H., Ge X., Cheng S. An improved hotprobe for measuring thermal conductivity of liquids. *Meas. Sci. Technol.*, 2005, vol. 535, pp. 430–435.
21. Musin I.A. *Planirovanie eksperimenta pri modelirovanii pogreschosti izmereniy* [Planning experiments when modeling measurement uncertainty]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1989. 138 p.
22. Rumshinskiy L.Z. *Matematicheskaya obrabotka rezultatov eksperimenta* [Experiment results mathematic processing]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 192 p.

Received: 27 February 2015.

УДК 552+553.98

ЛИТОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОЛЛЕКТОРОВ В ПАЛЕОЗОЙСКОМ РАЗРЕЗЕ ЛЕДЯНСКОГО ПОДНЯТИЯ (СЕВЕРО-ТУНГУССКАЯ НЕФТЕГАЗОНОСНАЯ ОБЛАСТЬ)

Вараксина Ирина Валерьевна,

канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотр. лаборатории седиментологии
Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090,
г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3. E-mail: VaraksinaIV@ipgg.sbras.ru

Тумашов Игорь Викторович,

канд. геол.-минерал. наук, мл. науч. сотр. лаборатории седиментологии
Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090,
г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3. E-mail: TumashovIV@gmail.com

Актуальность исследований определяется тем, что в настоящее время одним из наиболее перспективных направлений расширения минерально-сырьевой базы России является поиск залежей нефти и газа в арктических районах. Поскольку изученность бурением этих территорий крайне низкая, для более успешного проведения поисково-разведочных работ необходимо более детальное исследование вскрытых ранее разрезов.

Цель исследований: определить степень влияния седиментационных и постседиментационных факторов на формирование пустотного пространства различных типов пород и установить уровни потенциальных коллекторов в палеозойском разрезе Ледянского поднятия.

Объект исследований: отложения палеозоя, вскрытые скважинами Ледянского района, расположенного на северной окраине Северо-Тунгусской нефтегазоносной области.

Методы исследований: построение разрезов палеозойских отложений на основе детального описания керна, результатов ГИС и палеонтологических исследований; петрографическое изучение основных типов пород, участвующих в строении разреза; генетический анализ различных типов пород и выяснение условий их седиментации; изучение пустотного пространства пород в керне и шлифах; установление взаимосвязи между литологическими особенностями палеозойских пород и их коллекторскими свойствами.

Результаты исследований. Выявлены состав, строение и обстановки осадконакопления палеозойских отложений, вскрытых в пределах Ледянского куполовидного поднятия на севере Тунгусской синеклизы; рассмотрено влияние седиментационных и постседиментационных факторов на формирование коллекторов; установлено, что наиболее высокие показатели пористости и проницаемости наблюдаются в рифогенных карбонатных породах силура, где наиболее интенсивно прошли постседиментационные процессы выщелачивания, а также в песчаных горизонтах ордовика и карбона, обладающих хорошей первичной пористостью.

Ключевые слова:

Литология, Северо-Тунгусская нефтегазоносная область, Ледянское поднятие, палеозойские отложения.

Введение

Освоение арктических районов на сегодняшний день является одной из приоритетных задач в нефтегазовой геологии. К сожалению, геолого-геофизическая изученность этих территорий крайне низкая. В связи с этим становится все более актуальным детальное литологическое изучение основных опорных разрезов, пробуренных здесь ранее. Проведенное в 80–90-х гг. бурение скважин в пределах Ледянской площади имело большое значение для уточнения представлений о строении и нефтегазоносности всей Северо-Тунгусской нефтегазоносной области. В скважинах были получены прямые и косвенные признаки продуктивности палеозойских отложений [1–6]. При испытании в скв. Ледянская № 358 в известняках рифея, а также в кавернозных доломитах нижнего кембрия и силура были установлены водоносные горизонты. В скв. Ледянская № 2 и 3 в отложениях среднего ордовика, нижнего и верхнего силура по керну выявлена темно-коричневая нефть, черная мальта и

многочисленные примазки битума. Эти данные в совокупности с характерными для всего района большим объемом осадочных отложений, сочетанием глубокопогруженных крупных отрицательных структур платформенного чехла и смежных куполовидных поднятий, подобно Ледянскому, а также наличием многочисленных полей природных битумов позволяют рассматривать исследуемый район в качестве одного из наиболее перспективных для расширения минерально-сырьевой базы России.

Общая геологическая характеристика района исследования

Пробуренные скважины Ледянская № 2, 3 (скв. Л-2, скв. Л-3) и 358 (скв. Л-358) расположены на одноименном куполовидном поднятии в пределах Путоранского выступа (рис. 1) [7]. Здесь осадочный чехол, по геофизическим данным, имеет мощность около 8 км и сложен образованиями широкого стратиграфического диапазона. Структур-

но-колонковые скважины Ледянская № 2 и 3 вскрыли отложения от четвертичной системы до ордовика, а самая северная параметрическая скважина Ледянская № 358 дошла до рифея [2, 3].

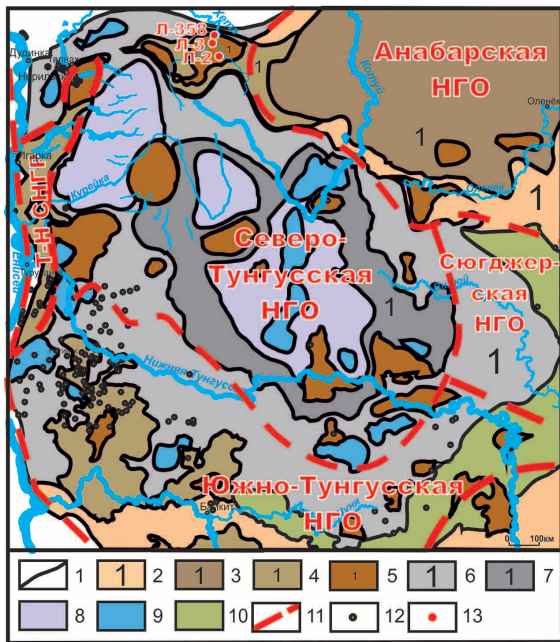


Рис. 1. Фрагмент тектонической карты венд-нижнепалеозойского структурного яруса Сибирской платформы [7] с дополнениями: 1 – границы тектонических элементов; 2–5 – положительные структуры: 2 – надпорядковые (1 – Анабарская антеклиза), 3 – 0 порядка (1 – Анабарский мегасвод), 4 – I порядка (1 – Путоранский выступ), 5 – II порядка (1 – Ледянское куполовидное поднятие); 6–9 – отрицательные структуры: 6 – надпорядковые (1 – Курейская синеклиза), 7 – 0 порядка (1 – Туринская мегавпадина), 8 – I порядка, 9 – II порядка; 10 – Мархино-Чуньская мегамоноклиналь; 11 – границы нефтегазоносных областей; 12 – скважины, пробуренные на обозначенной территории; 13 – скважины, пробуренные на Ледянском поднятии; НГО – нефтегазоносные области, Т-Н СНГР – Туруханско-Норильский самостоятельный нефтегазоносный район

Fig. 1. Fragment of a tectonic map of the Vendian–Lower Paleozoic structural stage of the Siberian platform [7] with additions: 1 – the boundaries of tectonic elements; 2–5 – positive structures: 2 – superordinate (1 – Anabar antecline), 3 – 0 order (1 – Anabar mega arch), 4 – I order (1 – Putorana ledge), 5 – II order (1 – Ledyansk uplift); 6–9 – negative structures: 6 – superordinate (1 – Kureika synecline), 7 – 0 order (1 – Turin megasynecline), 8 – I order, 9 – II order; 10 – Marhino-Chunya megamonoklinal; 11 – the boundaries of oil and gas fields; 12 – wells drilled in this territory; 13 – wells drilled on the Ledyansk uplift; НГО – oil-and-gas area, Т-Н СНГР – Turukhano-Norilsk oil and gas bearing region

В работе представлены результаты проведенного авторами исследования отложений среднего и верхнего палеозоя скважин Ледянская № 2 и 3, а также приведена информация по скв. Ледянская № 358. Литолого-стратиграфическое расчленение рассматриваемых разрезов проводилось сотрудниками ИНГ СО РАН И.В. Вараксиной, Ю.И. Тесаковым, Н.Г. Изох, О.Т. Обут и др. (рис. 2).

Отложения ордовика, согласно схеме стратиграфического районирования, относятся к Маймечинской структурно-фациальной зоне или Ледянскому стратиграфическому району [8, 9]. Здесь выделяются (снизу-вверх) следующие свиты: бысыуряхская и устькуранахская (нижняя часть) нижнего ордовика, устькуранахская (верхняя часть), кунтыкахинская и мойеронская свиты среднего ордовика [9]. Существует и другое мнение по поводу разбивок ордовикских отложений. Ю.И. Тесаковым была выделена мегунская свита по материалам Т.А. Дивиной в 1995 г., которая первоначально описала её как кунтыкахинскую свиту, простирающуюся из Маймечинского стратиграфического района [1, 8].

Силурийские отложения, вскрытые скважинами, относятся к Ледянскому фациальному району и залегают со стратиграфическим перерывом [10, 11]. Здесь выделено пять свит: оранская, хукэлченская, мунильская, неракачинская и кираская [10]. Стратотипом для всех подразделений является скв. Ледянская № 3. Однако существует другая точка зрения на расчленение данного разреза. Согласно схеме, разработанной сотрудниками СНИИГГиМС, силурийские отложения относятся к Ледянской ЛФЗ Мойеронского района и охарактеризованы: мойероканской, хаастырской, агидыйской, хакомской, янгадинской и холоханской свитами. Стратотипом для всех стратиграфических подразделений является разрез Ледянской скв. 358 [5].

Отложения девона в Ледянском структурно-фациальном районе согласно перекрывают породы силура [12]. В основании фиксируется глинисто-карбонатная толща нижнедевонского возраста, которая подразделяется на три свиты: икоканскую, намаканскую, кольдинскую [13]. Средний девон с размывом залегают на кольдинской свите и представлен сидинской и юктинской свитами. К верхнему девону относятся накохозкая и каларгонская свиты.

Каменноугольные отложения в исследуемом районе повсеместно залегают на девоне с размывом. На Ледянской площади они представлены ханарской свитой среднего-верхнего карбона [12]. Верхи карбона размыты, причем глубина размыва в Ледянских скважинах сильно варьирует.

Пермские отложения в кровле также размыты, а в южной части поднятия полностью отсутствуют.

Строение и состав палеозойского разреза

Ордовик, вскрытый в основании разреза изученных скважин, представлен двумя свитами среднего отдела. *Кунтыкахинская* (*kk*) свита в нижней части сложена переслаиванием пестроцветных, в разной степени карбонатизированных и сульфатизированных аргиллитов, алевролитов и полевошпатово-литокластито-кварцевых песчаников, а в верхней части – красноцветными сильно ангидритизированными известково-доломитистыми аргиллитами. *Мойеронская* (*mr*) свита также

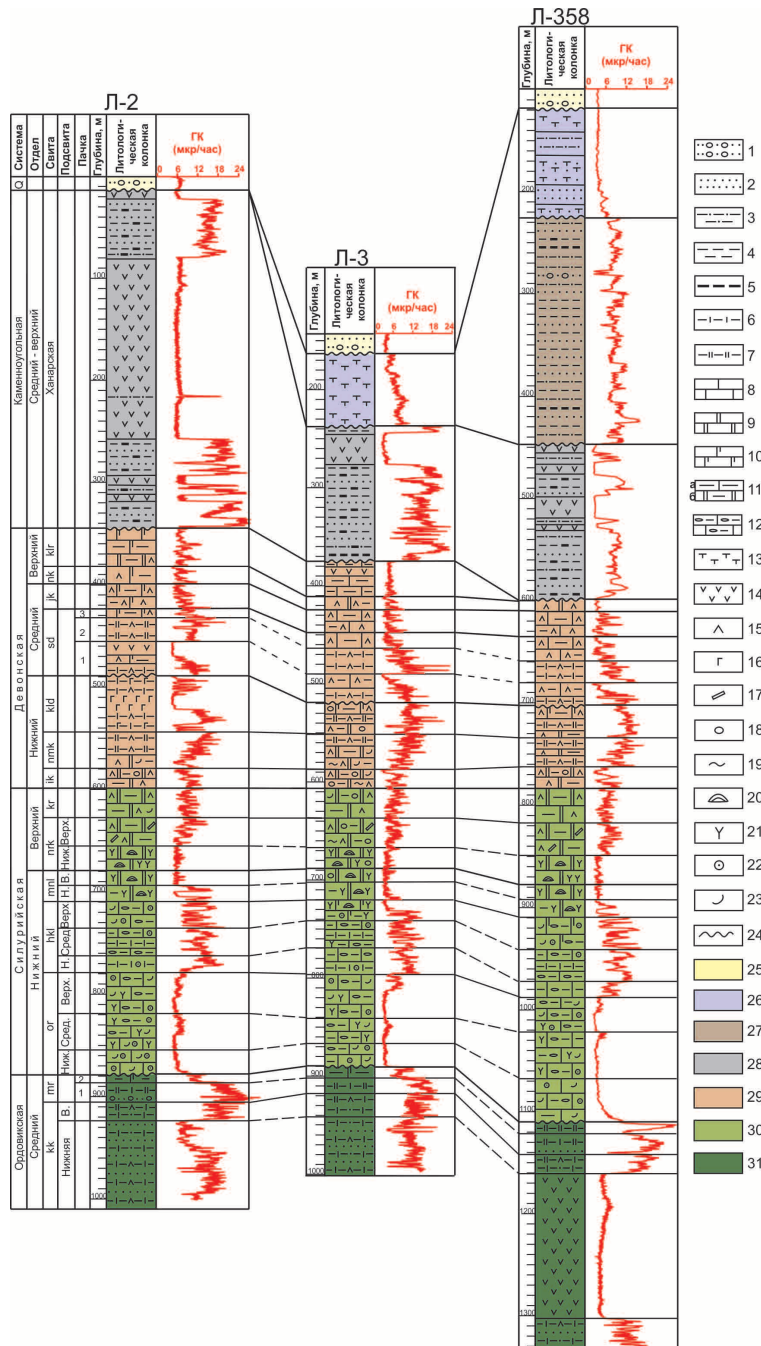


Рис. 2. Схема корреляции палеозойских отложений Ледянского поднятия: 1 – гравелиты, конгломераты; 2 – песчаники; 3 – алевролиты; 4 – аргиллиты; 5 – аргиллиты углистые, прослой угля; 6 – аргиллиты известковистые (известковые); 7 – аргиллиты доломитистые (доломитовые); 8 – известняки; 9 – доломиты; 10 – известняки доломитовые (доломиты известковые); 11а – известняки глинистые, 11б – доломиты глинистые; 12 – глинисто-известковые породы с нодулярной структурой; 13 – туфы, туффиты; 14 – долериты; 15 – ангидрит, гипс; 16 – галит; 17 – интракласты; 18 – оолиты; 19 – строматолиты; 20 – строматопораты; 21 – кораллы; 22 – криноидеи; 23 – раковинная фауна; 25 – четвертичная система; 26 – триас; 27 – пермь; 28 – карбон; 29 – девон; 30 – силур; 31 – ордовик. Свиты: *kk* – кунтыкахинская, *mr* – мойеронская, *or* – оранская, *hkl* – хукэлченская, *mnl* – мунильская, *nrk* – неракачинская, *kr* – кираская, *ik* – икоканская, *kld* – кольдинская, *sd* – сидинская, *jk* – юктинская, *nk* – накахозкая, *klr* – каларгонская, *hnr* – ханарская

Fig. 2. Paleozoic correlation scheme of the Ledyansk uplift: 1 – gravelstone, conglomerates; 2 – sandstone; 3 – siltstone; 4 – argillites; 5 – carbonaceous argillites, interbeds of coal; 6 – argillites calcareous; 7 – dolomitic argillites; 8 – limestones; 9 – dolomite; 10 – dolomitic limestone; 11a – clayey limestones, 11b – dolomite clay; 12 – dolomite clay with nodular structure; 13 – tuffs, tuффites; 14 – dolerites; 15 – anhydrite, gypsum; 16 – halite; 17 – intraclast; 18 – oolites; 19 – stromatolites; 20 – stromatoporoid; 21 – corals; 22 – crinoidea; 23 – sinks fauna; 25 – Quaternary system; 26 – Triassic; 27 – Permian; 28 – Carbon; 29 – Devonian; 30 – Silurian; 31 – Ordovician. Formation: *kk* – kuntykahinskaya, *mr* – moyeronskaya, *or* – oranskaya, *hkl* – hukelchenskaya, *mnl* – munijskaya, *nrk* – nerakachinskaya, *kr* – kiraskaya, *ik* – ikokanskaya, *kld* – koldinskaya, *sd* – sidinskaya, *jk* – yuktinskaya, *nk* – nakahozkaya, *klr* – kalargonskaya, *hnr* – hanarskaya

имеет хорошо выраженное двучленное строение. Нижняя пачка сложена аргиллитами зеленовато-серыми, доломито-известковистыми, тонкослоистыми, с частыми ходами илоедов. В верхней глинисто-доломито-известковой пачке наблюдается постепенное возрастание вверх по разрезу роли карбонатной составляющей.

Силурийские отложения залегают на ордовике со стратиграфическим перерывом. Нижний силур подразделяется на три свиты. Нижняя, *оранская* (*or*) свита, в целом имеет достаточно однородный глинисто-известковый состав, но за счет некоторых вариаций в содержании глинистого материала и фаунистических остатков подразделяется на три подсвиты [10]. Породы свиты характеризуются будинажеподобной или нодулярной текстурой. Возникновение такой текстуры возможно при дифференцированном уплотнении первоначально неоднородно распределенного глинистого и карбонатного вещества [14, 15]. Известняки в нодулях содержат примесь фаунистического детрита. В нижней подсвите он представлен мелкими остатками раковин остракод, брахиопод, цефалопод и криноидей, а в средней наблюдается укрупнение размерности фаунистических остатков, среди которых начинают преобладать обломки кораллов (табулят). В верхней подсвите фиксируются массивные прослои (до 10 см), обогащенные крупными остатками строматопорат и кораллов.

Вышележащая *хукэлченская* (*hkl*) свита отличается более глинистым составом и также подразделяется на три подсвиты. В нижней преобладают глинистые известняки с прослоями (первые см) мелко-органогенно-обломочных разновидностей. В средней наблюдается довольно грубое (первые метры) переслаивание известняков глинистых и аргиллитов известковистых. Часто отмечаются интервалы с нодулярными текстурами. В карбонатных стяжениях содержатся обломки раковин, иглокожих и редко кораллов. Верхняя подсвита сложена органогенно-обломочными известняками. Среди фаунистических остатков преобладают обломки табулят, а также присутствуют биокласты криноидей и брахиопод. В скважине Ледянская № 3 в кровле фиксируются известняки коричневатого-серые кораллово-строматопоратные, слагающие биогермную постройку мощностью около 11 м. Наблюдается доломитизация с усилением вверх по разрезу, слабое окремнение фаунистических остатков, а также интенсивное развитие пор, каверн и микростилолитов, выполненных битуминозным веществом.

Мунильская (*tnl*) свита представлена массивными кораллово-строматопоратными доломитами, которые в скважине Ледянская № 3 слагают рифогенную постройку мощностью около 30 м. В южном (скв. Л-2) и северном (скв. Л-358) разрезах эти породы фиксируются в верхней подсвите, а нижняя сложена переслаиванием органогенных, органогенно-обломочных и глинистых доломитов. В рифогенных породах отмечаются многочислен-

ные поры и каверны выщелачивания, а также стилолиты, выполненные битуминозным веществом и приуроченные к поверхностям напластования скелетных образований.

Верхний силур подразделяется на две свиты. В *неракачинской* (*nrk*) преобладают доломиты. Нижняя подсвита представлена пористо-кавернозными кораллово-строматопоратными породами. В верхней доминируют глинистые тонкослоистые доломиты с прослоями строматолитовых и оолито-интракласто-пизолитовых разновидностей. Также здесь отмечаются включения и слойки ангидрита, а в кровле фиксируется более интенсивная ангидритизация. *Кираская* (*kr*) свита имеет доломито-ангидрито-глинистый состав. В ней наблюдается чередование циклов мощностью 0,5–1,0 м, нижние части которых представлены доломитами тонкогоризонтальнослоистыми, с ходами илоедов. Вверх по разрезу породы становятся более глинистыми и ангидритистыми, в кровле залегают доломито-ангидритовые аргиллиты.

В основании девона отмечается глинисто-карбонатная толща, которая подразделяется на три свиты. *Икокская* (*ik*) свита сложена доломитами строматолитовыми, пизолитовыми и глинистыми. Отмечаются редкие прослои глинисто-ангидритовых пород. В *намаканской* (*ntk*) свите наблюдается переслаивание доломитов и аргиллитов в разной степени ангидритизированных. В скважине Ледянская № 3 в основании отмечаются прослои (до 0,2 м) строматолитовых доломитов. Выше фиксируются циклы метрового масштаба, в нижних частях которых залегают доломиты глинисто-ангидритистые с мелкокоралловым детритом, переходящие вверх по разрезу в более глинистые и заканчивающиеся тонкослоистыми глинистыми ангидритами. *Кольдинская* (*kld*) свита нижнего отдела девона в кровле размыта [12, 13]. Она представлена преимущественно красноцветными карбонатно-ангидрит-глинистыми породами. В скважине Ледянская № 3 в верхней части преобладают доломиты оолито-пизолитовые с многочисленными порами и кавернами, которые выполнены галитом и ангидритом. В южном направлении (скв. Л-2) наблюдается увеличение мощности свиты и содержания галита (прослои от нескольких см до 3 и 11 м). В северном разрезе (скв. Л-358) галит не зафиксирован.

Средний отдел девона представлен двумя свитами. *Сидинская* (*sd*) свита характеризуется неоднородным составом в разрезе и по площади. В зависимости от вариаций в содержании карбонатного, сульфатного и глинистого материала она подразделяется на три пачки. Нижняя карбонатная пачка сложена известняками доломитистыми, ангидритистыми и глинистыми, с прослоями фаунистического детрита. В скважине Ледянская № 2 в кровле пачки фиксируется трапповая интрузия. Средняя представлена красноцветными тонкослоистыми глинисто-известково-ангидритовыми породами. В верхней пачке наблюдается чередование сло-

ев с преобладанием карбонатного или сульфатного материала. В скважине Ледянская № 2 карбонатные породы свиты отличаются смешанным известково-доломитовым составом. *Юктинская (jk)* свита представлена известняками глинистыми и ангидритистыми. Известняки в разной степени доломитизированы, наиболее интенсивно в скважине Ледянская № 2. Вверх по разрезу возрастает роль сульфатно-карбонатных пород. *Накахозкая (nk)* свита, согласно залегающая на среднем девоне, сложена известняками доломитистыми, прослоями глинистыми, горизонтально и волнисто-слоистыми за счет примазок темно-серых аргиллитов, с прослоями и пятнистыми включениями ангидритов, часто пористых и кавернозных. Вверх по разрезу содержание ангидрита уменьшается. В *каларгонской (klr)* свите доминируют карбонатные породы, среди которых распространены в разрезе скв. Ледянская № 3 известняки, а в скв. Ледянская № 2 известковистые доломиты, часто глинистые и микритовые, обогащенные очень мелким раковинным детритом. В кровле верхнего девона отмечается крупный стратиграфический перерыв [12, 13].

Каменноугольные отложения представлены одной *ханарской (hnr)* свитой среднего-верхнего отдела, которая сложена переслаиванием углистых аргиллитов, углисто-глинистых алевролитов и песчаников, с внедрением многочисленных трапповых интрузий. Песчаники (преимущественно мелкозернистые) и алевролиты горизонтально и косослоистые, литокластито-полевошпатово-кварцевые. Среди литокластов преобладают обломки кремнистых пород, кварцитов, редко эффузивов и алевроито-песчаных пород. Часто встречается примесь углефицированного растительного детрита.

Пермские отложения на севере (скв. Л-358) представлены толщей ритмичного переслаивания песчаников, алевролитов, аргиллитов, туфопесчаников и туффитов. В южном направлении начинают преобладать туфогенные породы и мощность пермской толщи уменьшается вплоть до полного исчезновения в разрезе скв. Ледянская № 2.

Обстановки осадконакопления

Анализ условий образования различных типов пород и закономерностей их распределения в разрезе показал, что осадконакопление на территории Ледянского поднятия в палеозое происходило в широком спектре обстановок.

В среднеордовикский период накапливались красноцветные терригенно-карбонатные отложения прибрежной зоны, которые по мере наступления моря сменились глинисто-карбонатными осадками открытого шельфа. Верхнеордовикские отложения были размывы вследствие регрессии моря в предсилурское время.

Силурийские отложения, присутствующие в разрезе в полном объеме, накапливались в пределах крупного эпиконтинентального бассейна с трансгрессивно-регрессивной историей развития.

В раннем силуре на Сибирской платформе развилась широкая трансгрессия, а во второй половине силура началась регрессия. Этот тренд хорошо прослеживается в рассматриваемых разрезах. В раннем силуре седиментация происходила преимущественно в пределах верхней сублиторали в условиях умеренной или низкой гидродинамики, где шло накопление глинисто-известковых осадков с обильной нормально-морской бентосной фауной [16]. Затем на фоне постепенного обмеления бассейна наблюдается резкое сокращение практически всех бентосных сообществ, кроме строматопорат и табулят. На позднем этапе началось формирование рифогенной постройки, которая существовала и в начале верхнего силура. Рифогенные образования перекрываются зарифовыми фадами верхнего силура. Присутствие в них пластовых строматолитов свидетельствует о достаточно мелководной обстановке с умеренным гидродинамическим режимом, который периодически нарушался штормовыми волнениями и образованием прослоев оолито-интракласто-пизолитовых доломитов [17]. Появление ангидрита в кровле силурийских отложений связано, по-видимому, с постепенной изоляцией бассейна.

Девонские карбонатно-ангидрито-глинистые отложения формировались в основном в условиях мелководного шельфа с ограниченной циркуляцией вод, мелководной осолоняющейся лагуны или залива. Остатки ископаемых организмов представлены здесь угнетенным комплексом эвригалийных форм, локализующихся в редких тонких прослойках. Кроме того, в карбонатных прослоях иногда фиксируется примесь детрита брахиопод и криноидей, забрасываемого в лагунно-заливный бассейн во время штормов. Примечательно, что в разрезе среднего девона в скважине Ледянская № 2 фиксируются как многочисленные мелкие слойки, так и крупные пласты (до 11 м) галита, а в Ледянской № 3 на этом уровне отмечаются только редкие мелкие включения соли. Такое очаговое распределение галита некоторые исследователи связывают с активными зонами разломов [18]. Однако эта версия не объясняет отсутствие признаков галитизации в нижележащих породах и в девонских отложениях некоторых скважин, приуроченных непосредственно к разломным зонам. Вероятнее всего, отложение галита происходило за счет естественного мелководно-лагунного соленакопления [19, 20]. В верхнем девоне наблюдается постепенное обмеление бассейна и доминирование отложений приливно-отливной зоны. Верхние горизонты девона, как и каменноугольные отложения нижнего отдела, размывы в результате визейской регрессии.

Углистые аргиллиты, углисто-глинистые алевролиты и песчаники ханарской свиты средне-верхнего карбона имеют континентальное происхождение и сформировались, вероятно, в условиях озерно-болотистой прибрежной равнины. В среднем карбоне в разрезе рассматриваемых скважин

отмечаются многочисленные уровни с внедрением траптов.

В ранней перми на севере Ледянского поднятия продолжали накапливаться терригенно-угленосные отложения, а в поздней перми здесь начинают доминировать вулканогенные образования, отвечающие этапу траппового магматизма позднепермского-нижне-среднетриасового возраста.

Условия осадконакопления обусловили строение первичного пустотного пространства пород и предопределили направленность и интенсивность проявления постседиментационных преобразований. Степень влияния этих факторов различна, что видно на примере рассматриваемых отложений.

Коллекторские свойства

Анализ влияния литологических характеристик пород на фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) проводился с использованием результатов измерения пористости и проницаемости, полученных сотрудниками лаборатории седиментологии ИНГГ СО РАН С.В. Родякиным и С.А. Кугаколовым.

Терригенные отложения *кунтыкахинской* свиты среднего ордовика характеризуются хорошими фильтрационно-емкостными свойствами. Значения пористости варьируют от 7 до 16 %, проницаемость составляет в среднем около $0,1 \cdot 10^{-3}$ мкм², а в отдельных пластах достигает $100 \cdot 10^{-3}$ мкм² (рис. 3).

Наиболее высокие показатели фиксируются в мелкозернистых хорошо сортированных песчаниках, сформированных в условиях прибрежно-мелководной зоны. Очевидно, что они обладали очень хорошими первичными (синседиментационными) ФЕС, однако развитие порового карбонатно-сульфатного и кварцевого регенерационного типов цемента ухудшили пористость и особенно проницаемость. Тем не менее, в прослоях с минимальным развитием вторичного цемента отмечаются высокие коллекторские свойства. Верхняя часть свиты отличается более глинистым составом. В редких песчаных прослоях значения пористости составляют 6–8 %, а проницаемости около $0,1 \cdot 10^{-3}$ мкм².

Вверх по разрезу наблюдается снижение ФЕС, что связано с усиливающейся трансгрессией моря и формированием практически непроницаемых глинисто-карбонатных отложений *мойеронской* свиты. В более чистых карбонатных прослоях свиты пористость 1–5 %, проницаемость $\leq 0,03 \cdot 10^{-3}$ мкм².

Разрез силура имеет неоднородный состав, что нашло отражение и в распределении значений пористости и проницаемости. *Оранская* свита, несмотря на преимущественно известковый состав, характеризуется низкими фильтрационно-емкостными свойствами. Пористость не превышает 1–2 %, а в среднем около 0,1 %. Проницаемость не более $0,1 \cdot 10^{-3}$ мкм², а в среднем около $0,01 \cdot 10^{-3}$ мкм². Это связано с тем, что первичные коллекторские свойства шламово-детритовых и детритовых известняков были невысокими из-за

обилия глинисто-известкового матрикса и плохой сортировки фаунистических остатков. Присутствие многочисленных тонких прослоев известковых аргиллитов также является фактором, ухудшающим ФЕС.

Хукэлченская свита характеризуется еще более глинистым составом, что нашло отражение в крайне низких значениях пористости и проницаемости. Исключение представляет верхняя подсвита хукэлченской свиты скважины Ледянская № 3, где в кровле залегают кораллово-строматопоровые известняки, слагающие небольшую биогермную постройку, в которых значения ФЕС повышаются до 7 % и $49 \cdot 10^{-3}$ мкм², соответственно.

Наилучшие коллекторские свойства наблюдаются в крупной рифогенной кораллово-строматопоровой постройке, образованной во время накопления *мунильской* свиты и нижней подсвиты *неракачинской* свиты. В биогермных доломитах пустотное пространство в основном представлено кавернами и порами выщелачивания (размер от долей мм до 1–1,5 см), которые развивались по первичным пустотам в скелетах колониальных организмов и между ними. Поскольку породы сильно перекристаллизованы, определённый вклад вносят и мелкие (?1 мм) поры, образованные за счет перекристаллизации, часть которых также подверглась последующему растворению. Однако, несмотря на наличие многочисленных пор и каверн, значения открытой пористости в рифогенных породах относительно невысокие – в среднем около 5 %, что связано с сокращением объема пустот за счет частичного или полного заполнения их более поздней генерацией доломита. Дополнительную емкость создают многочисленные микростилолиты, развивающиеся по плоскостям напластования и выполненные битуминозным веществом. Наблюдается широкое развитие открытых трещин, часто с щелевидными расширениями за счет процессов растворения. Невысокие значения пористости при относительно высокой проницаемости от $1 \cdot 10^{-3}$ до $495 \cdot 10^{-3}$ мкм² позволяют предположить наличие на этом уровне коллектора каверново-трещинного типа [21].

В верхней подсвите *неракачинской* свиты наблюдается резкое снижение значений пористости и проницаемости. Поскольку седиментация в это время происходила в относительно спокойных условиях тыловой части рифа, то наряду с оолито-пизолито-интракластическими осадками, которые характеризуются благоприятной первичной структурой пустотного пространства, накапливались доломито-глинистые тонкослоистые отложения, первичные ФЕС которых крайне низкие. Отрицательную роль в формировании коллекторских свойств также сыграло развитие ангидрита. Поры в оолито-пизолито-интракластических доломитах, образованные, вероятно, в результате унаследованного выщелачивания первичных межзерновых пустот, как правило, заполнены вторичным доломитом или ангидритом, что существенно снижает

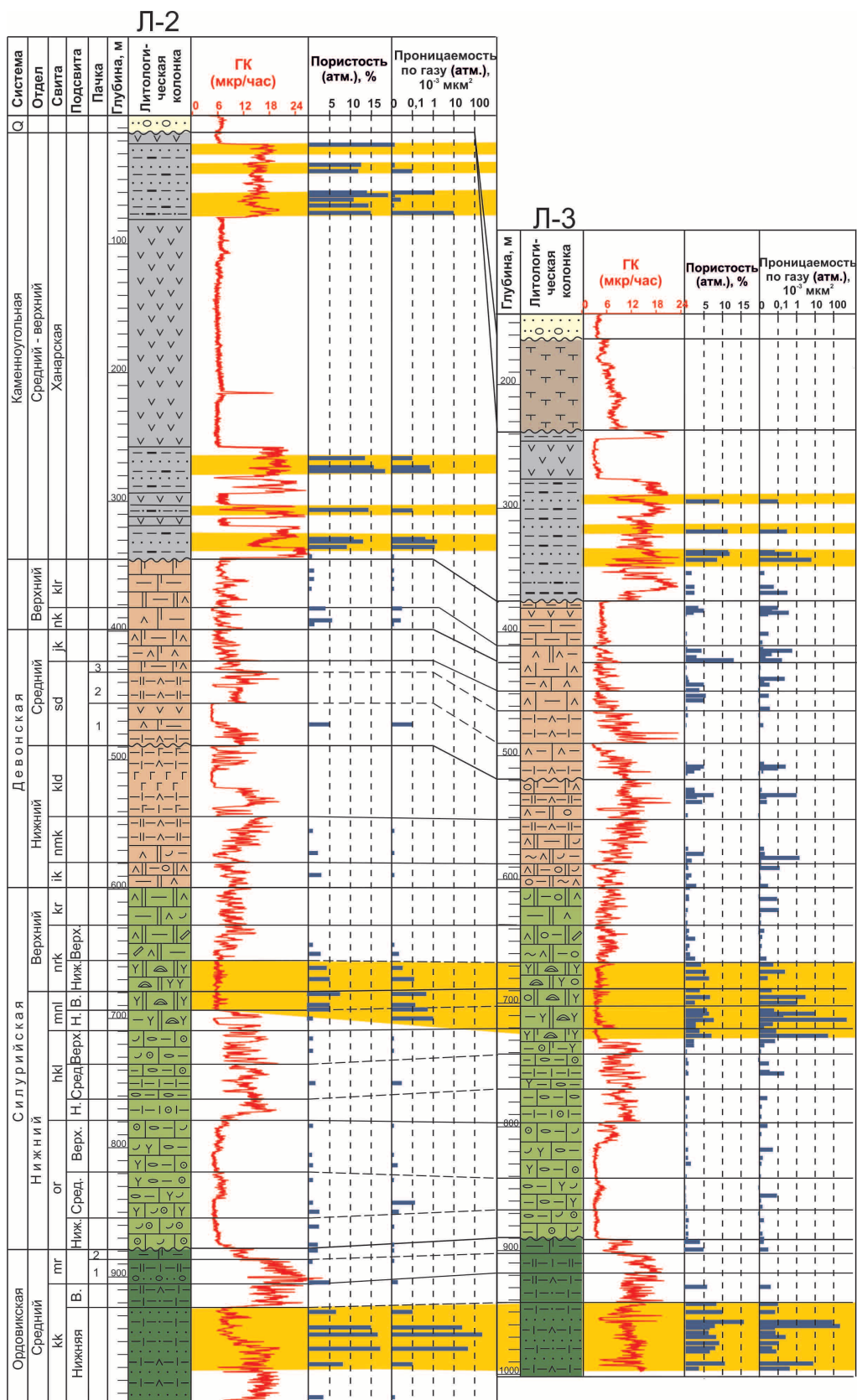


Рис. 3. Распределение пористости и проницаемости в палеозойском разрезе Ледянского поднятия. Условные обозначения на рис. 2. Желтым цветом показаны уровни потенциальных коллекторов

Fig. 3. Porosity and permeability distribution in the Paleozoic section of the Ledyansk uplift. Symbols the same as in Fig. 2. The yellow color shows the levels of potential collectors

значения ФЕС (пористость 1–2 %, проницаемость около 0,01 %). Глинисто-сульфатно-доломитовые породы *кираской* свиты также обладают низкими значениями ФЕС.

Седиментация в девоне проходила в пределах мелководного шельфа с ограниченной циркуляцией вод, на котором широкое развитие получили карбонатно-ангидритно-глинистые осадки, в целом с достаточно низкими значениями ФЕС (пористость 2–5 %, проницаемость $0,1 \cdot 10^{-3}$ мкм²). Отмечаются отдельные маломощные прослои строматолитовых и оолито-пизолитовых карбонатных пород с развитием пор, каверн и микротрещин, которые характеризуются относительно повышенной пористостью до 5–12 % и проницаемостью до $1 \cdot 10^{-3}$ мкм². Ухудшающим фактором для выделения коллекторов являются небольшие мощности этих прослоев ($\leq 0,5$ м) и ассоциация с сульфатными и глинистыми породами.

Породы каменноугольной системы, сформированные в прибрежно-континентальных условиях, имеют преимущественно песчано-аргиллитовый состав. Песчаники *ханарской* свиты обладают высокими значениями пористости в среднем около 5 %, иногда до 10–17 %, и проницаемости $(1-10) \cdot 10^{-3}$ мкм². Однако отсутствие покрывки не позволяет рассматривать их в качестве перспективного горизонта.

Анализ распределения пористости и проницаемости по разрезу показал, что выделяются два уровня с наиболее высокими показателями ФЕС, которые можно выделить в качестве коллекторов. Это песчаники среднего ордовика прибрежно-морского генезиса, а также рифогенные кораллово-строматопоровые доломиты силура (рис. 3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ордовик и силур Ледянской площади по данным бурения / Т.А. Дивина, В.С. Старосельцев, Т.В. Лопушинская, А.Г. Ядренкина // Геология и геофизика. – 1992. – № 3. – С. 19–27.
2. Новые материалы по стратиграфии докембрия и кембрия северо-востока Тунгусской синеклизы / Т.А. Дивина, Л.И. Егорова, А.А. Салихов, В.С. Старосельцев, Г.В. Белобородова // Геология и геофизика. – 1996. – Т. 37. – № 7. – С. 23–33.
3. О состоянии и перспективах ресурсной базы углеводородов, геолого-разведочных работ и лицензировании недр Восточной Сибири и Республики Саха (Якутия) / В.С. Ефимов, А.А. Герт, П.Н. Мельников, В.С. Старосельцев, А.А. Вымятнин, В.Г. Акимов, И.И. Черепанова, М.В. Бражникова // Геология нефти и газа. – 2012. – № 5. – С. 58–74.
4. Баженова Т.К., Казаис В.И. История нефтегазообразования и нефтегазоаккумуляции на северо-западе Сибирской платформы (историко-геохимический и структурно-исторический анализ) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2011. – Т. 6. – № 2. URL: http://www.ngtp.ru/rub/4/15_2011.pdf (дата обращения: 18.03.2014).
5. Литостратиграфия силура северо-запада Сибирской платформы / Н.В. Мельников, Т.В. Лопушинская, Т.А. Дивина, В.А. Кринин, Л.Д. Дорошенко // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2014. – № 4 (20). – С. 3–17.
6. Нефтегазоносные бассейны и регионы Сибири. Тунгусский бассейн / А.Э. Конторович, В.С. Старосельцев, В.С. Сурков и др. – Новосибирск: Наука, 1994. – Вып. 5. – 91 с.

Выводы

Основные результаты исследования палеозойских отложений, вскрытых скважинами на Ледянской площади, сводятся к следующему:

1. На Ледянском своде вскрыт мощный разрез средне-верхнепалеозойских отложений с небольшим количеством трапшовых интрузий, состав которого неоднороден. На основании литологических исследований выяснено, что ордовик представлен преимущественно терригенными породами. В силуре доминируют карбонатные отложения. Девон характеризуется смешанным терригенно-сульфатно-карбонатным составом. Карбон сложен углито-терригенными породами.
2. Установлено, что осадконакопление в ордовикско-девонский период происходило в широком спектре мелководно-морских обстановок: прибрежных частях открытого шельфа, приливно-отливных отмелях, засоленных мелководных лагунах и рифовых зонах. В карбоне доминировала прибрежно-континентальная седиментация.
3. На основе изучения вещественно-структурных особенностей пород и данных по пористости и проницаемости выявлена связь между литологическими особенностями палеозойских отложений и их коллекторскими свойствами. Выделено два потенциальных коллектора: 1 – рифогенные породы силура, в которых наиболее интенсивно прошли постседиментационные процессы выщелачивания и стилолитобразования, 2 – песчаники ордовика, в которых сохранилась первичная пористость. Карбонатно-сульфатно-глинистые отложения и пласты солей в остальных частях разреза могут выступать в качестве флюидоупоров.

7. Тектоническая карта венд-нижнепалеозойского структурного яруса Лено-Тунгусской провинции Сибирской платформы / А.Э. Конторович, С.Ю. Беляев, А.А. Конторович и др. // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. – № 8. – С. 851–862.
8. Ордовик северо-запада Сибирской платформы / Ю.И. Тесаков, А.В. Каньгин, А.Г. Ядренкина и др. – Новосибирск: Изд-во «Гео», 2003. – 260 с.
9. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Ордовик Сибирской платформы / А.В. Каньгин, А.Г. Ядренкина, А.В. Тимохин и др. – Новосибирск: Гео, 2007. – 269 с.
10. Силур северо-запада Сибирской платформы / Ю.И. Тесаков, О.Н. Симонов, Е.О. Ковалевская и др. – Новосибирск: Гео, 2002. – 405 с.
11. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Силур Сибирской платформы / Ю.И. Тесаков, Н.Н. Предтеченский, Т.В. Лопушинская и др. – Новосибирск: Изд-во «Гео», 2000. – 407 с.
12. Решения Всесоюзного стратиграфического совещания по докембрию, палеозою и четвертичной системе Средней Сибири. Ч. 2. Средний и верхний палеозой. – Новосибирск: СНИИГ-ГИМС, 1982. – 128 с.
13. Стратиграфическая основа девонской системы Сибирской платформы / Р.Г. Матухин и др. – Новосибирск: СНИИГГИМС, 1995. – 80 с.
14. Уилсон Дж.Л. Карбонатные фации в геологической истории. – М.: Недра, 1980. – 463 с.

15. Flügel E. *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application*. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – 1006 p.
16. Davis R.A., Dalrymple R.W. *Principles of Tidal Sedimentology*. – London: Springer Dordrecht Heidelberg London, 2012. – 609 p.
17. Hardie L.A., Shinn E.A. Carbonate depositional environments. Modern and ancient. P. 3: Tidal flats // Colorado School of Mines, Quarterly. – 1986. – V. 81. – № 1. – P. 1–74.
18. Старосельцев В.С., Дивина Т.А. Механизм девонского соленакопления на северо-западе Сибирской платформы // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2012. – № 2 (10). – С. 88–95.
19. Матухин Р.Г. Девон и нижний карбон Сибирской платформы (состав, условия осадконакопления, минерагения). – Новосибирск: Наука, 1991. – 164 с.
20. Warren J.K. *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbon*. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. – 1035 p.
21. Багринцева К.И., Дмитриевский А.Н., Бочко Р.А. Атлас карбонатных коллекторов месторождений нефти и газа Восточно-Европейской и Сибирской платформ. – М.: Иван Федоров, 2003. – 264 с.

Поступила 26.06.2015 г.

UDC 552+553.98

LITHOLOGICAL FEATURES OF FORMING PALEOZOIC COLLECTORS OF THE LEDYANSK UPLIFT (NORTH TUNGUSKA OIL-AND-GAS AREA)

Irina V. Varaksina,

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and geophysics of Siberian branch of Russian Academy of Sciences, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.
E-mail: VaraksinaIV@ipgg.sbras.ru

Igor V. Tumashov,

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and geophysics of Siberian branch of Russian Academy of Sciences 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.
E-mail: TumashovIV@ipgg.sbras.ru

The relevance of research is caused by the need to study and search oil and gas fields in the Arctic regions of Russia. As the exploration drilling of these areas is very low, the more detailed study of previously drilled wells is required for successful exploration.

The main aim of the study is to determine the influence of sedimentation and post-sedimentation factors on formation of the void space of different rock types and to define the levels of potential reservoirs in the Paleozoic section of the Ledyansk uplift.

Objects of researches are Paleozoic sediments that were opened by Ledyansk wells in the north of the North Tunguska NGO.

The methods used in the study: construction of sections of the Paleozoic sediments on the basis of detailed core descriptions, results of GIS (Well logging) and paleontological research; petrographic study of the main types of rocks involved in the structure of the section; genetic analysis of different rock types and clarification of the conditions of their sedimentation; study of the void space of rocks in cores and thin sections; determination of relationship between lithological characteristics and reservoir properties of the Paleozoic rocks.

The results. The authors identified the composition, structure and depositional environment of the Paleozoic sediments, exposed to Ledyansk uplift. The influence of sedimentation and post-sedimentation factors were identified on the formation of reservoirs. It was determined that the highest rates of porosity and permeability are observed in the carbonate rocks of the Silurian reef where leaching has influenced most intensively on rocks and in the Ordovician and Carboniferous sandstones with good primary porosity.

Key words:

Lithology, North Tunguska oil-and-gas area, Ledyansk uplift, Paleozoic sediments.

REFERENCES

1. Divina T.A., Staroseltsev V.S., Lopushinskaya T.V., Yadrenkina A.G. Ordovik i silur Ledyanskoy ploshchadi po dannym bureniya [Ordovician and Silurian of the Ledyansk area by drilling data]. *Russian Geology and Geophysics*, 1992, no. 3, pp. 19–27.
2. Divina T.A., Egorova L.I., Salikhov A.A., Staroseltsev V.S., Beloborodova G.V. Novye materialy po stratigrafii dokembriya i kembriya severo-vostoka Tunguskoj sineklizy [New materials on the stratigraphy of Precambrian and Cambrian of northeast Tunguska syncline]. *Russian Geology and Geophysics*, 1996, vol. 37, no. 7, pp. 23–33.
3. Efimov V.S., Gert A.A., Melnikov P.N., Staroseltsev V.S., Vymyatnin A.A., Akimov V.G., Cherepanova I.I., Brazhnikova M.V. O sostoyanii i perspektivakh resursnoy bazy uglevodorodov, geologo-razvedochnykh rabot i litsenzirovaniy neдр Vostochnoy Sibiri i Respubliki Sahka (Yakutiya) [On the state and prospects of the resource base of hydrocarbons, geological prospecting and licensing of mineral deposits in Eastern Siberia and the Sakha Republic (Yakutia)]. *Geologiya nefti i gaza – Geology of oil and gas*, 2012, no. 5, pp. 58–74.
4. Kazais V.I., Bazhenova T.K. Istoriya neftegazobrazovaniya i neftegeozonakopleniya na severo-zapade Sibirskoy platformy (istoriko-geokhimicheskiy i strukturno-istoricheskiy analiz) [The history of oil and gas generation and accumulation in the Northwest of the Siberian platform (historical geochemical and structural-historical analysis)]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya*

- i praktika – Petroleum Geology. Theoretical and Applied Studies*, 2011, vol. 6, no. 2. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/4/15_2011.pdf (accessed: 18 March 2014).
5. Melnikov N.V., Lopushinskaya T.V., Divina T.A., Krinin V.A., Doroshenko L.D. Litostratigrafiya silura severo-zapada Sibirskoy platformy [Lithostratigraphy of Silurian of the North-West of the Siberian platform]. *Geologiya i mineralno-syryevye resursy Sibiri*, 2014, no. 4 (20), pp. 3–17.
 6. Kontorovich A.E., Staroseltsev V.S., Surkov V.S. Neftegazonnyye bassejny i regiony Sibiri. Tungusskiy bassejn [Oil and gas basins and regions of Siberia. Tunguska basin]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1994. Iss. 5, 91 p.
 7. Kontorovich A.E., Belyaev S.Yu., Kontorovich A.A. Tektonicheskaya karta vend-nizhnepaleozoyskogo strukturnogo yarusy Leno-Tungusskoy provintsii Sibirskoy platformy [Tectonic map of the Vendian-Lower Paleozoic structural stage of the Lena-Tunguska province of the Siberian Platform]. *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 8, pp. 851–862.
 8. Tesakov Yu.I., Kanygin A.V., Yadrenkina A.G. Ordovik severo-zapada Sibirskoy platformy [Ordovician of northwest of Siberian platform]. Novosibirsk, Geo Publ., 2003, 260 p.
 9. Kanygin A.V., Yadrenkina A.G., Timokhin A.V. Stratigrafiya neftegazonosnykh basseynov Sibiri. Ordovik Sibirskoy platformy [Stratigraphy of oil and gas basins of Siberia. The Ordovician of the Siberian Platform]. Novosibirsk, Geo Publ., 2007. 269 p.
 10. Tesakov Yu.I., Simonov O.N., Kovalevskaya E.O. Silur severo-zapada Sibirskoy platformy [Silurian of northwest of Siberian platform]. Novosibirsk, Geo Publ., 2002. 405 p.
 11. Tesakov Yu.I., Predtechenskiy N.N., Lopushinskaya T.V. Stratigrafiya neftegazonosnykh basseynov Sibiri. Silur Sibirskoy platformy [Stratigraphy of oil and gas basins of Siberia. The Silurian of the Siberian platform]. Novosibirsk, Geo Publ., 2000. 407 p.
 12. Resheniya Vsesoyuznogo stratigraficheskogo soveshchaniya po dokembriyu, paleozoyu i chetvertichnoy sisteme Sredney Sibiri. Ch. 2. Sredniy i verkhniy paleozoy [The decisions of the All-Union meeting on stratigraphic Precambrian, Paleozoic and Quaternary System of Central Siberia. P. 2. Middle and Upper Paleozoic]. Novosibirsk, SNIIGiMS Press, 1982. 128 p.
 13. Matukhin R.G. Stratigraficheskaya osnova devonskoy sistemy Sibirskoy platformy [Devonian stratigraphic base of the Siberian Platform]. Novosibirsk, SNIIGiMS Press, 1995. 80 p.
 14. Uilson Dzh.L. Karbonatnye fatsii v geologicheskoy istorii [Carbonate facies in geologic history]. Moscow, Nedra Publ., 1980. 463 p.
 15. Flügel E. *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application*. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 1006 p.
 16. Davis R.A., Dalrymple R.W. *Principles of Tidal Sedimentology*. London, Springer Dordrecht Heidelberg London, 2012. 609 p.
 17. Hardie L.A., Shinn E.A. Carbonate depositional environments. Modern and ancient. P. 3: Tidal flats. *Colorado School of Mines, Quarterly*, 1986, vol. 81, no. 1, pp. 1–74.
 18. Staroseltsev V.S., Divina T.A. Mekhanizm devonskogo solenakopleniya na severo-zapade Sibirskoy platformy [The mechanism of Devonian salt accumulation in northwest of Siberian platform]. *Geologiya i mineralno-syryevye resursy Sibiri*, 2012, no. 2 (10), pp. 88–95.
 19. Matukhin R.G. Devon i nizhniy karbon Sibirskoy platformy (sostav, usloviya osadkonakopleniya, minerageniya) [Devonian and Lower Carboniferous of the Siberian Platform (composition, sedimentation, minerageny)]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991. 164 p.
 20. Warren J.K. *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbon*. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 1035 p.
 21. Bagrintseva K.I., Dmitrievskiy A.N., Bochko R.A. Atlas karbonatnykh kolektorov mestorozhdeniy nefti i gaza Vostochno-Evropeyskoy i Sibirskoy platformy [Atlas of carbonate reservoirs of oil and gas deposits of the East European and Siberian platforms]. Moscow, Ivan Fedorov Publ., 2003. 264 p.

Received: 26 June 2015.

УДК 550.47+504.064.36

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ФОНОВЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЛИШАЙНИКАХ-ЭПИФИТАХ

Большунова Татьяна Сергеевна,

инженер 1 категории отдела экологического нормирования
ОАО «ТомскНИПИнефть», Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72;
Инженер-исследователь кафедры геоэкологии и геохимии Института
природных ресурсов Национального исследовательского Томского
политехнического университета, Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 30.
E-mail: BolshunovaTS@gmail.com

Рихванов Леонид Петрович,

д-р геол.-минерал. наук, профессор кафедры геоэкологии и геохимии
Института природных ресурсов Национального исследовательского
Томского политехнического университета, Россия, 634050, Томск,
пр. Ленина, 30. E-mail: Rikhvanov@tpu.ru

Барановская Наталья Владимировна,

д-р биол. наук, профессор кафедры геоэкологии и геохимии Института
природных ресурсов Национального исследовательского Томского
политехнического университета, Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 30.
E-mail: Natalia.baranovs@mail.ru

Актуальность. Антропогенная деятельность, в том числе добыча полезных ископаемых, сопряжена с загрязнением окружающей среды и накоплением отходов производства. Предотвращение и ликвидация наблюдаемых при этом негативных воздействий предполагает целый ряд мероприятий, первым из которых является оценка их влияния на природную среду. В свою очередь, она невозможна без знания фоновых состояний компонентов окружающей среды, что и определило актуальность исследования.

Цель работы: установить влияние эколого-геохимических факторов на уровни накопления химических элементов в эпифитных лишайниках, используемых в качестве индикаторов антропогенного влияния на окружающую среду; определить фоновые концентрации элементов в лишайниках для последующей оценки воздействия процессов добычи и транспортировки полезных ископаемых.

Методы исследования: методы математической статистики, ландшафтно-геохимический метод, методы определения химического состава компонентов окружающей среды (нейтронно-активационный).

Результаты. Установлено, что химический состав эпифитных лишайников отражает природные геохимические особенности коренных пород и почвенного покрова территории их произрастания. Полученные данные свидетельствуют о достаточно близких уровнях накопления, укладываемых в доверительный интервал определений таких 16 элементов, как La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Hf, Th, Sc, Fe, Co, Ca, Na, Rb, Cs, а также группы из 12 элементов: Cr, Zn, As, Br, Sr, Ag, Sb, Ba, Nd, Ta, Au, U, для которых наблюдаются более значимые различия в оценке их средних для каждого из изученных фоновых участков. Рекомендовано в качестве регионального фона для юга Западной Сибири использовать элементный состав эпифитных лишайников Томского района, который характеризуется незначительным влиянием промышленных предприятий и отсутствием каких-либо выявленных геохимических аномалий коренных пород и подстилающей поверхности.

Ключевые слова:

Загрязнение атмосферного воздуха, фоновые районы, концентрации химических элементов, лишайники-эпифиты, преобладание природного геохимического фактора.

Введение

Изменение окружающей среды в процессе добычи георесурсов под действием антропогенного фактора наблюдаются не только на местных, региональных, уровнях, но также и в глобальном масштабе. Объективную и точную информацию о состоянии экосистем, в пределах которых проводится добыча георесурсов, а также о тенденциях изменения этого состояния могут давать системы экологического мониторинга [1], одним из элементов которого является мониторинг биологических систем или биомониторинг. В свою оче-

редь, среди направлений экологического биомониторинга отдельно рассматривается лишайномониторинг (Lichen – лишайник (англ.)), т. е. использование лишайников в качестве объектов наблюдения и с целью изучения химического состава. Это направление системы качества природной среды весьма актуально, поскольку позволяет за счёт довольно продолжительного периода жизни лишайников получать многолетние осредненные характеристики состояния биосферы, одновременно являющейся и георесурсным комплексом [2].

География распространения лишайников на Земном шаре весьма обширна. Из всех многоклеточных организмов лишайники имеют наиболее широкую экологическую толерантность по разным параметрам окружающей среды [3].

Эпифитные лишайники, произрастающие на стволах и ветвях деревьев, чувствительны к изменению химического состава компонентов окружающей среды, включая атмосферный воздух и атмосферные осадки, а также к изменению климата и ряду других факторов [3]. На видовой состав и количественные характеристики сообществ эпифитных лишайников влияют такие естественные факторы, как влажность воздуха, освещенность, и др. [4, 5]. Поскольку лишайники-эпифиты не имеют корневой системы, их питание является атмосферным и, соответственно, элементный состав в обобщённом виде отражает, прежде всего, состав химических элементов в атмосфере.

Степень пространственно-временных изменений концентраций элементов, поступающих из антропогенных или естественных источников, может быть выявлена путём сравнения с эталонными районами или с фоновыми значениями концентраций элементов в образцах того же вида растений [2]. В этой связи для сравнения данных, полученных в ходе лишайномониторинга антропогенно-загрязнённых территорий, необходимо располагать фоновыми концентрациями определяемых химических элементов в лишайниках. Для выбора фона обычно руководствуются фактором удаленности оцениваемого участка от источников выбросов загрязняющих веществ в процессе добычи георесурсов. Однако следует понимать, что в настоящее время таких районов практически остаётся всё меньше, и, даже в случае отсутствия антропогенного воздействия, имеют место трансграничные переносы

загрязняющих веществ, которые для определённых регионов оказывают более сильное влияние, нежели локальные источники [6]. Кроме того, существуют и природные факторы, определяющие повышенный региональный фон для некоторых химических элементов. Типы растительных поясов и типы почвенного покрова также оказывают влияние на содержание химических элементов в растениях [2], и определиться с выбором фоновых параметров достаточно непростая задача.

В работе сделана попытка оценить влияние эколого-геохимических факторов на уровни накопления химических элементов в эпифитных лишайниках, являющихся важным индикатором воздействия добычи нефти и газа на окружающую среду и отобранных в практически незатронутых антропогенной деятельностью участках. Кроме того, мы попытались установить некие генерализованные фоновые концентрации химических элементов в эпифитных лишайниках, нивелируя особенности каждого из рассмотренных районов.

Материалы и методы

Отбор проб эпифитных лишайников осуществлялся в четырёх районах Западной и Восточной Сибири и одном районе Центральной Европы (рис. 1):

- Томская область, Томский район (юг, юго-восток района, наименее подверженный влиянию Томск-Северской промышленной зоны [7], район расположен в пределах подтайги (подзона мелколиственных лесов). Пробы отбирались в 2006 г. [8] и 2013 г.
- Кемеровская область, отроги Кузнецкого Алатау, южнотаежные темнохвойные леса. Образцы лишайников были отобраны в июне 2013 г.
- Иркутская область, Черемховский район, окрестности с. Голуметь, Присяянская провин-

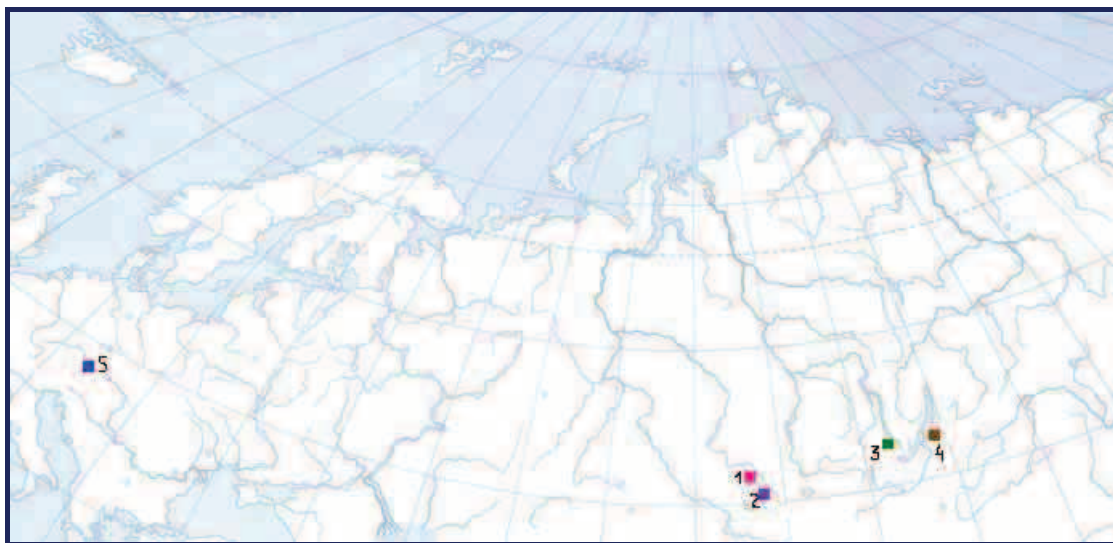


Рис. 1. Карта-схема пунктов отбора проб лишайников-эпифитов: 1 – Томская область, 2 – Кемеровская область, 3 – Иркутская область, 4 – Республика Бурятия, 5 – Австрия

Fig. 1. Map of sampling works of epiphytic lichens: 1 – Tomsk region, 2 – Kemerovo region, 3 – Irkutsk region, 4 – Republic of Buryatia, 5 – Austria

ция таежной зоны Средней Сибири. Пробы лишайников отбирали в сентябре 2012 г.

- Республика Бурятия, Забайкальский национальный парк (район Баргузино-Чивыркуйского перешейка (БЧП), вблизи оз. Байкал, межгорно-котловинные таежные ландшафты с преобладанием в древостое лиственницы. Образцы лишайников отбирались в августе 2013 г.
- Австрия, Зиммеринг, восточные Альпы, территория расположена в пределах высотного пояса смешанных лесов. Пробы отбирались весной 2012 г.

В общей сложности для проведения данного исследования использовались 22 пробы эпифитных лишайников. Следует отметить, что все вышеперечисленные территории характеризуются значительной удалённостью на многие десятки и сотни километров от крупных промышленных центров. Каждая из этих территорий обладает своими особенностями геологического строения, типом почв и другими параметрами. При пробоотборе придерживались рекомендаций, приведённых в некоторых публикациях, например Р. Баргалы и Л. Нимис [9]. Отбирались лишайники по случайной сетке на высоте человеческого роста от поверхности почвы с целью снижения вероятности загрязнения образцов частичками почв. Кроме того, лишайники, произрастающие на подобной высоте, отражают состав воздуха, вдыхаемого человеком. Образцы отбирались с нескольких расположенных близко деревьев и объединялись в одну пробу. Виды эпифитных лишайников были определены в г. Томске по [10]. Так, в Австрии были отобраны виды *Melanohalea olivacea* (L.) O. Blanco et al., *Pseudevernia furfuracea* (L.) Zopf, *Hypogymnia tubulosa* (Schaer.) Hav., *Usnea filipendula* Stirt. В России – *Evernia mesomorpha* (Flot.) Nyl., *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Usnea subfloridana* Stirt., *Parmelia sulcata* Tayl., *Bryoria nadvornikiana* (Gyeln.) Brodo ex D. Hawksw. и др. В лаборатории образцы были очищены с помощью пинцета от посторонних загрязнителей (частиц коры, хвои и пр.) и высушены до воздушно-сухого состояния. Для анализов готовились пробы вида *Evernia* (пробы из Томской, Кемеровской, Иркутской областей, Австрии) и смешанные пробы со значительным преобладанием в пробе вида *Evernia mesomorpha* (для проб из Бурятии). По мнению некоторых исследователей, разные виды мало отличаются по характеру накопления химических элементов [11–13, 6 и др.].

С целью достижения равномерности распределения химических элементов внутри пробы образцы измельчались. Гомогенизированные образцы озоляли в муфельной печи. В течение часа температуру доводили до 100 °С, затем озоляли пробы при температуре 550 °С согласно ГОСТ 27784–88 [14], т. к. для озоления лишайников иного стандарта не найдено. Озоление растительных проб позволяет снизить вероятность возникновения по-

грешностей от органической части и улучшает репрезентативность результатов благодаря концентрированию элементов в пробах. Подготовленные образцы после остывания взвешивали (по 100 мг) и тщательно упаковывали в пакетики из фольги. Для количественного анализа на содержание 28 химических элементов (включая редкие земли) в лишайниках использовался современный высокочувствительный ядерно-физический метод инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА), выполненный в аккредитованной ядерно-геохимической лаборатории кафедры геоэкологии и геохимии Томского политехнического университета (ТПУ) (аналитик с.н.с. А.Ф. Судыко) по аттестованной методике № МКХА НСАМ № 510-ЯФ ТПУ.

Метод ИНАА является одним из наиболее точных многоэлементных методов, особенно для измерения брома, хрома, кобальта, рубидия, сурьмы, скандия и цинка. Аналитические исследования в ядерно-геохимической лаборатории ТПУ проводятся с использованием стандартных образцов сравнения, например стандарта МАГАТЭ «Лист берёзы» № ЛБ-8923–2007, «Элодея канадская» № ЭК-1 (8921–2007), «Травосмесь» № ТР (8922–2007). Многочисленные измерения различных стандартных образцов и сопоставление полученных данных с их паспортными (аттестованными) значениями показали удовлетворительную сходимость полученных результатов.

В качестве используемого для обработки данных программного обеспечения использовались Microsoft Word, Microsoft Excel, Paint, STATISTIKA.

По полученным результатам были рассчитаны статистические параметры распределения химических элементов: среднее, стандартная ошибка, стандартное отклонение и традиционные для биогеохимических исследований показатели. Были подсчитаны коэффициенты концентрирования (Кк) – отношение содержания элемента в золе растения к кларку концентрации в верхней континентальной коре по Н.А. Григорьеву. Кроме того, были определены коэффициенты относительного поглощения [15] – отношение содержания элемента в лишайнике к среднемировому показателю в золе растений по В.В. Добровольскому [16]. Проводилась проверка на нормальность распределения элементов в выборке тестом Колмогорова–Смирнова. Выборки были проанализированы на наличие крайних аномально низких и высоких значений и, в случае выявления таковых, эти данные не учитывались при расчёте средних, но принимались для общего обсуждения.

Результаты и их обсуждение

Полученные данные о химическом составе лишайников, отобранных на фоновых участках различных регионов, приводятся в табл. 1. Также для сравнения использованы фоновые концентрации эпифитных лишайников вида *Evernia*, представленные Р. Баргалы в его монографии [2].

Таблица 1. Сравнительная характеристика элементного состава эпифитных лишайников различных регионов (мг/кг в золе)
Table 1. Comparison of elemental composition of epiphytic lichens in different regions (mg/kg, ash)

Химические элементы, мг/кг Chemical elements, mg/kg	Томская обл., среднее $\pm\sigma$ (13 проб)* Tomsk region, average $\pm\sigma$ (13 samples)*	Кемеровская обл., среднее $\pm\sigma$ (3 пробы) Kemerovo region, average $\pm\sigma$ (3 samples)	Иркутская обл. (1 проба) Irkutsk region (1 sample)	Республика Бурятия, среднее $\pm\sigma$ (4 пробы) Republic of Buryatia, average $\pm\sigma$ (4 samples)	Австрия, Зиммеринг (1 проба) Austria, Simmering (1 sample)	Среднее по всем фоновым участкам Average meaning in all areas	Пределы фоновых концентраций [2], сухое в-во** Limits of background concentrations [2], dry substance**
Na, %	$0,7\pm0,2$ 0,28–1,04	$0,8\pm0,2$ 0,63–1,18	0,5	$1,5\pm0,7$ 0,43–2,1	0,7	$1,1\pm0,6$	Н.д.
Ca, %	$8,5\pm3,8$ 1,7–13,7	$12,4\pm3,7$ 8,47–16,03	12,0	$4,9\pm1,4$ 3,8–6,6	13,1	$8,8\pm4,5$	Н.д.
Sc	$7,9\pm3,4$ 3,9–15,9	$8\pm2,5$ 6,02–10,91	7,4	$8,5\pm0,8$ 7,6–9,6	4,5	$7,3\pm1,6$	Н.д.
Cr	$82,8\pm56,2$ 34,3–178	$67,8\pm23,6$ 53,8–95	57,3	42 ± 9 33–52	281,0	$87,7\pm68,5^{***}$	<1–5
Fe, %	$2,3\pm0,9$ 1,1–4,3	$2,3\pm0,7$ 1,9–3,1	1,9	$2,8\pm0,3$ 2,3–3,1	3,1	$2,7\pm0,5$	0,015–0,030
Co	$12,3\pm7,2$ 6–159	$13,2\pm2,8$ 11,5–16,6	16,9	$12,3\pm1,3$ 10,9–13,5	12,2	$15,3\pm6,5$	<0,1–0,2
Zn	1220 ± 395 921–1668	1349 ± 86 1250–1403	4316,0	987 ± 96 975–1099	2331,0	$1166\pm256^{***}$	20–70
As	$7,8\pm3,4$ Н.п.о.–9,2	$10,2\pm0,8$ Н.п.о.–10,67	Н.п.о.	$0,3\pm0,1$ 0,3–0,4	Н.п.о.	$5\pm4,3$	0,3–1,5
Br	$26,4\pm14,4$ 15,2–32,2	$16,4\pm7,6$ 160–173	47,5	115 ± 17 100–139	409,7	$130\pm30^{***}$	Н.д.
Rb	$80,8\pm20,5$ 49–100	$113,8\pm37$ 96–157	149,2	223 ± 161 127–464	112,1	188 ± 113	Н.д.
Sr	$389,6\pm138,4$ 236–565	516 ± 62 449–563	799	973 ± 486 516–1643	364	665 ± 397	5–20
Ag	Н.п.о.	$6,3\pm2,3$ 4,6–9	4,75	$4,43\pm2,9$ 1,8–8,6	0,8	$3,8\pm3$	<0,1–0,3
Sb	$3,4\pm2,1$ 0,9–7,7	$3,2\pm1,2$ 2,3–4,6	1,35	$1,1\pm0,4$ 0,8–1,7	8,6	$3,2\pm2,2$	<0,1–0,3
Cs	$3,0\pm1,7$ 1,6–6,8	$5,1\pm1,6$ 3,7–6,9	2,5	$4,2\pm1,6$ 3,3–6,7	4,1	$4,6\pm1,4$	Н.д.
Ba	523 ± 177 220–791	572 ± 67 517–647	5009	751 ± 183 526–915	547	$672\pm153^{***}$	8–20
La	$25,9\pm10,1$ 10–44,3	$24\pm5,8$ 20,3–30,76	23,7	$40,8\pm16,5$ 18,6–54,8	15,92	33 ± 13	Н.д.
Ce	$42,9\pm16,1$ 23,9–82,9	$42\pm10,7$ 34,6–54,6	39,3	$66,4\pm24,2$ 34,7–85,4	40,8	54 ± 19	Н.д.
Nd	$21,2\pm8,1$ Н.п.о.–30,3	$14,4\pm8,5$ 0,5–17,5	27,1	$31,9\pm16,7$ 14,4–47	3,7	22 ± 14	Н.д.
Sm	$3,8\pm1,4$ 1,5–6,5	$3,9\pm1,1$ 3,01–5,3	3,4	$4,2\pm1,1$ 2,7–5,1	2,6	$4,4\pm1,2$	Н.д.
Eu	$0,9\pm0,3$ 0,6–1,6	$0,8\pm0,3$ 0,6–0,9	0,7	$1,2\pm0,4$ 0,7–1,6	0,7	$1,0\pm0,4$	Н.д.
Tb	$0,6\pm0,2$ 0,3–3,5	$0,6\pm0,2$ 0,4–0,81	0,5	$0,6\pm0,2$ 0,4–0,9	0,3	$0,60\pm0,2$	Н.д.
Yb	$2,1\pm0,7$ 1–3,5	$1,5\pm0,5$ 1,1–2,1	1,9	$1,2\pm0,8$ 0,2–2,2	0,8	$1,7\pm0,9$	Н.д.
Lu	$0,3\pm0,1$ 0,14–0,5	$0,3\pm0,04$ 0,26–0,34	0,3	$0,2\pm0,02$ 0,2–0,6	0,2	$0,3\pm0,1$	Н.д.
Hf	$3,7\pm1,4$ 2,4–6,9	$2,9\pm1,0$ 2,1–4,0	2,6	$4,5\pm2$ 2,1–6,7	1,4	$4\pm1,6$	Н.д.
Ta	$0,8\pm0,3$ 0,5–1,6	$0,6\pm0,5$ 0,6–0,7	0,2	$0,9\pm0,5$ 0,002–1,5	0,2	$0,8\pm0,3$	Н.д.

Окончание табл. 1

Table 1.

Химические элементы, мг/кг Chemical elements, mg/kg	Томская обл., среднее ±σ (13 проб)* Tomsk region, average ±σ (13 samples)*	Кемеровская обл., среднее ±σ (3 пробы) Kemerovo region, average ±σ (3 samples)	Иркутская обл. (1 проба) Irkutsk region (1 sample)	Республика Бурятия, среднее ±σ (4 пробы) Republic of Buryatia, average ±σ (4 samples)	Австрия, Зиммеринг (1 проба) Austria, Simmering (1 sample)	Среднее по всем фоновым участкам Average meaning in all areas	Пределы фоновых концентраций [2], сухое в-во** Limits of background concentrations [2], dry substance**
Au	0,06±0,02 Н.п.о.-0,064	Н.п.о.	0,047	Н.п.о.	0,06	0,24±0,007	Н.д.
Th	5,9±3,1 2,7-12,6	4,3±0,1 4,2-4,4	4,4	8,9±3,2 4,5-12	3,6	7,4±3,2	Н.д.
U	3,4±2,1 1-6	2,34±0,9 1,5-3,3	2,1	4,7±2,2 1,5-633	0,002	4,3±1,9	Н.д.
Ad,%	4,1	4,7	3,4	4,4	1,3	3,6	Н.д.
La/Yb	12,1	15,6	12,5	34,6	19,5	19,4	Н.д.
Th/U	1,7	1,9	2,1	1,9	>>5	1,7	Н.д.

Н.д. – нет данных; Н.п.о. – ниже предела обнаружения метода; * – усреднённое значение по данным мониторинга 2006 [8] и 2013 гг.; ** – диапазоны фоновых концентраций [2] в воздушно-сухой массе эпифитных лишайников-биомониторов Evernia (с небольшой степенью воздействия почвы и атмосферных поллютантов), полученные в результате обобщения данных по материалам многих исследователей; *** – среднее по фоновым участкам без учёта вклада anomalously высоких значений для территорий Иркутской обл. (Zn, Ba), Австрии (Zn, Cr, Br). Синим выделены элементы, с близкими, относительно выдержанными уровнями накопления.

Н.д. there is no data; H.n.o. is below detection limit of the method; * is the average value by the data of monitoring of 2006 [8] and 2013; ** are the ranges of background concentrations [2] in air-dry weight of epiphytic lichens biomonitors Evernia (with a low degree of effect of soil and atmosphere pollutants) obtained as a result of data generalization by the materials of different researchers; *** is the average meaning by the background areas neglecting the impact of anomalously high values for Irkutsk region (Zn,Ba), Austria (Zn,Cr,Br). The elements marked with blue color are with close, relatively recurrence accumulation levels.

Средние значения химических элементов в лишайниках всех фоновых районов представлены на рис. 2.

Анализ табличных данных (табл. 1) и круговых диаграмм (рис. 3) свидетельствует о достаточно близких уровнях накопления, укладывающихся в доверительный интервал определений таких 16 элементов, как La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Hf, Th, Sc, Fe, Co, Na, Rb, Cs, а также группы из 12 элементов: Cr, Zn, As, Br, Sr, Ag, Sb, Ba, Nd, Ta,

Au, U, для которых наблюдаются более значимые различия в оценке их средних для каждого типа фоновых участков.

Можно высказать предположение, что первая группа элементов, по-видимому, обусловлена общим глобальным фактором накопления элементов в атмосфере, например, общий пылевой перенос минерального вещества почв и пород земной коры наноразмерного уровня (Th, Hf, Sc и значительная часть редких земель) и др.

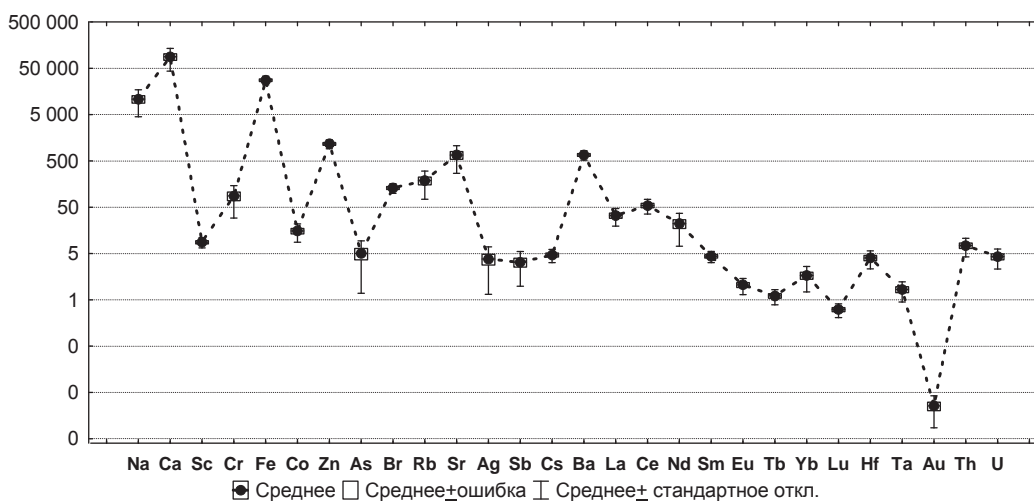


Рис. 2. Средние содержания химических элементов в золе лишайников фоновых районов и доверительный интервал их определения, мг/кг, шкала логарифмическая

Fig. 2. Average content of chemical elements in lichen ash in reference areas and confidence interval of their determination, mg/kg, logarithmic scale

Тогда как вторая группа элементов, по-видимому, отражает как природные ландшафтно-геохимические и геологические особенности расположения оцениваемых фоновых участков, так и специфику региональных техногенных потоков. К последнему можно отнести накопление ряда химических элементов в лишайниках Австрийских Альп, который характеризуется минимальными содержаниями большинства изученных компонентов. Исключение составляет хром, бром, некоторое повышенное значение сурьмы и золота. Повышенные содержания хрома и брома, приближающиеся к таковым для районов нефтегазодобычи на севере Томской области [7], возможно отражают влияние нефтеперерабатывающих, а хром – металлообрабатывающих производств предприятий Австрии, Германии, Швейцарии.

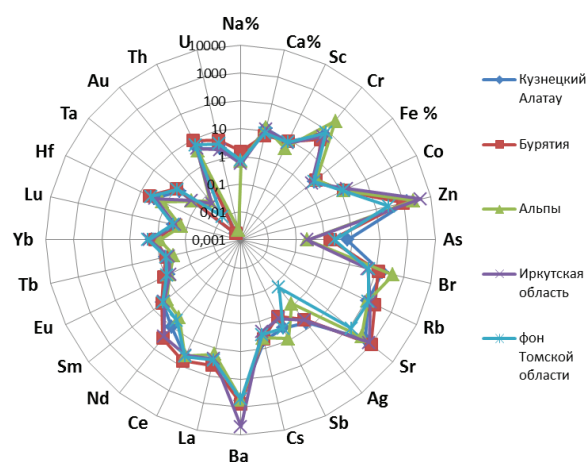


Рис. 3. Содержания элементов в золе лишайников различных регионов, мг/кг, шкала логарифмическая

Fig. 3. Content of elements in lichens's ash of different regions, mg/kg, logarithmic scale

На наш взгляд, наиболее ярким примером влияния ландшафтно-геохимического и литогенного факторов на особенности химического состава лишайника является территория Баргузино-Чевыркуйского перешейка (БЧП) озера Байкал, расположенного в пределах развития Ангаро-Витимского гранитоидного батолита, имеющего ярко выраженную радиогеохимическую специфику по Th и U (рис. 4) и характеризующегося проявлением активных современных геологических и рудообразующих процессов [17, 18].

Район БЧП расположен на территории Забайкальского национального парка и входит в перечень особо охраняемых территорий России. Участок пробоотбора характеризуется наличием геохимической аномалии. По мнению Л.П. Рихванова [18], наличие данного специализированного радиогеохимического комплекса пород может обеспечивать при их выветривании выщелачивание урана и его поступление на те или иные геохимические барьеры. Об этом свидетельствуют аномально высокие концентрации урана и неодима в донных отложениях ручья Арангатуй, в торфяниках. По

данным А.А. Мясникова с соавторами [17] в коренных породах (гранитах), илах, поверхностных водах определяются высокие концентрации Sr, Th, U, Ba, TR. Эти данные хорошо коррелируют с результатами исследования элементного состава лишайников, в золе которых наблюдается повышенное (в сравнении с другими изучаемыми районами) содержание урана, до 6,3 г/т в золе, учитывая тот факт, что питание лишайников преимущественно атмосферное. Помимо урана, некоторое повышенное концентрирование наблюдается для Na, Rb, Sr, Ba, Hf, Ta, Th, группы редких земель (La, Ce, Nd), отражающих специфику гранитного субстрата данного района. Атмосферные выпадения поступают в лишайники либо в жидком состоянии (осадки), либо в сухом – вследствие седиментации аэрозолей. Кроме того, минеральные вещества могут попадать в лишайники в виде пыли, содержащей многие химические элементы [20].

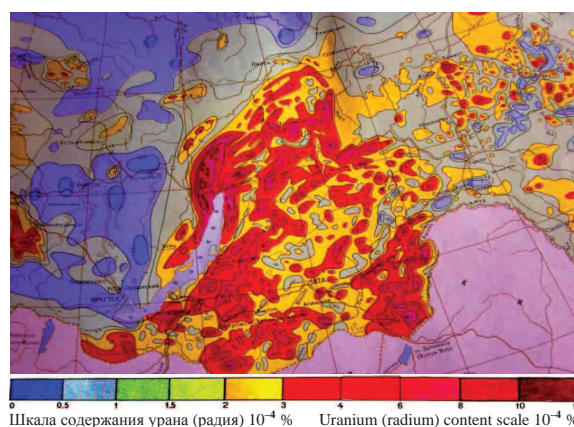


Рис. 4. Фрагмент карты содержания урана (радия) территории России в районе Бурятии и рассматриваемой территории БЧП [19]

Fig. 4. Fragment of the map of uranium (radium) content of the territory of the Russian Federation in Buryatia and the territory of Barguzin-Chevyrkuy isthmus [19]

Почвы БЧП преимущественно щебнистые, легкосмываемые осадками и развеваемые ветром при отсутствии растительности. Таким образом, высокие концентрации перечисленных химических элементов можно объяснить выветриванием и переносом мельчайших частичек почв, коренных пород, капель воды, их захват и поглощение лишайниками. Тогда как поступление химических элементов из почвы по схеме корни–древесина–кора–лишайник возможно, но не доказано [2].

В литературе встречается информация о воздействии на лишайники источников естественной радиоактивности, в т. ч. рудников по добыче урана [20]. Так, в работе [21] Дж. МакНил с соавторами приводит информацию о накоплении урана лишайниками, произрастающими в районе добычи урановых руд; в публикации [22] аналогично указано на то, что концентрации урана в растениях, в т. ч. лишайниках, отражают концентрации такового в почвах и коренных породах. По информа-

ции [23] захват частиц лишайниками и мхами в районах урановых рудников является важным элементом накопления химических веществ. Данные, представленные в табл. 2, подтверждают вышеприведённые выводы и демонстрируют тесную связь между элементами, содержащимися в коренных породах с таковыми в лишайниках, произрастающих на БЧП.

Таблица 2. Некоторые химические элементы гранитов, илистых отложений, воды поверхностного источника (по А.А. Мясникову [17]), лишайников Баргузино-Чивыркуйского перешейка, мг/кг

Table 2. Some chemical elements of granites, silt deposits, water of surface source (by А.А. Myasnikov [17]), lichens of Barguzin-Chevyrkuy isthmus, mg/kg

Химические элементы, мг/кг Chemical elements, mg/kg	Лейкокраповые граниты Ангаро-Витимского батолита у ист. Арангатуйский Leucocratic granites of Angara-Vitim batholite near the source Arangatuyusky	Ил ист. Арангатуйский Silt of the source Arangatuyusky	Вода ист. Арангатуйский, мкг/дм ³ Water of the source Arangatuyusky, мкг/дм ³	Лишайник (зола)/лишайник (в пересчёте на сухое вещество), наши данные Lichen (ash)/lichen (equivalent to dry substance), the authors' data
Sr	343,2	289,4	98	973,1/38,9
Cs	<0,1	1,1	<0,001	4,23/0,17
Th	79,2	25,25	<0,01	8,94/0,36
U	11,8	150,1	2,3	4,65/0,19
Th/ U	6,7	0,2	0,002	1,92

Томский район Томской области характеризуется такими специфичными производствами как атомная энергетика, теплоэнергетика, нефтехимическая промышленность (Томск-Северская промышленная зона). Выбранный нами фоновый участок Томского района находится к югу, юго-западу от г. Томска и Северска (пробы отбирались близ нескольких населённых пунктов, удалённых от Томска на 10–50 км), в противоположную сторону от основного направления розы ветров. Эти территории мало подвержены влиянию Томск-Северской промышленной зоны (подветренная сторона). Тем не менее, лишайники, отобранные в данном районе, характеризуются повышенными значениями Уб, что может свидетельствовать об опосредованном влиянии предприятий ядерно-топливного цикла.

Район отрогов Кузнецкого Алатау, который может служить региональным фоном, несмотря на удалённость от горнодобывающих и металлургических предприятий Кузбасса, характеризуется природными геохимическими особенностями, – это известный золотодобывающий район. В районе пробоотбора подстилающие породы сложены тектонически нарушенными гранитами с повышенной радиоактивностью, обусловленной неравномерным распределением естественных радиоэлементов. Эти особенности отражаются и в химическом составе лишайников региона, характеризующихся повышенными содержаниями тория и урана, приближающиеся к таковым для района влия-

ния Томск-Северской промышленной зоны [7]. Также повышенные значения наблюдаются для Ag, As, Br, Ca, Cs, вероятно, связанные с влиянием горнодобывающих и металлургических предприятий Кемеровской области. Так, по данным С.И. Арбузова и В.В. Ершова, угли Кузнецкого бассейна специализированы на мышьяк, серебро, уран и др. элементы; по среднему содержанию обогащены в числе прочих химических элементов и бромом [24].

Следующий участок отбора лишайников находится в с. Голуметь Черемховского района Иркутской области (от районного центра, п. Черемхово, с. Голуметь находится на расстоянии около 60 км). В отобранном эпифитном лишайнике установлены повышенные содержания Ba, Sr, Nd, Zп, Со. Данный факт можно объяснить как дальним переносом загрязняющих веществ, так и влиянием природного геохимического фона, связанного с выходом угольных пластов (в Черемховском районе эксплуатируется открытым способом каменное угольное месторождение). Загрязнение природной среды района является следствием выбросов предприятий угольной промышленности, большого количества мелких котельных, жилого сектора с печным отоплением. Активное концентрирование лишайниками цинка (4316 мг/кг в золе) можно объяснить тем, что данный металл является элементом накопления почв района угольных месторождений [25].

Таблица 3. Коэффициенты биологического поглощения химических элементов относительно среднемировых содержаний в золе растений (по В.В. Добровольскому [16])

Table 3. Factor of chemical elements biological absorption relative to worldwide average content in plant ash (by V.V. Dobrovolsky [16])

Элемент Element	Cr	Fe	Zn	Ba	U	Br	Co	Ag	La	Rb	Cs	Sr	Hf	As
Регион/Region														
Австрия/Austria	+	+	+	-	-	+	x	x	x	-	x	x	x	-
Ирк. обл. Irkutsk region	+	+	+	+	x	-	+	+	+	x	-	x	-	-
БЧП/ВЧП	x	+	+	+	x	+	x	+	+	+	+	x	-	-
Кузн. Ал. Kuznetsky Ala Tau	+	+	+	x	x	+	+	+	+	x	+	-	-	+
Том. обл. Tomsk region	+	+	+	x	x	-	x	-	+	-	+	-	-	-

Примечание: «+» – элемент встречается с Кп>1,5; «x» – элемент встречается с Кп 1,1–1,5; «-» – элемент имеет Кп<1; все другие (не приведённые в таблице) 14 элементов имеют Кп<<1

Note: BChl is the Barguzin-Chevyrkuy isthmus; «+» the element is found out with coefficient of biological absorption>1,5; «x» the element is found out with coefficient of biological absorption 1,1–1,5; «-» the element has coefficient of biological absorption<1; all the rest 14 elements (they are not given in the table) have coefficient of biological absorption<<1

Поскольку очевидны влияния природных и техногенных факторов на элементный состав эпифитных лишайников, мы произвели нормирова-

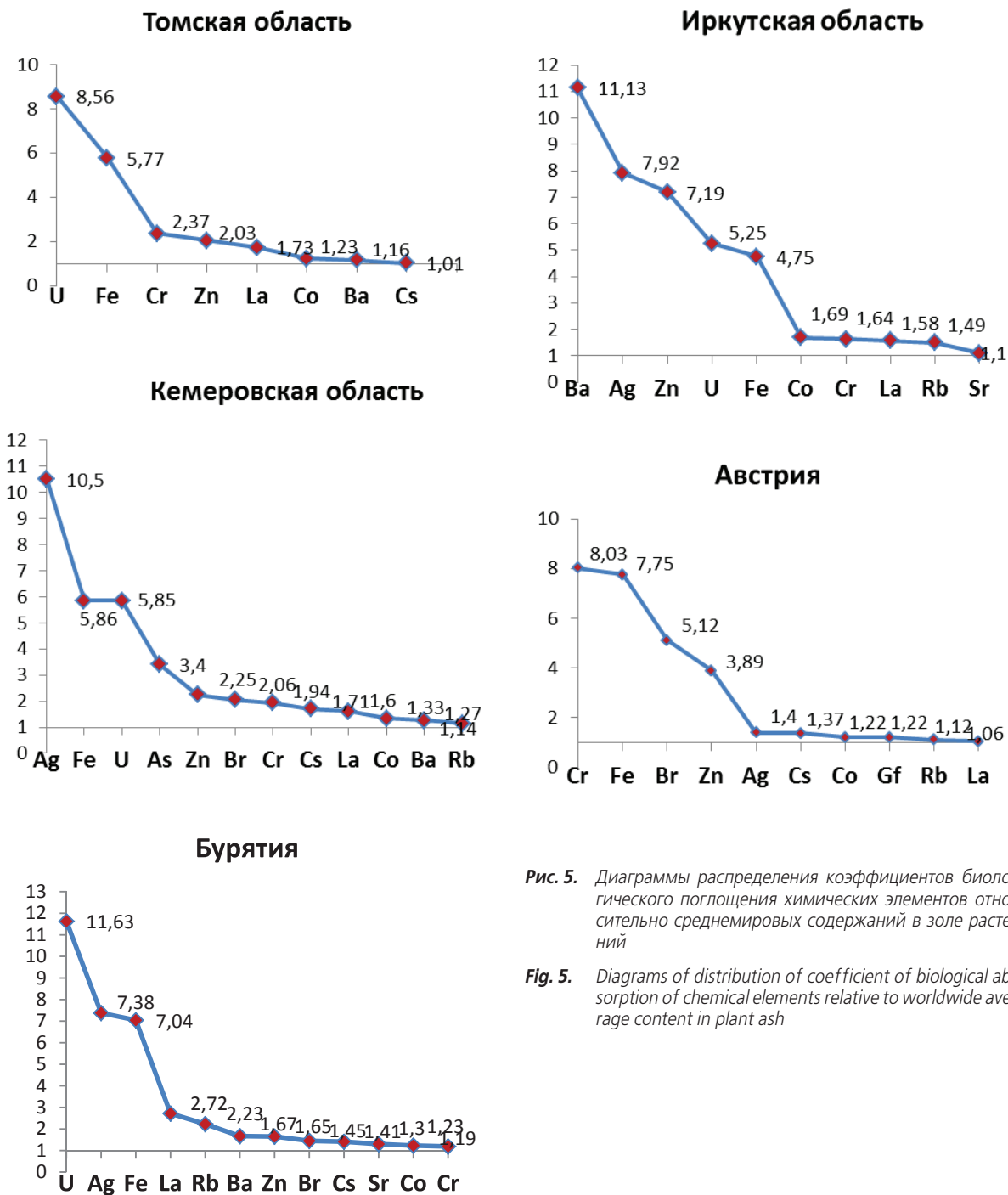


Рис. 5. Диаграммы распределения коэффициентов биологического поглощения химических элементов относительно среднемировых содержаний в золе растений

Fig. 5. Diagrams of distribution of coefficient of biological absorption of chemical elements relative to worldwide average content in plant ash

ние концентраций химических элементов в лишайниках к кларкам концентраций в верхней континентальной коре по Н.А. Григорьеву. Полученные коэффициенты концентрации K_k в каждой из выборок показали, что для лишайников Томской области и Альпийского региона $K_k > 1$ для всех элементов, для Кузнецкого Алатау выделяется K_k для Ag (2,3), для лишайников Бурятии K_k также для Ag (1,5), для лишайников Иркутской области K_k для Zn (1,9), для Ag (1,2).

Также нами вычислены коэффициенты биологического поглощения (K_p) относительно средне-

мировых содержаний изучаемого элемента в золе растений, подсчитанных В.В. Добровольским [16]. Коэффициенты биологического поглощения ($K_p > 1$) для химических элементов в лишайниках изучаемых нами регионов представлены в табл. 3.

Диаграммы распределения коэффициентов биологического поглощения для лишайников Томской области, Кузнецкого Алатау, Бурятии, Иркутской области, Австрии представлены на рис. 5.

В табл. 4 представлена матрица связей химических элементов изучаемых фоновых районов, которая показывает значимые связи практически

Таблица 4. Корреляционная матрица для выборки по фоновым районам в целом (n=24)
Table 4. Correlation Matrix for background regions selection in general (n=24)

Sm	Ce	Ca	Lu	U	Th	Cr	Yb	Au	Hf	Ba	Sr	Nd	As	Br	Cs	Ag	Tb	Sc	Rb	Fe	Zn	Ta	Co	Na	Eu	La	Sb		
1,0	0,6	-0,8	0,7	0,7	0,8	-0,1	0,3	-0,4	0,9	-0,1	-0,1	0,1	0,4	0,0	-0,3	0,4	0,7	0,8	0,2	0,7	-0,3	0,7	0,5	0,5	0,8	0,8	0,1	Sm	
	1,0	-0,7	0,0	0,6	0,7	-0,3	-0,3	-0,3	0,8	-0,1	0,4	0,0	0,1	0,2	-0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,5	-0,3	0,7	0,1	0,9	0,8	0,9	-0,3	Ce	
		1,0	-0,5	-0,8	-0,9	0,1	-0,3	0,3	-0,8	0,1	-0,4	-0,3	-0,2	0,1	0,3	-0,5	-0,5	-0,8	-0,6	-0,8	0,3	-0,8	-0,3	-0,7	-0,9	-0,9	0,1	Ca	
			1,0	0,5	0,4	0,1	0,8	-0,4	0,5	-0,1	-0,3	0,2	0,5	-0,1	-0,3	0,5	0,7	0,9	0,2	0,5	-0,2	0,5	0,6	-0,1	0,5	0,3	0,2	Lu	
				1,0	0,8	-0,1	0,3	-0,6	0,8	-0,2	0,4	0,3	0,3	-0,1	-0,5	0,3	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	-0,5	0,9	0,3	0,5	0,7	0,7	-0,1	U
					1,0	-0,2	0,2	-0,4	0,9	-0,2	0,3	0,3	0,1	-0,2	-0,3	0,2	0,5	0,6	0,4	0,7	-0,4	0,8	0,2	0,7	0,9	0,9	-0,2	Th	
						1,0	0,2	0,5	-0,2	-0,2	-0,5	-0,3	0,2	-0,6	0,6	0,1	-0,2	-0,1	-0,1	0,4	0,1	-0,2	0,3	-0,4	-0,2	-0,4	1,0	Cr	
							1,0	-0,1	0,1	0,1	-0,2	0,3	0,4	-0,4	-0,2	0,5	0,3	0,7	0,4	0,3	0,1	0,2	0,6	-0,4	0,1	0,0	0,3	Yb	
								1,0	-0,5	0,5	-0,2	-0,2	-0,4	-0,2	0,5	-0,3	-0,4	-0,5	-0,2	-0,1	0,8	-0,6	0,0	-0,3	-0,3	-0,4	0,4	Au	
									1,0	-0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	-0,4	0,3	0,7	0,7	0,2	0,7	-0,4	0,8	0,2	0,8	0,9	0,9	-0,2	Hf	
										1,0	0,2	0,1	-0,3	0,1	-0,4	-0,4	-0,1	-0,1	-0,1	-0,4	0,9	-0,3	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,3	Ba	
											1,0	0,5	-0,4	0,3	-0,3	0,2	-0,2	0,0	0,7	-0,1	-0,1	0,4	-0,3	0,5	0,1	0,4	-0,5	Sr	
												1,0	-0,4	0,0	-0,5	0,2	0,1	0,4	0,6	0,1	-0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	-0,4	Nd	
													1,0	-0,1	-0,2	0,4	0,3	0,4	0,0	0,2	-0,3	0,2	0,4	-0,1	0,1	0,0	0,4	As	
														1,0	-0,2	0,1	0,4	0,1	-0,2	-0,2	0,0	0,0	-0,3	0,3	0,0	0,1	-0,5	Br	
															1,0	0,2	-0,3	-0,4	-0,1	0,2	0,0	-0,3	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3	0,6	Cs	
																1,0	0,4	0,7	0,5	0,6	-0,3	0,4	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	Ag	
																	1,0	0,7	-0,2	0,6	-0,3	0,4	0,1	0,3	0,6	0,5	0,0	Tb	
																		1,0	0,4	0,7	-0,3	0,6	0,5	0,3	0,6	0,6	0,0	Sc	
																			1,0	0,3	-0,1	0,5	0,4	0,2	0,3	0,3	-0,1	Rb	
																				1,0	0,4	0,6	0,3	0,4	0,7	0,6	0,5	Fe	
																					1,0	-0,4	0,2	-0,4	-0,4	-0,4	0,0	Zn	
																						1,0	0,2	0,7	0,7	0,8	-0,1	Ta	
																							1,0	-0,2	0,3	0,1	0,3	Co	
																								1,0	0,8	0,9	-0,4	Na	
																									1,0	0,9	-0,1	Eu	
																										1,0	-0,3	La	
																											1,0	Sb	

всех литофильных элементов (TR, актиноидов). Особенно примечательно, что железо коррелирует почти с большинством изученных элементов. Множественные положительные связи наблюдаются и для скандия (Sm, Lu, U, Th, Hf, Nd, As, Ag, Tb). Для элементов преимущественно антропогенного происхождения (Cr, Br, Sb, Ag, Cs, As, Sr) такие связи отсутствуют, за исключением Zn-Ba-Au и Sr-Rb-Nd. Данное наблюдение подтверждает, что

влияние антропогенных источников на изучаемые фоновые районы минимально и в большей степени имеет место захват частиц, поступающих в атмосферу с почвенной пылью.

Анализ дендрограммы корреляционных матриц геохимического спектра золы лишайников фоновых районов в целом (рис. 6) показывает значимые корреляционные связи La-Eu-Hf-Th; Tb-Sc-Lu-Sm; Na-Ce; Ta-U; Rb-Sr; Zn-Ba; Sb-Cr. Что под-

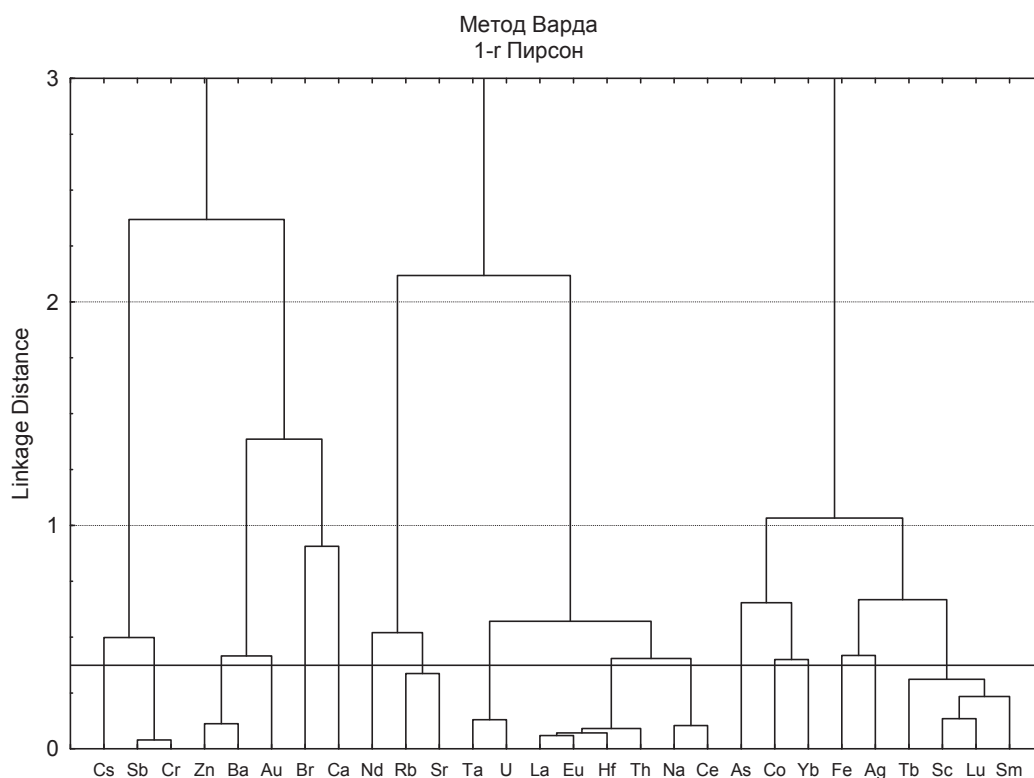


Рис. 6. Дендрограмма корреляционной матрицы (метод Варда, 1-Пирсон $r_{0,05}=0,37$, $n=24$)

Fig. 6. Dendrogram of correlation matrix (Ward method, 1-Pearson $r_{0,05}=0,37$, $n=24$)

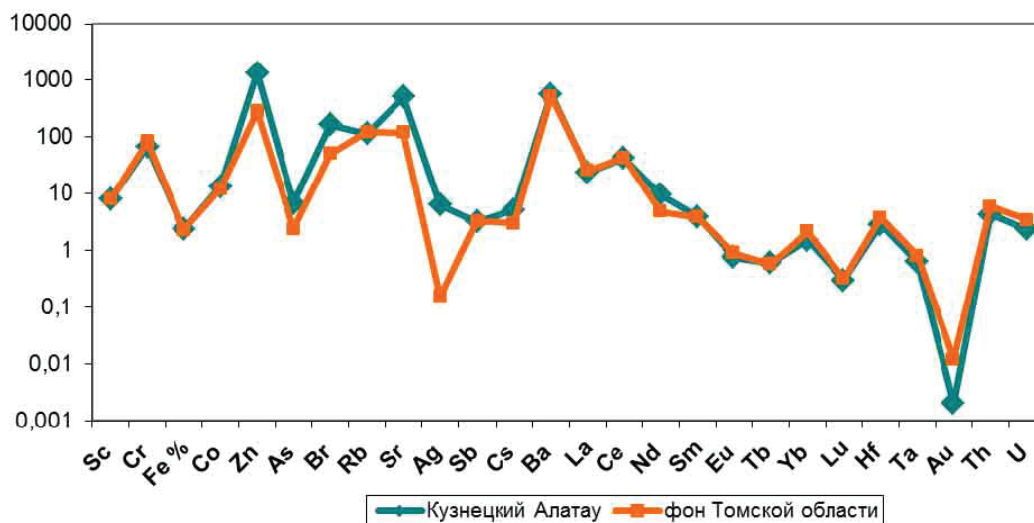


Рис. 7. Уровни содержания химических элементов в лишайниках фоновых районов Западносибирского региона, мг/кг в золе

Fig. 7. Levels of chemical elements content in lichens of background areas of Western-Siberian region, mg/kg in ash

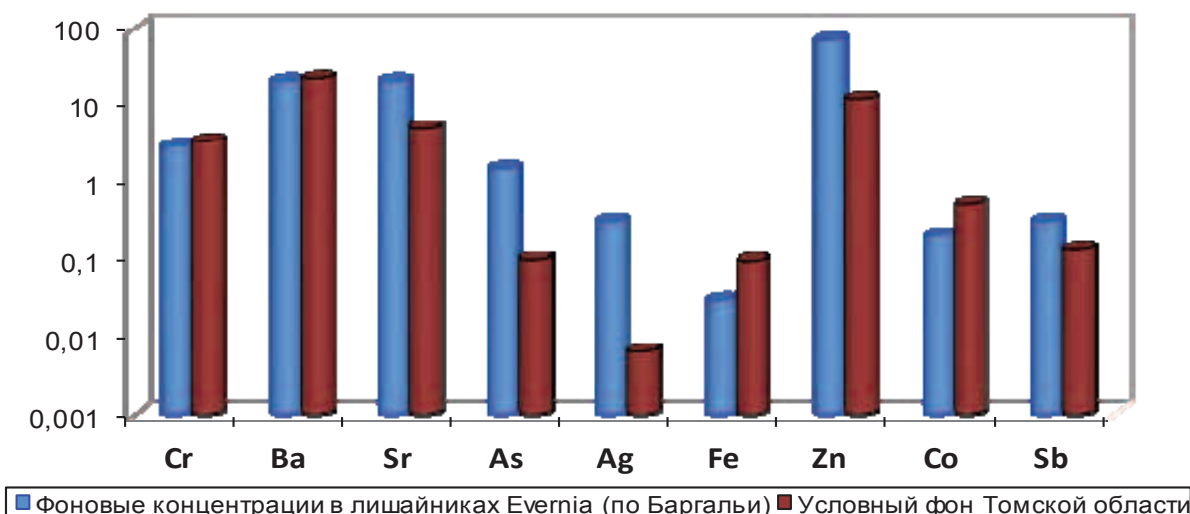


Рис. 8. Средние концентрации элементов в лишайниках Томского района (в пересчёте на сухое в-во) и фоновых территорий (по Р. Баргальи), в мг/кг. Шкала логарифмическая

Fig. 8. Average concentrations of elements in lichens of Tomsk region (equivalent to dry substance) and background areas (by R. Bargalie), mg/kg. The scale is logarithmic

тверждает вышеприведённый вывод о приоритетном поступлении следовых элементов в атмосферу от природных источников.

В результате сравнения между собой химического состава эпифитных лишайников, отобранных в различных регионах с низкой степенью антропогенной нагрузки, очевидно преобладание природного геохимического фактора. Абсолютные фоновые концентрации, вероятнее всего, установить маловероятно. Тем не менее, по материалам, представленным в данной работе, выбор фонового участка для Сибири можно сделать в пользу Томского района (рис. 7), нивелируя лишь несколько повышенный уровень актиноидов вследствие определённого влияния Томск-Северской промышленной зоны. К тому же при выявлении фоновых концентраций в лишайниках в первую очередь должны рассматриваться относительно незагрязнённые места с климатическими и другими характеристиками среды, соответствующие таковым изучаемого района [2].

В подтверждение выбора фона для Сибирского региона приводится сравнение химического состава лишайника Томского района (преимущественно вид *Evernia*) с фоновыми концентрациями элементов в лишайниках-биомониторах того же вида (данные получены Р. Баргальи при обобщении информации о содержаниях элементов в лишайниках) (рис. 8).

Заключение

По результатам исследования можно с уверенностью судить о хороших биомониторных свойствах эпифитных лишайников и рекомендовать их в качестве основного объекта исследований при оценке как техногенной трансформации природных сред, так и степени влияния природных геохимических особенностей.

Нами установлено, что на химический состав эпифитных лишайников рассмотренных районов, практически не подверженных техногенному влиянию, влияет как перенос загрязняющих веществ, так и природные геохимические факторы.

Высокие концентрации в лишайниках урана, а также повышенные содержания Na, Rb, Sr, Ba, Hf, Ta, Th, группы редких земель отражают влияние гранитного субстрата района БЧП, имеющего радиогеохимическую специфику по Th и U.

Повышенные содержания Sr и Br, установленное в лишайниках Альп, отражают влияние нефтеперерабатывающих и металлообрабатывающих производств предприятий Центральной Европы.

Подстилающие породы отрогов Кузнецкого Алатау, имеющие повышенную радиоактивность, которая обусловлена неравномерным распределением естественных радиоэлементов, определяют повышение содержаний в лишайниках тория и урана. Увеличение концентраций Ag, As, Br, Ca, Cs, вероятно, обусловлено влиянием горнодобывающих и металлургических предприятий Кемеровской области.

Химический состав лишайников Иркутской области, характеризующийся повышенными содержаниями Ba, Sr, Nd, Zn, Co, определяется характером природного геохимического фона, связанного с выходом угольных пластов.

Наиболее низкие концентрации изученных элементов (в 1,5–3 раза, в случае концентраций Ba и Br в 10–15 раз ниже), в сравнении с другими изученными нами фоновыми участками, наблюдаются в лишайниках Томского района, имея лишь несколько повышенный уровень Yb, что может свидетельствовать об опосредованном влиянии предприятий ядерно-топливного цикла.

В дальнейшем при изучении химического состава лишайников, отобранных в зонах влия-

ния промышленных предприятий каждого из изученных регионов, несомненно, можно использовать полученные данные в качестве местного фона.

Что касается выбора регионального фона для Сибири, на наш взгляд, наиболее всего подходит

элементный состав эпифитных лишайников Томского района, который характеризуется незначительным влиянием промышленных предприятий и отсутствием каких-либо выявленных геохимических аномалий коренных пород и подстилающей поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Израэль Ю.А. Глобальная система наблюдений. Прогноз и оценка изменений состояния окружающей среды. Основы мониторинга // *Метеорология и гидрология*. – 1974. – № 7. – С. 3–8.
2. Баргальи Р. Биогеохимия наземных растений / пер. с англ. И.Н. Михайловой. – М.: ГЕОС, 2005. – 457 с.
3. Галанин А.А., Глушкова О.Ю. Лихенометрия // *Вестник РФФИ*. – 2003. – № 3. – С. 3–38.
4. Инсаров Г.Э., Инсарова И.Д. Оценка чувствительности лишайников к изменению климата // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. – 2000. – Т. 17. – С. 106–121.
5. Пчелкин А.В. Использование лишайников для мониторинга изменений состояния природной среды // *Научные аспекты экологических проблем России*. – Москва: Наука, 2002. – С. 275–280.
6. Московченко Д.В., Валева Э.И. Содержание тяжёлых металлов в лишайниках на Севере Западной Сибири // *Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения*. – 2011. – № 11. – С. 162–172.
7. Большунова Т.С., Рихванов Л.П., Барановская Н.В. Элементный состав лишайников как индикатор загрязнения атмосферы // *Экология и промышленность России*. – 2014. – № 11. – С. 26–31.
8. Шатилова С.С. Геохимические особенности распределения микроэлементов в золе лишайников (*Evernia mesomorpha*) Томского района // *Проблемы геологии и освоения недр: Труды XI Междунар. симпозиума им. академика М.А. Усова студентов и молодых учёных*. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 619–621.
9. Bargagli R., Nimis P.L. Guidelines for the use of epiphytic lichens as biomonitors of atmospheric deposition of trace elements. *Monitoring with Lichen – Monitoring Lichens. NATO Science Series IV, Earth and Environmental Science* / Eds. P.L. Nimis, C. Scheidegger, P.A. Wolseley. – Dordrecht: Kluwer, 2002. – P. 295–299.
10. Окснер А.Н. Определитель лишайников СССР. Морфология, систематика и географическое распространение. Вып. 2. – Л.: Наука, 1974. – 284 с.
11. Bargagli R., D'Amato M.L., Iosco F.P. Lichen monitoring of metals in the San Rossore park: contrast with previous pine needle data // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 1987. – V. 9. – P. 285–294.
12. Sloof J.E., Wolterbeek B.Th. Interspecies comparison of lichen as biomonitors of trace element air pollution // *Environmental Monitoring Assessment*. – 1993. – V. 25. – P. 149–157.
13. Страховенко В.Д., Щербов Б.Л., Хожина Е.И. Распределение радионуклидов и микроэлементов в лишайниковом покрове различных регионов Западной Сибири // *Геология и геофизика*. – 2005. – Т. 46. – № 2. – С. 206–216.
14. ГОСТ 27784–88. «Почвы. Метод определения зольности торфяных и оторфованных горизонтов почв». – М.: Изд-во стандартов. 1988. – 8 с.
15. Фортескью Дж. Геохимия окружающей среды / сокр. пер. с англ. И.И. Альтшулера, А.В. Мартынова. – М.: Прогресс, 1985. – 360 с.
16. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. – М.: Академия, 2003. – 400 с.
17. Современное формирование урановой осадочно-инфильтрационной (гидрогенной) минерализации Баргузино-Чивыркуйского перешейка на озере Байкал / А.А. Мясников и др. // *Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Современное минералообразование: Труды II Всеросс. симпозиума с междунар. участием и VIII Всеросс. чтений памяти академика А.Е. Ферсмана*. – Чита, 2008. – С. 93–96.
18. Новые данные о радиогеохимических особенностях природных сред Баргузино-Чивыркуйского перешейка (оз. Байкал) и Тункинской котловины / Л. П. Рихванов и др. // *Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Матер. IV Междунар. конф.* – Томск, 2013. – С. 441–444.
19. Карта содержания урана (радия) территории России. Масштаб 1:10 000000 / ред. Г.Н. Михайлов. – Спб.: Комитет Российской Федерации по геологии и использованию недр: Всероссийский научно-исследовательский институт разведочной геофизики, 1995.
20. Бязров Л.Г. Лишайники в экологическом мониторинге. – М.: Научный мир, 2002. – 336 с.
21. Role for lichen melanins in uranium remediation / J. McLean et al. // *Nature*. – 1998. – V. 391. – № 6668. – P. 645–650.
22. Sheppard M.I., Thibault D.H. Natural uranium concentrations of native plants over a low-grade body // *Canadian Journal of Botany*. – 1984. – V. 62. – P. 1069–1075.
23. Nierboer E., Richardson D.H.S. Lichens as monitors of atmospheric deposition // *Atmospheric pollutants in Natural Waters* // ed. by S.J. Eisenreich. – Ann Arbor, Mich.: Ann Arbor Science, 1981. – P. 339–388.
24. Арбузов С.И., Ершов В.В. Геохимия редких элементов в углях Сибири. – Томск, ИД «Д-принт», 2007. – 468 с.
25. Евлампиева Е.П., Панин М.С. Накопление цинка, меди, свинца лишайником в районе угледобывающего месторождения «Каражыра» // *Вестник Томского государственного университета*. – 2008. – № 314. – С. 196–200.

Поступила 30.06.2015 г.

UDC 550.47+504.064.36

ON THE ISSUE OF CHOOSING THE BACKGROUND CONCENTRATIONS OF CHEMICAL ELEMENTS IN THE EPIPHYTIC LICHENS

Tatiana S. Bolshunova,

JSC «TomskNIPneft», 72, Mira Avenue, Tomsk, 634027, Russia;
National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: BolshunovaTS@gmail.com

Leonid P. Rikhvanov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: Rikhvanov@tpu.ru

Natalia V. Baranovskaya,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,
634050, Russia. E-mail: Natalia.baranovs@mail.ru

The relevance of the research. For comparison of data obtained in studies of polluted urban areas, it is necessary to have background levels of concentrations of the identified chemical elements in environment.

The main aim of the study is to evaluate the influence of ecological and geochemical factors on the levels of accumulation of chemical elements in epiphytic lichens collected in areas practically unaffected by anthropogenic activity.

The methods used in the study: the method of instrumental neutron activation analysis (data on 28 chemical elements in the ash of lichens); statistical analysis.

The results. It was determined that the lichen chemical composition reflects natural geochemical features of bed rocks and soils in the territory of their growing. The data indicate a fairly close levels of accumulation, which is defined as the confidence interval of defining 16 elements such as La, Ce, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Hf, Th, Sc, Fe, Co, Ca, Na, Rb, Cs, and group of 12 elements: Cr, Zn, As, Br, Sr, Ag, Sb, Ba, Nd, Ta, Au, U, for which there are more significant differences in the assessment of their average for each of the background regions studied. Elemental composition of the epiphytic lichens on Tomsk region was recommended as regional background for Siberia. This area is characterized by negligible industrial influence and by absence of geochemical anomalies of bed rocks and underlying surface.

Kew words:

Atmosphere pollution, background areas, concentrations of chemical elements, epiphytic lichens, predominance of natural geochemical factor.

REFERENCES

1. Izraeli Yu.A. Globalnaya sistema nablyudeni. Prognoz i otsenka izmeneniy sostoyaniya okruzhayushhey sredy. Osnovy monitoringa [Global observation system. Prediction and assessment of changes in environmental conditions. Fundamentals of monitoring]. Meteorologiya i gidrologiya, 1974, no. 7, pp. 3–8.
2. Bargagli R. Trace elements in terrestrial plants. An ecophysiological approach to biomonitoring and biorecovery. Berlin, Springer-Verlag, 1998. 324 p.
3. Galanin A.A., Glushkova O.Yu. Likhnometriya [Lichenometry]. Vestnik RFFI, 2003, no. 3, pp. 3–38.
4. Insarov G.E., Insarova I.D. Otsenka chuvstvitelnosti lishaynikov k izmeneniyu klimata [Assessment of lichen sensitivity to climate changes]. Problemy ekhologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ehkositsem, 2000, vol. 17, pp. 106–121.
5. Pchelkin A.V. Ispolzovanie lishaynikov dlya monitoringa izmeneniy sostoyaniya prirodnoy sredy [Lichen use for monitoring environmental condition changes]. Nauchnye aspekty ekhologicheskikh problem Rossii [Scientific aspects of ecological problems in Russia]. Moscow, Nauka Publ., 2002. pp. 275–280.
6. Moskovchenko D.V., Valeeva E.I. Soderzhanie tyazhelykh metallov v lishaynikakh na Severe Zapadnoy Sibiri [Content of heavy metals in lichens in the north of Western Siberia]. Vestnik ekhologii, lesovedeniya i landshaftovedeniya, 2011, no. 11, pp. 162–172.
7. Bolshunova T. S., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V. Elementny sostav lishaynikov kaka indikator zagryazneniya atmosfery [Ultimate Composition of Lichens as Indicator of Aerial Contamination]. Ecology and Industry of Russia, 2014, no. 11, pp. 26–31.
8. Shatilova S.S. Geokhimicheskie osobennosti raspredeleniya mikroelementov v zole lishaynikov (Evernia mesomorpha) Tomskogo rajona [Geochemical features of microelements distribution in lichen ash (Evernia mesomorpha) in Tomsk region]. Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy XI mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh [Proc. of XI M.A. Usov International symposium of students and young researches. Problems in geology and exploration of subsoil assets]. Tomsk, TPU Publ. house, 2007. pp. 619–621.
9. Bargagli R., Nimis P.L. Guidelines for the use of epiphytic lichens as biomonitors of atmospheric deposition of trace elements. Monitoring with Lichen – Monitoring Lichens. NATO Science Series IV, Earth and Environmental Science. Eds. P.L. Nimis, C. Scheidegger, P.A. Wolseley. Dordrecht, Kluwer, 2002. pp. 295–299.
10. Oksner A.N. Opredelitel lishaynikov SSSR. Morfologiya, sistematika i geograficheskoe rasprostranenie [Lichen indicator in USSR. Morphology, systematics and geographical propagation]. Leningrad, Nauka Publ., 1974. Iss. 2, 284 p.
11. Bargagli R., D'Amato M.L., Iosco F.P. Lichen monitoring of metals in the San Rossore park: contrast with previous pine needle data. Environmental Monitoring and Assessment, 1987, vol. 9, pp. 285–294.
12. Sloof J.E., Wolterbeek B.Th. Interspecies comparison of lichen as biomonitors of trace element air pollution. Environmental Monitoring Assessment, 1993, vol. 25, pp. 149–157.
13. Strakhovenko V.D., Shcherbov B.L., Khozhina E.I. Raspredelenie radionuklidov i mikroelementov v lishaynikovom pokrove Zapadnoy Sibiri [Distribution of radionuclides and trace elements in

- the lichen cover of Western Siberia]. Russian Geology and Geophysics, 2005, vol. 46, no. 2, pp. 206–216.
14. GOST 27784–88. Pochvy. Metod opredeleniya zolnosti torfyanykh i otorfovannykh gorizontov pochv [State Standard 27784–88. Soils. Methods for determining ash content in peat and peaty soil horizons]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1988. 8 p.
 15. Forteskyu Dzh. Geokhimiya okruzhayushchey sredy [Geochemistry of environment]. Translated from English by I.I. Altshuler, A.V. Martynov. Moscow, Progress Publ., 1985. 360 p.
 16. Dobrovolskiy V.V. Osnovy biogeokhimii [Fundamentals of biogeochemistry]. Moscow, Akademiya Publ., 2003. 400 p.
 17. Myasnikov A.A. Sovremennoe formirovanie uranovoy osadochno-infiltratsionnoy (gidrogennoy) mineralizatsii Barguzino-Chivyrkuyskogo peresheyka na ozere Baykal [Current formation of uranium sedimentary-infiltration (hydrogenous) mineralization of Barguzin-Chivyrkuy strait on the lake Baikal]. Mineralogiya i geokhimiya landshafta gornorudnykh territoriy. Sovremennoe mineraloobrazovanie: Trudy II Vserossiyskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem i VIII Vserossiyskikh chteniy pamyati akademika A.E. Fersmana [Mineralogy and geochemistry of ore mining territory landscape. Modern mineral-formation. Proc. of the II All-Russian symposium with international participation and VIII All-Russian readings in memory of academician A.E. Fersman]. Chita, 2008. pp. 93–96.
 18. Rikhvanov L.P. Novye dannye o radiogeokhimicheskikh osobennostyakh prirodnykh sred Barguzino-Chivyrkuyskogo peresheyka (oz. Baykal) i Tunkinskoy kotloviny [New data on radiogeochemical features of the environment of Barguzin-Chivyrkuyskogo peresheyka (oz. Baykal) and Tunkinskoy hollow]. Materialy IV Mezhdunarodnoy konferentsii Radioaktivnost i radioaktivnye ehlementy v srede obitaniya cheloveka [Proc. of IV International conference. Radioactivity and radioactive elements in the environment]. Tomsk, 2013. pp. 441–444.
 19. Karta sodержaniya urana (radiya) territorii Rossii. Masshtab 1:10000000 [Map of uranium (radium) content in Russia. 1:10000000]. Ed. by G.N. Mikhaylov. St. Petersburg, 1995. 336 p.
 20. Byazrov L.G. Lishayniki v ekologicheskom monitoringe [Lichens in ecological monitoring]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2002. 336 p.
 21. McLean J. Role for lichen melanins in uranium remediation. Nature, 1998, vol. 391, no. 6668, pp. 645–650.
 22. Sheppard M.I., Thibault D.H. Natural uranium concentrations of native plants over a low-grade body. Canadian Journal of Botany, 1984, vol. 62, pp. 1069–1075.
 23. Nierboer E., Richardson D.H.S. Lichens as monitors of atmospheric deposition. Atmospheric pollutants in Natural Waters. Ed. by S.J. Eisenreich. Ann Arbor, Ann. Arbor Science Publications, 1981. pp. 339–388.
 24. Arbuzov S.I., Ershov V. Geokhimiya redkikh elementov v uglyakh Sibiri [Geochemistry of rare elements in coals of Siberia]. Tomsk, D-print Publ., 2007. 468 p.
 25. Evlampieva E.P., Panin M.S. Nakoplenie tsinka, medi, svintsa lishaynikom v rayone ugledobyvayushchego mestorozhdeniya «Karazhyra» [Accumulation of zinc, copper, lead by lichen within the coal mining deposit «Karazhyra»]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2008, no. 314, pp. 196–200.

Received: 30 June 2015.

УДК 621.3.001.24

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ СКИН-ЭФФЕКТА

Исаев Юсуп Ниязбекович,

д-р физ.-мат. Наук, профессор кафедры электрических сетей
и электротехники Энергетического института Томского политехнического
университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
E-mail: isaev_yusup@mail.ru

Старцева Елена Вячеславовна,

ст. преподаватель кафедры электроэнергетических систем Энергетического
института Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: s.e.v.75@mail.ru

Щекотуев Артем Валерьевич,

аспирант каф. электрических сетей и электротехники Энергетического
института Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: Shchekotuev@yandex.ru

Актуальность работы. При добыче, транспортировке и переработке георесурсов используется различное электротехническое оборудование, основными распределительными устройствами электроэнергии которого служат трансформаторы. В ряде случаев возникает необходимость проводить локальные электрические сети для электроэнергетической подпитки устройств переработки георесурсов, основными узлами которых также служат трансформаторы. Энергоэффективность электрических сетей зависит от состояния распределительных устройств – трансформаторов, от состояния обмоток трансформаторов. Поэтому исследование и моделирование состояний обмоток трансформатора являются важными задачами. При представлении обмоток трансформатора в виде распределенной системы необходимо знать величины элементов схемы замещения. При наличии высокочастотных токов в цепи на величину элементов схемы замещения начинает влиять скин-эффект – зависимость тока от частоты. Актуальность работы обусловлена тем, что в качестве зондирующего импульса трансформатора используют импульс наносекундной длительности, спектр которого наполнен высокими частотами. Высокие частоты зондирующего импульса провоцируют скин-эффект, который, в свою очередь, вносит в величину параметров схемы замещения зависимость от частоты.

Цель работы: представить зондирующий наносекундный импульс в виде суперпозиции гармоник с различными частотами; для каждой гармоники с фиксированной частотой, входящей в формирование импульса, подсчитать индуктивность и сопротивление электромагнитного поля с учетом скин-эффекта; для определения величин индуктивности и емкости использовать расчет индуктивности и сопротивления исследуемой системы при фиксированной частоте. Используя принцип суперпозиции, получить результирующую схему замещения, состоящую и совокупности схем, полученных для каждой частоты в отдельности. В сформированной схеме замещения обмотки трансформатора получить токи и напряжения и сравнить с экспериментальными данными.

Методы исследования. Метод исследования основан на использовании принципа суперпозиции, т. е. на разложении функции в ряд Фурье по гармоническим функциям. В работе также используется численное решение уравнения в частных производных – уравнения Гельмгольца с использованием метода конечных элементов. Для реализации метода конечных элементов используется математический пакет COMSOL Multiphysics.

Результаты. Произведено частотное разложение наносекундного импульса с последующим его использованием в качестве зондирующего сигнала для диагностики трансформатора. На основе решения уравнений Максвелла построена картина пространственного распределения векторного магнитного потенциала. Векторный магнитный потенциал используется для извлечения информации об индуктивности и сопротивлении схемы замещения трансформаторной обмотки. Получены графические зависимости индуктивности и сопротивления схемы замещения обмотки трансформатора от частоты. Графические зависимости приведены для различных поперечных сечений обмоток трансформатора: круглой и прямоугольной. На основе полученных зависимостей построены схемы замещения обмоток трансформатора с учетом возможного влияния скин-эффекта. Приведены расчеты напряжений и тока обмоток трансформатора с использованием схемы замещения, а также результаты сравнения теоретических расчетов с экспериментальными.

Ключевые слова:

Обмотки трансформатора, зондирующий импульс, частотный спектр, распределенные параметры, уравнение Гельмгольца, скин эффект, уравнение состояния.

Введение

В ряде случаев необходимо проводить локальные электрические сети для электроэнергетической подпитки устройств переработки георесурсов. В локальных электроэнергетических системах основным элементом, преобразующим и распреде-

ляющим электрическую энергию, является трансформатор. От качественной работы этого важного устройства зависит энергоэффективность электрических сетей. Одним из эффективных методов исследования причины возникновения дефектов в обмотках является диагностика трансформатора

коротким импульсом напряжения, а менее затратным является метод математического моделирования. При моделировании трансформатора для диагностики импульсом короткой длительности, порядка сотен наносекунд, необходимо учитывать два обстоятельства. Первое – обмотке трансформатора следует сопоставлять электротехническую схему замещения с распределенными параметрами [1–4]. Второе – из-за короткой длительности зондирующего импульса, импульс имеет высокочастотное наполнение и, следовательно, необходимо учитывать *скин-эффект* [5] – зависимость параметров схемы замещения от частоты. При рассмотрении двухобмоточного трансформатора схему замещения нужно представлять для каждой обмотки в отдельности. Приведем этапы формирования моделей обмоток двухобмоточного трансформатора (фрагмент трансформатора приведен на рис. 1). На рис. 1 приведены формы внутренней (низковольтной, с прямоугольным сечением провода) и внешней (высоковольтной, с круглым сечением провода) обмоток трансформатора. Внешняя обмотка намотана медным проводом диаметром $d=2$ мм с шагом $h=4$ мм, количество витков $n=120$, внутренний диаметр $d_{\text{вн}}=140$ мм, внешний диаметр $D_{\text{внеш}}=160$ мм, длина медного кабеля $l=370$ мм, основа – полихлорвиниловый цилиндр. Внутренняя обмотка намотана медной шиной с размерами $a=4$ мм, $b=7$ мм, количество витков $n=20$, внутренний диаметр $d_{\text{вн}}=86$ мм, внешний диаметр $D_{\text{внеш}}=102$ мм, длина медного кабеля $l=370$ мм, основа – винипластовый цилиндр.

Электротехническая схема замещения одного витка обмотки

Виток обмотки заменяется электротехническим звеном, состоящим из элементов, приведенных на рисунке. Здесь C_1 – межвитковая емкость; C_2 – емкость между витком и заземленными частями трансформатора; L – индуктивность рассеяния обмотки с учетом взаимной индуктивности между соседними элементами обмотки; R – активное сопротивление витка соответственно.

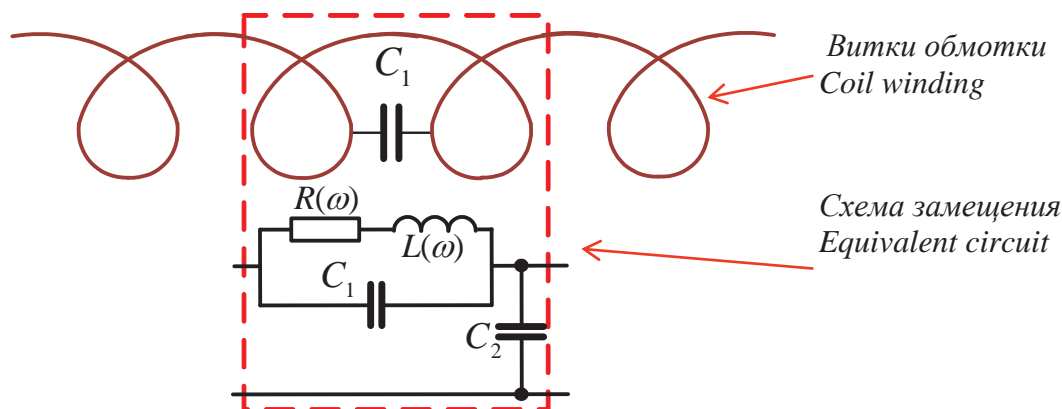


Рис. 2. Схема замещения витка обмотки

Fig. 2. Equivalent circuit of coil winding

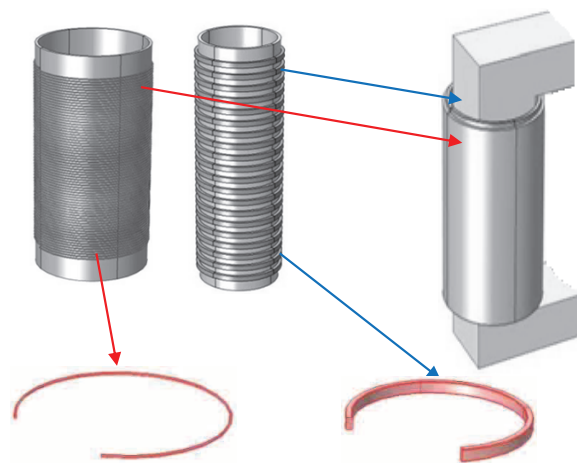


Рис. 1. Фрагмент трансформатора с обмотками и формы витков

Fig. 1. Fragment of the transformer with windings and coils form

Все приведенные величины являются погонными, т. е. значения величин отнесены к единице длины [1–3]. Таким образом, обмотку трансформатора можно заменить последовательно соединенными звеньями [6, 7], рис. 3.

Относительный вклад высокочастотных компонент в формирование спектра зондирующего импульса короткой длительности достаточно высок. При дальнейшем укорачивании импульса относительный вклад высокочастотных компонент усиливается. Как следствие этого явления, при очень коротких длительностях зондирующего импульса начинает проявляться *скин-эффект*. То есть при высокочастотном токе в поперечном сечении проводника ток выталкивается из внутренней области к периферии проводника. При этом начинает проявляться зависимость индуктивности и сопротивления проводника от частоты.

Для определения величин электротехнических элементов, входящих в схему замещения, определим частотный спектр и частотный диапазон зондирующего импульса, а затем приведем расчет индуктивности и сопротивления витков обмотки трансформатора круглого и прямоугольного сечения.

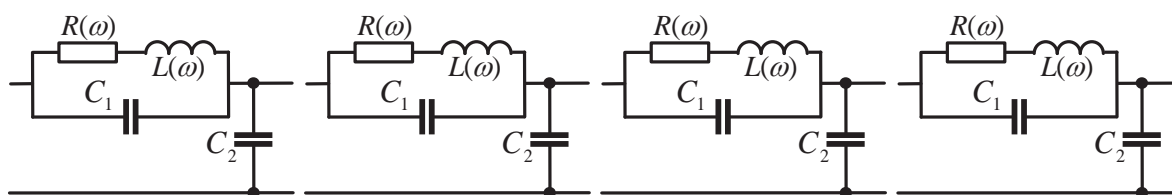


Рис. 3. Схема замещения обмотки для заданной частоты

Fig. 3. Equivalent circuit of the coil for the given frequency

Частотное разложение зондирующего импульса

В качестве модельного зондирующего импульса выберем функцию в виде

$$U(t) = \exp(-(t - 1,5 \cdot 10^{-6})^{14} \alpha), \quad \alpha = 10^{93},$$

с длительностью $T=0,5$ мкс. (рис. 4).

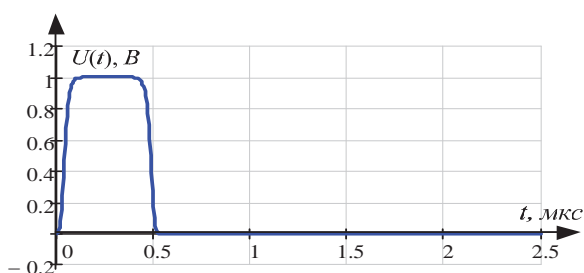


Рис. 4. Зондирующий импульс

Fig. 4. Probe pulse

Виток обмотки заменяется электротехническим звеном, состоящим из элементов, приведенных на рис. 2. Здесь C_1 – межвитковая емкость; C_2 – емкость между витком и заземленными частями трансформатора.

Определим частотный спектр импульса. Для этого разложим импульс в ряд Фурье, определив коэффициенты разложения $A_k, k=0, \dots, N$. Для определения коэффициентов использовалась стандартная программа быстрого преобразования Фурье (FFT) [8, 9] программно-интегрированной среды MathCAD. Далее функция представлялась в виде ряда

$$U(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^N |A_k| \sin\left(\omega kt + \arg(A_k) + \frac{\pi}{2}\right),$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2,53 \cdot 10^6 \text{ рад/с},$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T U(t) \cos(\omega kt) dt,$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T U(t) \sin(\omega kt) dt, \quad A_k = a_k + jb_k.$$

Спектр функции и результат ее восстановления по коэффициентам разложения представлены ниже. Число коэффициентов разложения бралось $N=30$. Результат расчета показал, что относительный вклад гармоник выше десятой не превышал десяти процентов от наибольшего вклада и поэтому эти гармоники можно не принимать во внимание (рис. 5).

Рис. 6 демонстрирует хорошее восстановление функции.

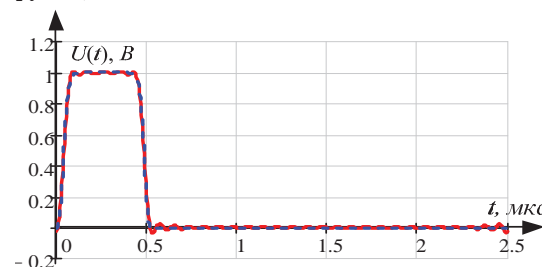


Рис. 6. Зондирующий импульс и результат его восстановления (пунктирная красная кривая)

Fig. 6. A probe pulse and the result of its recovery (dashed red curve)

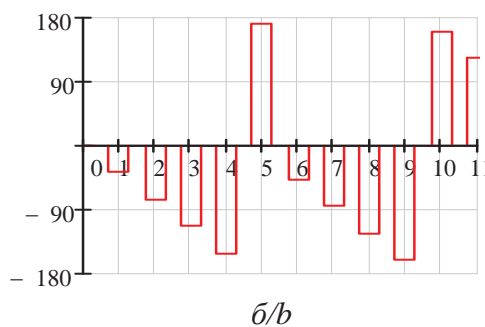
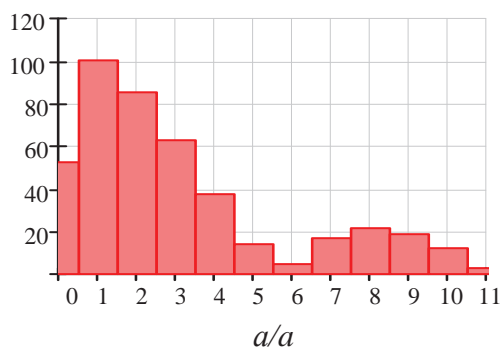


Рис. 5. а) амплитудно-частотный спектр. Зависимость процентов от номера гармоники; б) фазо-частотный спектр. Зависимость градусов от номера гармоники

Fig. 5. а) amplitude-frequency spectrum. Dependence of the percent on harmonic number; б) phase-frequency spectrum. Dependence of the degrees on harmonic number

Постановка задачи для определения частотной зависимости индуктивности и сопротивления витков обмотки

Проведем расчет распределения плотности тока в поперечном сечении проводника с помощью векторного магнитного потенциала. Для этого будем использовать систему уравнений Максвелла с материальными соотношениями [10–13]:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \sigma \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}, \\ \mathbf{D} &= \varepsilon \mathbf{E}, \quad \mathbf{H} = \mu \mathbf{B}. \end{aligned}$$

Здесь \mathbf{H} – вектор напряженности магнитного поля; \mathbf{E} – вектор напряженности электрического поля; \mathbf{J} – плотность тока; \mathbf{D} – вектор электрического смещения; \mathbf{B} – вектор магнитной индукции; ε – диэлектрическая проницаемость; μ – магнитная проницаемость; σ – проводимость среды.

Перейдем от векторных уравнений Максвелла к скалярному уравнению, введя вспомогательный магнитный потенциал \mathbf{A} . Выбирая соответствующую калибровку, связывающую векторный магнитный потенциал \mathbf{A} с электрическим вектором напряженности \mathbf{E} и магнитной индукцией \mathbf{B} [9, 10]:

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}, \quad \mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}, \quad \operatorname{div} \mathbf{A} = 0,$$

можно получить уравнение для магнитного векторного потенциала

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} &= -\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} + \mathbf{J} \rightarrow \\ \rightarrow \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} + \nabla(\mu^{-1} \nabla \mathbf{A}) &= \mathbf{J}. \end{aligned}$$

С учетом полоидальной геометрии системы (рис. 7), магнитный потенциал и вектор плотности тока будут иметь по единственной компоненте, ориентированной по угловой координате $\mathbf{A} = \{0, 0, A\}$, $\mathbf{J} = \{0, 0, J\}$. Будем искать решения в гармоническом виде $\mathbf{A} = \mathbf{A}_\varphi e^{j\omega t}$. Учитывая, что $J = \frac{\sigma V}{2\pi r}$, и после сокращения на экспоненциальный множитель получаем искомое уравнение для векторного потенциала:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \mathbf{A}_\varphi e^{-j\omega t}, \quad \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \rightarrow -j\omega \mathbf{A} \\ (j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)\mathbf{A}_\varphi + \nabla(\mu^{-1}\nabla\mathbf{A}_\varphi) &= \frac{\sigma V}{2\pi r} \mathbf{e}_\varphi. \end{aligned}$$

С учетом калибровки получаем скалярное уравнение Гельмгольца [12, 13] для угловой компоненты векторного потенциала

$$(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)\mathbf{A}_\varphi + \mu^{-1}\Delta\mathbf{A}_\varphi = \frac{\sigma V}{2\pi r},$$

где V – напряжения проводника; ω – частота; j – мнимая единица; r – радиус от центра оси окружности цилиндра в поперечном сечении (рис. 1); \mathbf{e}_φ – единичный вектор, ориентированный вдоль угловой координаты.

Плотность тока и ток определяются выражениями:

$$\mathbf{J}_\varphi = \nabla(\mu^{-1}\nabla A_\varphi), \quad I = \pi \int_0^R J_\varphi r^2 dr.$$

Магнитная энергия определяется выражением:

$$W = 2\pi \oint A_\varphi r dr,$$

из которого при известном токе определяется индуктивность с помощью соотношения:

$$L = 2W/I^2.$$

При известном напряжении и токе определяем сопротивление проводника, используя формулу:

$$R = \operatorname{Re}(V/I).$$

Для расчета представленных уравнений использовался математический пакет COMSOL Multiphysics, основанный на методе конечных элементов [14–17].

Результаты расчетов

Результаты расчетов приведены на рис. 7–11.

При известных зависимостях индуктивности и сопротивления от частоты можно определить переходные процессы, происходящие в обмотках трансформатора. Поскольку входной импульс представлен в виде суммы гармоник, расчет проводился с использованием метода наложения. То есть рассчитывались напряжения и токи для каждой гармоники. Затем результаты расчетов токов и напряжений каждой гармоники складывались и получались результирующие токи и напряжения при воздействии зондирующего импульса.

Запишем дифференциальные уравнения для определения напряжений и тока в реактивных элементах схемы замещения для одного витка, приведенной на рис. 2. Для решения дифференциальных уравнений использовался метод пространства состояний, дифференциальное уравнение третьего порядка представлялось в виде системы 3-х уравнений первого порядка [18, 19]. Уравнения рассчитывались численно с использованием метода Рунге–Кутты четвертого порядка с фиксированным шагом. Число точек дискретизаций равнялось $N=10^3$. Величины емкостей $C1$ и $C2$ брались из справочника [20] в соответствии с формой кольца.

$$\begin{pmatrix} \frac{di_L(t, \omega_k)}{dt} \\ \frac{dU_{C1}(t, \omega_k)}{dt} \\ \frac{dU_{C2}(t, \omega_k)}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_1(\omega_k)}{L(\omega_k)} & \frac{1}{L(\omega_k)} & 0 \\ -\frac{1}{C1} & -\frac{1}{C1r} & -\frac{1}{C1r} \\ 0 & -\frac{1}{C2r} & -\frac{r+r1}{C2rr1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L(t, \omega_k) \\ U_{C1}(t, \omega_k) \\ U_{C2}(t, \omega_k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{E(t, \omega_k)}{C1r} \\ \frac{E(t, \omega_k)}{C2 \cdot r} \end{pmatrix}.$$

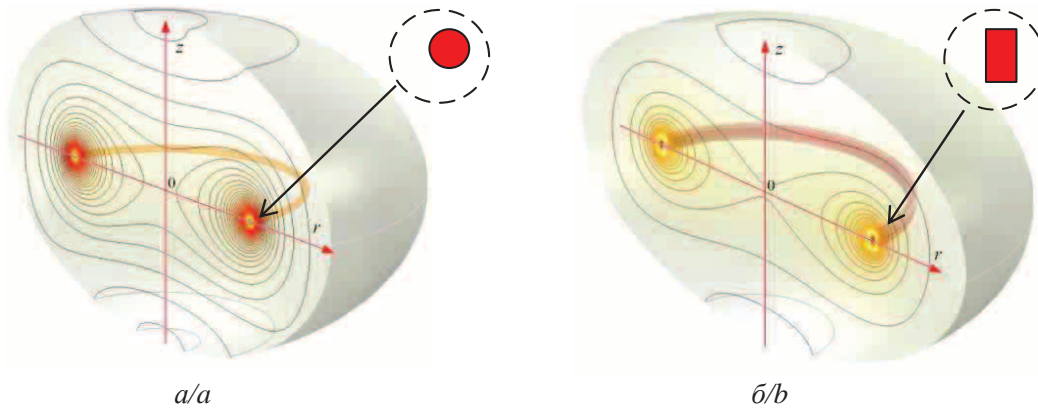


Рис. 7. Изолинии поля распределения магнитного потенциала A_{φ} кольцевых проводников. В верхнем правом углу показана форма сечения кольца при фиксированной частоте ω : а) круглое; б) прямоугольное сечение

Fig. 7. Isolines of distribution field of magnetic potential A_{φ} of circular conductors. In the upper right corner the shapes of the rings section at fixed frequency ω : a) circular; b) rectangular are shown

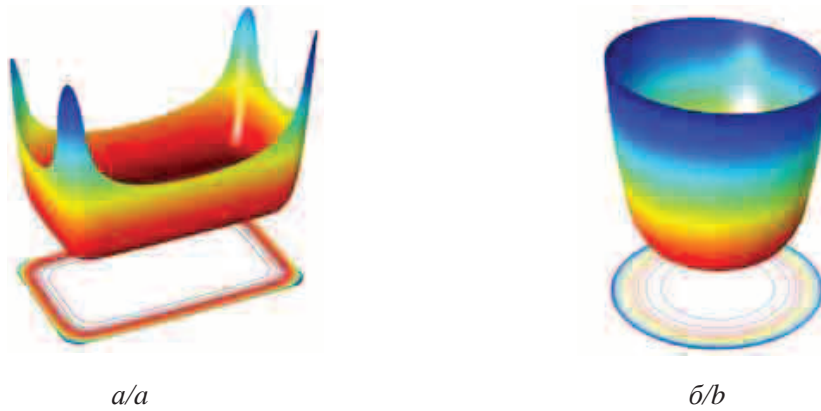


Рис. 8. Относительное распределение плотности тока и картина контурных линий в поперечном сечении проводника при частоте $f=5,4 \cdot 10^5$ Гц: а) для прямоугольного, б) для круглого сечения, соответственно

Fig. 8. Relative distribution of current density and the pattern of contour lines in cross-section of a conductor at frequency of $f=5,4 \cdot 10^5$ Hz for: a) rectangular, b) round, cross sections, respectively

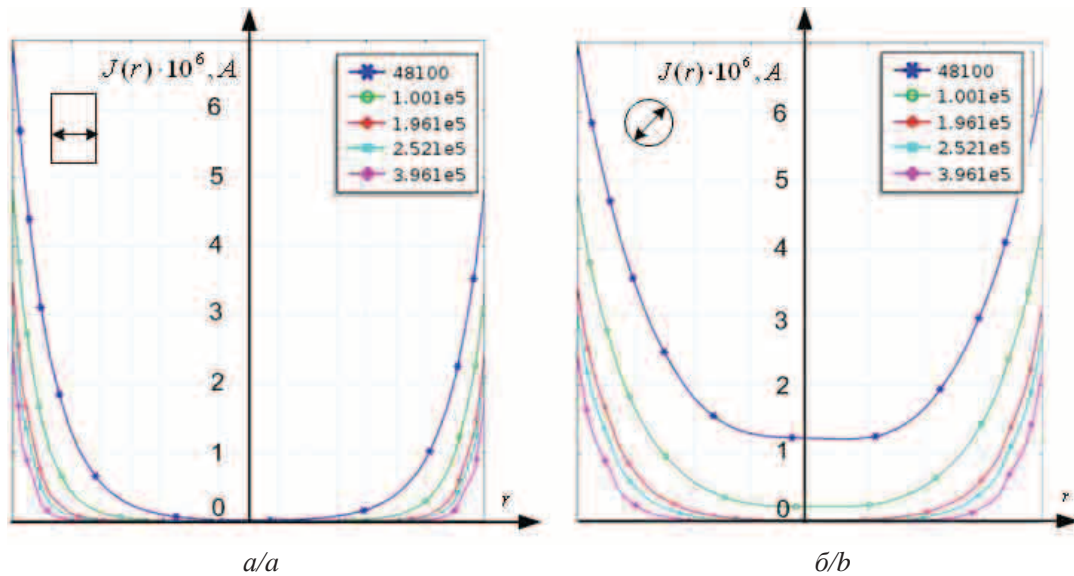


Рис. 9. Распределение плотности тока в поперечном сечении проводника при различных частотах для: а) круглого, б) прямоугольного сечения, соответственно

Fig. 9. Current density distribution in cross-section of the conductor at different frequencies for: a) round; b) rectangular cross section, respectively

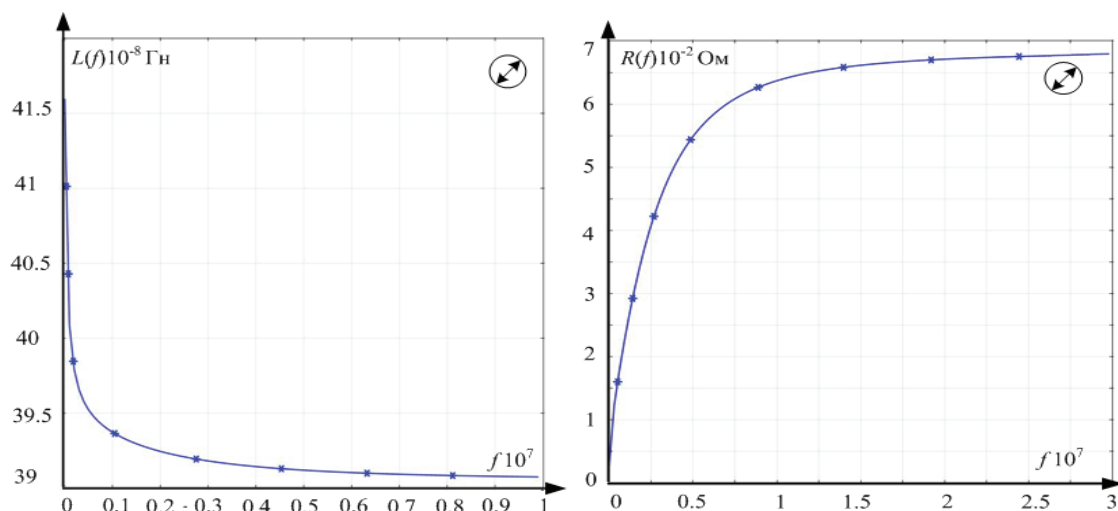


Рис. 10. Частотные зависимости индуктивности $L(f)$ и сопротивления $R(f)$ провода с круглым поперечным сечением

Fig. 10. Frequency dependence of the inductance $L(f)$ and resistance $R(f)$ of wires with circular cross-section

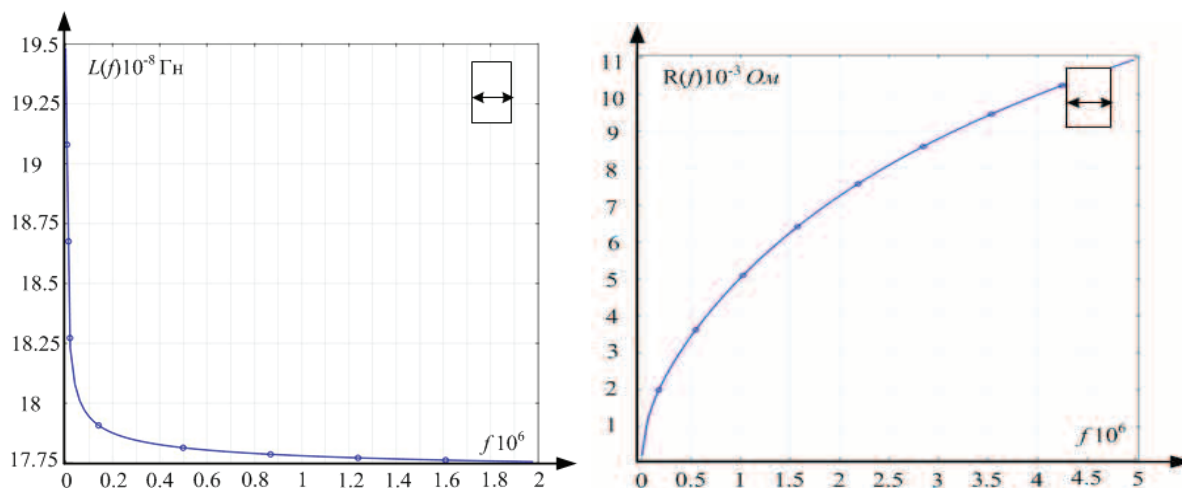


Рис. 11. Частотные зависимости индуктивности $L(f)$ и сопротивления $R(f)$ провода с прямоугольным поперечным сечением

Fig. 11. Frequency dependence of the inductance $L(f)$ and resistance $R(f)$ of wire with a rectangular cross section

Здесь $E(t, \omega_k)$ – гармоническая составляющая входного импульса при фиксированной частоте; $i_L(t, \omega_k)$, $U_{C1}(t, \omega_k)$, $U_{C2}(t, \omega_k)$ – ток, индуктивности, напряжение на первом и втором конденсаторах. Результирующие токи и напряжения представляются в виде ряда:

$$i_L(t) = \sum_{k=0}^N i_L(t, \omega_k), \quad \omega_k = \omega k = \frac{2\pi}{T} k,$$

$$\omega = 2,53 \cdot 10^6 \text{ рад/с},$$

$$U_{C1}(t) = \sum_{k=0}^N U_{C1}(t, \omega_k), \quad U_{C2}(t) = \sum_{k=0}^N U_{C2}(t, \omega_k),$$

$$U_R(t) = \sum_{k=0}^N i_L(t, \omega_k) R(\omega).$$

Результаты расчетов для провода круглого сечения приведены на рис. 12.

График напряжения на конденсаторе C_1 , он же напряжение на витке, рассчитанный теоретиче-

ски, удовлетворительно совпадает с экспериментом. Что свидетельствует об удовлетворительности модели.

Для провода с прямоугольным поперечным сечением графические зависимости выглядят аналогично.

Заключение

Авторами предложен алгоритм, позволяющий представить трансформатор в виде электротехнической схемы замещения с распределенными параметрами при его зондировании импульсом наносекундной длительности. Алгоритм включает в себя следующие этапы:

- 1) представление зондирующего импульса наносекундной длительности в виде суперпозиции гармонических волн с различными частотами;
- 2) расчет параметров схемы замещения – индуктивности и сопротивления – с учетом скин-эффекта, т. е. в зависимости от частоты для раз-

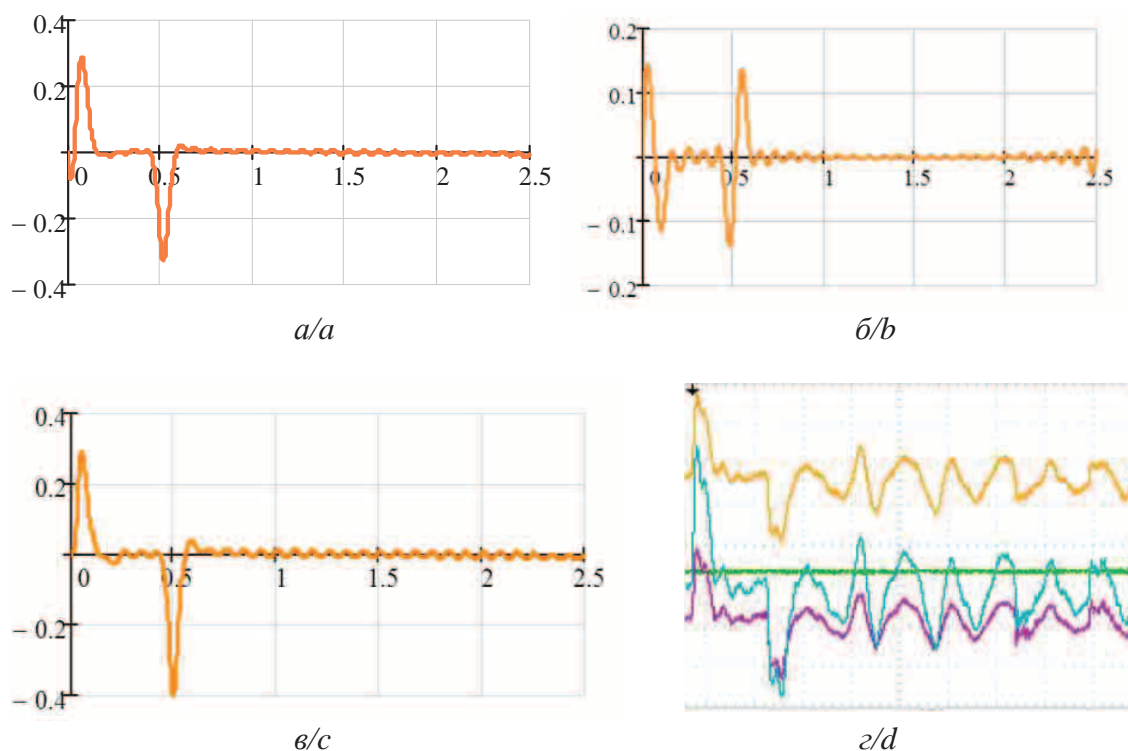


Рис. 12. Напряжение на: а) индуктивности $U_L(t)$ б) активном сопротивлении $U_R(t)$; в) конденсаторе $U_C(t)$; г) экспериментальные осциллограммы напряжений, снятые с помощью отпаек на трех витках при зондировании пробного импульса. На всех рисунках ось ординат – напряжения в вольтах, ось абсцисс – время в микросекундах

Fig. 12. a) inductor $U_L(t)$ b) active resistance $U_R(t)$; c) capacitor $U_C(t)$ voltage; d) experimental waveform of the voltage measured from taps for three turns when the probe pulse is affected. In all figures the Y-axis is in volts, the X-axis is in microseconds

- личных поперечных сечений обмоток трансформатора;
- 3) расчет токов и напряжений схемы замещения для каждой гармоники;
- 4) представление окончательного результата в виде суперпозиции токов и напряжений каждой гармоники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаев Ю.Н., Старцева Е.В., Щекотуев А.В. Исследование волновых процессов обмоток трансформатора как цепи с распределенными параметрами // Известия ТПУ. – 2015. – Т. 326. – № 8. – С. 27–35.
2. Геллер Б., Веверка А. Импульсные процессы в электрических машинах. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
3. Геллер Б., Веверка А. Волновые процессы в электрических машинах. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1960. – 632 с.
4. Ильдарханов Р.Г., Усачев А.Е. Контроль состояния обмоток силовых трансформаторов путем спектрального анализа передаточных функций // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2010. – № 3–4. – С. 38–47.
5. Кухаркин Е.С. Основы технической электродинамики. – М.: Высшая школа 1969. – 509 с.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Высшая школа 1996. – 638 с.
7. Шимонис К. Теоретическая электротехника. – М.: Мир 1964. – 773 с.

В работе продемонстрировано хорошее согласие теоретических расчетов с экспериментальными результатами.

Авторы благодарят профессора Валерия Александровича Лавриновича за любезно предоставленные экспериментальные данные.

8. Исаев Ю.Н., Кушцов А.М. Практика использования системы MathCAD в расчетах электрических и магнитных цепей. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2013. – 180 с.
9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1977. – 831 с.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 651 с.
11. Демирчан К.С., Чечурин В.Л. Машинные расчеты электромагнитных полей. – М.: Высш. шк., 1986. – 239 с.
12. Левич В.В. Курс теоретической физики Т. 1. – М.: ФИЗМАТИЗ, 1969. – 659 с.
13. Бредов М.М., Румянцев В.В., Топтыгин И.Н. Классическая электродинамика. – М.: Наука, 1985. – 340 с.
14. Pryor R.W. Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principle Approach. – London: Jones and Bartlett Publishers, LLC, 2009. – 293 p.
15. Gallaher R.H. Finite Element Analysis. Fundamentals. – New Jersey: Prentice-Hall, 1975. – 428 p.
16. Zitzkiewicz O.C. The Finite Element Method in engineering science. – London: MCGRAW-HILL, 1975. – 541 p.

17. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. – М.: Мир, 1977. – 349 с.
18. Исаев Ю.Н. Системы автоматического управления. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 142 с.
19. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 1 / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 654 с.
20. Иосель Ю.Я, Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 289 с.

Поступила 18.08.2015 г.

UDC 621.3.001.24

CALCULATION OF EQUIVALENT DISTRIBUTED CIRCUIT PARAMETERS OF TRANSFORMER WINDING UNDER THE INFLUENCE OF SKIN EFFECT

Yusup N. Isaev,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: isaev_yusup@mail.ru

Elena V. Startseva,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: s.e.v.75@mail.ru

Artyom V. Shchekotuev,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: Shchekotuev@yandex.ru

The relevance of the work. When producing, transporting and processing geo assets it is necessary to use various electrical equipment, the transformers are the main electricity distributors in this case. In some cases it is necessary to route the local electric network to recharge electric power devices for processing geo assets, the transformers are the main units of network as well. The efficiency of electric networks depends on the state of distribution devices – transformers, especially on the condition of the transformer windings. Therefore, the investigation and modeling of the transformer windings are the important tasks. When presenting the transformer windings as a distributed system we need to know the values of the equivalent circuit elements. In the presence of high-frequency currents in the circuit, the skin effect – the dependence of current on frequency – influences the value of equivalent circuit elements. The relevance of the research is caused by the fact that the pulse of nanosecond duration, which spectrum is filled with high frequencies, is used as the probe pulse for the transformer. The high frequency of the probe pulse provokes the skin effect, which, in its turn, contributes the frequency dependence to the value of the equivalent circuit parameters.

The aim of the research is to introduce the probe nanosecond pulse as a superposition of harmonics with different frequencies; to calculate inductance and resistance for the transformer equivalent circuit for each harmonic with fixed frequency, which forms the pulse; to determine the values of inductance and capacitance using the calculation of electromagnetic field and taking into account the skin effect as well. The energy of the calculated electromagnetic field allows retrieving the inductance and resistance values of the investigated system at the fixed frequency. To get the resulting equivalent circuit, which consists of combined circuits obtained for each frequency separately, using superposition principle; to obtain voltage and currents of equivalent circuit of transformer windings and compare them with the experimental data.

Methods of investigation. The method of investigation is based on superposition principle, which means the expansion of arbitrary functions to the Fourier series. The authors use as well the numerical solution of partial differential equations – Helmholtz equation using the finite element method. To implement the method of finite elements the mathematical package COMSOL Multiphysics was used.

Results: The authors carried out frequency decomposition of nanosecond pulse and use it as a probe signal for transformer diagnosis. Based on the solution of Maxwell's equations the spatial distribution pattern of the magnetic vector potential was obtained. To extract the information on the inductance and resistance of the equivalent circuit of transformer winding the vector magnetic potential was used. The authors obtained the graphs of inductance and resistance of equivalent circuit for the transformer winding as a function of frequency. Graphical dependences are given for a variety of cross-sections of the transformer windings: round and rectangular shapes. Based on the obtained graphical dependencies the equivalent circuits of the transformer windings with the possible influence of the skin effect were built. The paper introduces the calculations of voltage and current of transformer windings using the equivalent circuit, as well as the results of comparison of theoretical calculations with the experimental ones.

Key words:

Transformer winding, probe pulse, frequency spectrum, distributed parameters, Helmholtz equation, skin effect, state-space equation.

The authors thank professor Valery Aleksandrovich Lavrinovich for the experimental data.

REFERENCES

1. Isaev Yu.N., Startseva E.V., Schekotuev A.V. Issledovanie volnovykh protsessov obmotok transformatora kak tsepi s raspredelitelnyimi parametrami [Investigation of transformer windings wave processes as a distributed electric circuit]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 8, pp. 27–35.
2. Heller B., Veverka A. *Volnovye protsessy v elektricheskikh mashinakh* [Wave processes in electric machines]. Moscow, Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatelstvo, 1960. 632 p.
3. Heller B., Veverka A. *Impulsnye protsessy v elektricheskikh mashinakh* [Switching in electric machines]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 440 p.
4. Ildarkhanov R.G., Usachyov A.E. Kontrol sostoyaniya obmotok silovykh transformatorov putem spektralnogo analiza peredatochnykh funktsii [Control of winding state in power transformers by spectral analysis of transfer function]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*, 2010, no. 3–4, pp. 38–47.
5. Kukharkin E.S. *Osnovy tekhnicheskoy elektrodinamiki* [Background of technical electrodynamics]. Moscow, Visshaya shkola Publ., 1969. 509 p.
6. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektricheskie tsepi* [Theoretical bases of electrical engineering. Electric circuits]. Moscow, Visshaya shkola Publ., 1996. 639 p.
7. Shimonis K. *Teoreticheskaya elektrotekhnika* [Theoretical electrical engineering]. Moscow, Mir Publ., 1964. 773 p.
8. Isaev Yu.N., Kuptsov A.M. *Praktika ispolzovaniya sistemy MAT-KAD v raschetakh elektricheskikh i magnitnykh tsepey* [The practice of using of MathCAD to calculate electric and magnetic circuits]. Moscow, SOLON-PRESS, 2013. 180 p.
9. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical Handbook for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 831 p.
10. Landau L.D., Lifshits E.M. *Elektrodinamika sploshnykh sred* [Electrodynamics of continuous media]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2005. 651 p.
11. Demirchan K.S., Chechurin V.L. *Mashinnye raschety elektromagnitnykh poley* [Computing electromagnetic fields]. Moscow, Visshaya shkola Publ., 1986. 239 p.
12. Levich V.V. *Kurs teoreticheskoy fiziki* [Course of Theoretical physics]. Moscow, FIZMATGIZ Publ., 1969. Vol. 1, 659 p.
13. Bredov M.M., Rumyantsev V.V., Toptygin I.N. *Klasicheskaya elektrodinamika* [Classical electrodynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 340 p.
14. Pryor R.W. *Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principle Approach*. London, Jones and Bartlett Publishers, LLC, 2009. 293 p.
15. Gallaher R.H. *Finite Element Analysis. Fundamentals*. New Jersey, Prentice-Hall, 1975. 428 p.
16. Zitzkiewicz O.C. *The Finite Element Method in engineering science*. London, MCGRAW-HILL, 1975. 541 p.
17. Strang G., Fix G. *Teoriya metoda konechnykh elementov* [An analysis of the finite element method]. Moscow, Mir Publ., 1973. 349 p.
18. Isaev Yu.N. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya* [Automated control systems]. Tomsk, TPU Publ. house, 2013. 142 p.
19. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classic and modern automated control theory]. Eds. K.A. Pupkov, N.D. Egupov. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Press, 2004. V. 1, 654 p.
20. Yosel Yu.Ya., Kochanov E.S., Strunsky M.G. *Raschet elektricheskoy emkosti* [Calculation of electric capacitance]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 289 p.

Received: 18 August 2015.

УДК 549.26:549.643.25:553.212

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ САМОРОДНОГО ЖЕЛЕЗА И ПРОДУКТОВ ЕГО ОКИСЛЕНИЯ В ДЕВОНСКИХ ГРАНИТОИДАХ АЛЕЙСКО-ЗМЕИНОГОРСКОГО КОМПЛЕКСА (СЕВЕРО-ЗАПАДНАЯ ЧАСТЬ РУДНОГО АЛТАЯ)

Новоселов Константин Леонидович,

канд. геол.-минерал. наук, доцент каф. геологии и разведки полезных ископаемых Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: nkonstantin1@rambler.ru

Актуальность исследований самородного минералообразования железорудной направленности определяется выделением минералогических и физико-химических критериев потенциальной рудоносности полифазного алейско-змеиногорского гранитоидного комплекса, занимающего большую часть северо-западной российской территории Рудного Алтая.

Цель работы: всесторонняя характеристика морфологии, химического состава, распространённости, парагенезиса и времени обособления самородных металлов железа в эволюционирующем развитии флюидно-магматической системы.

Методы исследования: традиционные минералого-петрографические, минераграфические с целенаправленным изучением акцессорного самородного железа и ассоциирующих с ним минералов, извлечённых из протоколов гранитоидов по общепринятой схеме. Для аналитических исследований применены рентгеноспектральные методы анализа, выполненные в лаборатории ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) на электронном сканирующем микроскопе JSM-6510LV (Jeol Ltd) с энерго-дисперсионным спектрометром INCA Energy 350+ (аналитик М.В. Хлестов).

Результаты. Установлено присутствие и распределение акцессорных микросферул самородного железа в породах последовательных фаз формирования гранитоидного комплекса; по химическому составу выделено две разновидности микросферул – железо с примесью Ti, Mn и беспримесное (феррит). В плагиогранитах главной фазы внедрения изучены химический состав и структура распада ксеногенного кристалла феррокерсутита, генетически связанного с металлизированным габброидным силикатным расплавом, привнесённым плагиогранитной магмой в гипабиссальную камеру кристаллизации. Выявлена парагенетическая ассоциация самородного железа и условия обособления из силикатного расплава самородной фазы Fe.

Выводы. На раннемагматической стадии формирования габброидного расплава в мантийном промежуточном очаге активно проявилось ликвационное отделение металлической фазы железа, в том числе с примесью Ti, Mn, под воздействием восстановительных интрателлурических водородно-углеродистых флюидов при активном участии бескислородных соединений калия. Ограниченность распространённости самородных микроглобул Fe в производных гранитоидных расплавах, особенно в заключительных лейкогранитных дифференциатах, связана с ослаблением восстановительного режима мантийных флюидов, на смену которым поступали флюиды с повышенными щёлочностью и потенциалом кислорода. Полученные новые данные имеют петрологическое значение и практическую направленность – определение потенциальной продуктивности гранитоидного комплекса на железо-титанорудную минерализацию.

Ключевые слова:

Глобулы, самородное железо, феррокерсутит, структура распада твёрдого раствора, гранитоиды.

Введение

Алейско-змеиногорский гранитоидный комплекс (D_{2-3}) включает три крупных интрузива – Новониколаевский, Алейский, Устьянский, и ряд более мелких тел, локализованных в структурах северной части Алейского поднятия Рудного Алтая между девонскими вулканогенно-осадочными прогибами, контролируются крупными глубинными разломами северо-западного и субширотного простирания и характеризуются наличием коагматических связей с девонскими вулканидами каменевского комплекса. Наибольшую площадь (?1000 км²) занимает Новониколаевский массив, расположенный в северном окончании Алейского антиклинория, имеет сложное полифазное строение и включает породы четырёх интрузивных фаз (в порядке становления): 1) габброиды и диоритоиды, обычно интенсивно метаморфизованные; 2) кварцевые диориты, тоналиты, плагиограниты; 3) лейкоплагиограниты; 4) лейкограниты с биотитовыми и биотит-мусковитовыми разновидностями. Наибольшим распространением пользуются

гранитоиды – производные второй, главной, фазы и заключительной лейкогранитовой. Алейский и Устьянский массивы, значительно меньшие по площади (около 300 кв. км каждый), расположены соответственно на юге и юго-западе поднятия, по петрологическим, минералого-геохимическим и другим показателям идентичны кислым дифференциатам Новониколаевского массива. Доминирующие породы Алейского массива – тоналиты и плагиограниты, приобретающие в тектонически ослабленных зонах гнейсовидный облик с биотитом и зеленой роговой обманкой. Устьянские гранитоиды, лейкократовые по составу, параллелизуются с лейкогранитами заключительной четвертой фазы. В целом Новониколаевский, Алейский и Устьянский гранитоидные массивы рассматриваются как индивидуализированные части крупного плутона, сформированного из единого магматического центра активизированной континентальной окраины в средне-позднедевонское время [1–3]. По глубине консолидации гранитоидные тела относятся к гипабиссальным фациям. Нижний пре-

дел температуры кристаллизации гранитоидных расплавов, определённый по минералогическим геотермометрам [3], находится в пределах 800–900 °С.

В кратком изложении петролого-геохимические особенности гранитоидов сводятся к следующему. Наиболее распространённые породы главной фазы – плагиограниты роговообманковые, по составу близки к нормативным. Плагиоклаз извлективистый с прямой зональностью, отвечает андезину ($Ап_{30-35}$) с лабрадорным ядром, реже олигоклазу ($Ап_{20-25}$) обычно с полисинтетическим двойникованием. Идиоморфные кристаллы амфибола по оптическим свойствам и химическому составу относятся к магнезиально-железистой роговой обманке с примесью (мас. %) TiO_2 (0,8...1), MnO (0,4...0,8), K_2O (0,1...0,5), содержит обильные включения игольчатых кристаллов апатита, титаномагнетита, циркона. Зёрна кварца, редко ксеноморфные, обычно близки к округлым или гексагональным очертаниям. Из второстепенных минералов присутствуют единичные изометрические зёрна пироксена диопсид-геденбергитового состава – $Ca_{0,959}(Mg_{0,749}Fe_{0,25})_{0,999}[Si_{2,021}O_6]$. Постмагматические минералы представлены широко распространённым эпидотом, железистым хлоритом, редкими чешуйками биотита.

Лейкоплагиограниты третьей фазы пользуются весьма ограниченным распространением, однообразны по составу, нередко с роговой обманкой и биотитом. Характерны вариации структуры породы до порфировой с макро- и микрофенокристаллами олигоклаза ($Ап_{18-20}$) и округлыми зёрнами кварца. Роговая обманка, как и в породах главной фазы, магнезиально-железистая, отличается повышенной калиестью, кремнезёмистостью, глинозёмистостью и титанистостью. Единичные зёрна КППШ представлены решётчатым микроклином. Как и в породах главной фазы эпизодически встречаются зёрна пироксена.

Лейкограниты, заключительные дифференциаты комплекса, слагают крупные штокообразные тела, в том числе Устьянский массив, представлены биотитовыми и биотит-мусковитовыми разностями. Плагиоклаз, олигоклаз-альбитового состава ($Ап_{8-15}$), образует идиоморфные зёрна, часто присутствует в порфиридных вкрапленниках. Микроклин обычно обрастает плагиоклаз или по периферии его зёрен образует антипертитовые вроски. Индивиды кварца, ксеноморфные, в аплитовидных разностях приобретают округлые очертания. Количество биотита варьирует от единичных чешуек до 5...10 об. %, по химическому составу относится к высокожелезистым и титанистым с повышенным содержанием глинозёма. Характерной особенностью химизма биотита, как и вышерассмотренной роговой обманки плагиогранитов, является отсутствие в составе флюидной фазы фтора и эпизодическое появление хлора. Как отмечает А.А. Маракушев [4], вхождение во флюидно-силикатный расплав магмофобных компо-

нентов, таких как Cl, вытесняющих магмофильный F, является типичным для глубинных зон магматической генерации.

Основные петрохимические характеристики гранитоидов в обобщённом виде (от ранних дифференциатов к заключительным): 1) возрастание кремнезёмистости и глинозёмистости; 2) понижение известковистости; 3) повышение щёлочности калиевой направленности; 4) снижение коэффициентов титанистости и железистости.

К геохимическим особенностям гранитоидного комплекса относится высокая активность кислорода и низкая – серы, о чём свидетельствует отсутствие элементов халькофильной группы, за исключением Ga, кристаллохимически связанного с Al, и концентрации его особенно типичны во флюидной системе, обеднённой H_2S [4]. Кроме типичных для гранитоидных магм литофильных элементов, среди которых доминирует Fe, присутствуют Co и Ni в концентрациях,кратно превышающих кларковые величины, и образуют неструктурную примесь в породообразующих и акцессорных минералах. Однако поведение этих сидерофилов заметно отличается – в заключительных дифференциатах концентрации Co резко понижаются на фоне стабильно повышенных содержаний Ni. Среди литофильных элементов в повышенных количествах относительно кларка в гранитоидах выделенных фаз постоянно присутствует Sc, Y и редкоземельные лантаноиды – Yb, Dy, Lu и др., количество которых возрастает параллельно с калиестью в породах заключительных дифференциатов.

Ассоциация акцессорных минералов, образующих весовые количества в гранитоидах главной фазы: титаномагнетит–рутил–ильменит–сфен–apatит–циркон–гематит; в лейкоплагиогранитах и лейкогранитах последующих дифференциатов ведущая ассоциация акцессорий сменяется на гематит–рутил–мартитизированный титаномагнетит–циркон–топаз–флюорит–редкоземельную с Y, Ce, La, а также минералами Th и U. В единичных зёрнах в гранитоидах установлены корунд, гранат пиральспитового ряда с примесью Ca.

Результаты исследований

Самородное железо установлено в плагиограните главной фазы (Новониколаевский массив) в форме включений в кристалле амфибола, заметно отличающегося от породообразующей магнезиально-железистой роговой обманки короткопризматическим, близким к изометрическому, обликом зёрен размером, не превышающим 0,1...0,15 мм, железо-чёрным цветом с бронзоватым отливом, и нахождением в магнитной фракции протоочки. Электронно-микроскопическими исследованиями зёрна амфибола выявлено его неоднородное строение, обусловленное структурой распада двухкомпонентного твердого раствора, представленной собственно амфиболовой матрицей и обособившейся фазой Fe-содержащего рутила, ламели которого

ориентированы параллельно (110) минерала-хозяина (рис. 1).

Химический состав амфиболовой матрицы отвечает феррокерсутиту (табл. 1), отличающемуся от теоретического [5] повышенной калиевостью при низком содержании Na_2O , несколько пониженным количеством FeO и Al_2O_3 и резкой насыщенностью TiO_2 (17,75...24,55 мас. %), превышающей более чем в 1,5–2 раза максимально установленное среднее для керсутита – 10,33 мас. % [6]. Характерная особенность химического состава исследуемого минерала – разброс содержаний минералообразующих компонентов по профилю матри-

цы – от центра к краю зерна. В приведённых кристаллохимических формулах (табл. 1) избыток атомов Ti^{4+} показан не только в катионной составляющей, но и в анионной, изоморфно с Si^{4+} . В анионной составляющей формулы феррокерсутита исключена группа $(\text{OH})^-$, отсутствие которой и доминирование O^{2-} в позициях, обычно занимаемых гидроксилем, доказано в последние годы теоретическими и экспериментальными исследованиями [7].

Второй компонент структуры распада твёрдого раствора, Fe-содержащий рутил, представлен параллельно ориентированными, удлинёнными или

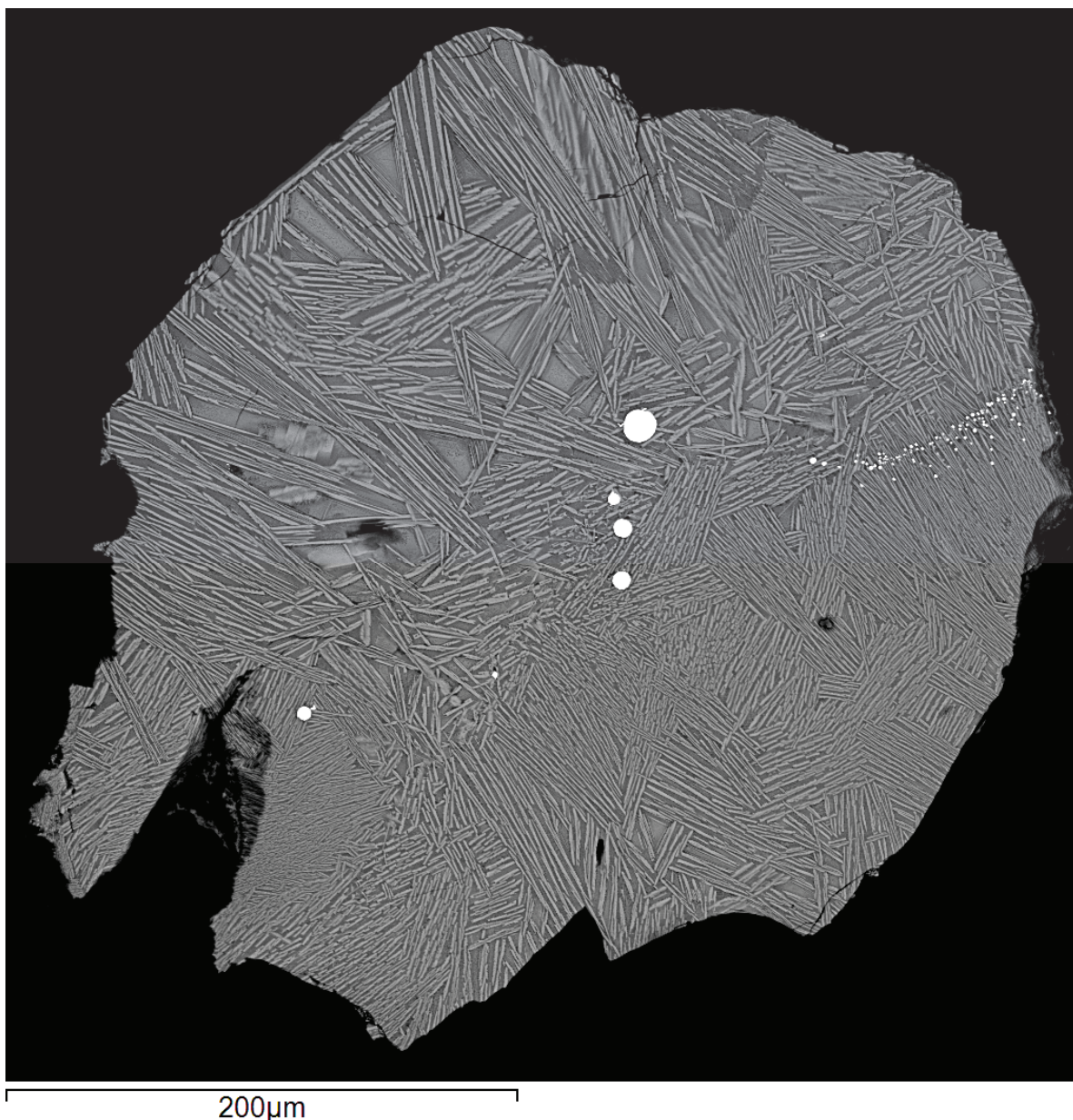


Рис. 1. Зерно феррокерсутита со структурой распада твёрдого раствора. Темно-серое – феррокерсутит; вытянутые пересекающиеся ламели – железистый рутил; белые округлые зёрна – самородное железо. Здесь и на последующих рисунках изображение в обратно рассеянных электронах

Fig. 1. Ferrokaersutite grain with the breakdown structure of solid solution. Dark-grey – ferrokaersutite; drawn cross lamellae – ferrous rutile; white rounded grains – native iron. Here and in the other figures, the image is in back-scattered electrons

прерывистыми пластинками, пересекающимися под тупыми или острыми углами в направлении плоскостей спайности (110), образуя резкие прямолинейные, в отдельных участках перистые границы (рис. 2). Толщина пластинок 2,5...3 мкм и менее 0,8...0,6 мкм по краю матрицы. В химическом составе Fe-содержащего рутила, кроме тех же петрогенных элементов феррокерсутитовой матрицы, в отдельных его пластинках появляются примеси Cr₂O₃ (0,28...0,42 мас. %), в единичном случае – MgO. Как и в феррокерсутите, среди щелочных компонентов доминирует K₂O при отсутствии или эпизодическом появлении Na₂O (табл. 2).

Таблица 1. Химический состав феррокерсутита (мас. %)

Table 1. Chemical composition of ferrokaersutite (wt. %)

Точка Point	SiO ₂	TiO ₂	MnO	FeO	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Сумма Total
1	28,6	20,37	15,79	15,79	6,54	11,68	1,9	0,8	101,47
2	30,42	21,56	13,35	13,37	7,99	9,09	3,29	0,97	100,14
3	28,18	24,55	13,55	14,74	7,26	8,56	3,11	0,78	100,73
4	29,99	23,09	13,39	14,58	7,86	8,81	2,99	0,97	101,68
5	25,86	21,87	16,18	17,35	5,76	11,03	1,57	0,69	100,31
6	26,46	21,15	16,39	17,15	5,82	11,21	1,69	0,78	100,65
7	32,41	18,1	13,42	14,41	8,29	9,04	3,67	1,11	100,45
8	31,38	17,75	14,73	15,68	7,61	9,98	2,95	1,01	101,1

Примечание: 1) здесь и в последующих таблицах всё железо приводится как FeO+Fe₂O₃; 2) номера анализа соответствует точкам анализируемого феррокерсутита на рис. 2.

Note: 1) here and in all other tables the whole iron is given as FeO+Fe₂O₃; 2) numbers of the analysis correspond to the points of the investigated ferrokaersutite in Fig. 2.

Таблица 2. Химический состав Fe-содержащего рутила структуры распада (мас. %)

Table 2. Chemical composition of Fe-containing rutile of the breakdown structure (wt. %)

Точка Point	TiO ₂	FeO	SiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	Na ₂ O	Сумма Total
9	69,26	11,04	7,39	6,68	4,21	1,47	1,6	–	0,42	102,07
10	69,07	12,73	6,04	7,72	3,72	1,67	1,14	0,42	–	102,51
11	68,62	13,13	6,87	6,61	3,55	2,03	0,89	0,28	–	102,20
12	65,32	13,11	9,52	7,73	4,35	1,55	1,82	–	0,42	103,82
13	66,36	14,6	6,18	9,28	3,08	1,93	0,92	–	–	102,35
14	70,56	12,24	6,7	6,28	3,5	1,4	1,02	0,41	–	102,11
15	64,67	13,33	7,3	9,87	3,51	2,39	1,11	–	–	102,17

Примечание: 1) здесь и в последующих таблицах прочерк – элемент не установлен; 2) повышенные суммы анализов объясняются возможным присутствием в составе ΣFeO значительной доли ионов Fe²⁺.

Note: 1) here and in all other tables «–» is the element is not determined; 2) the increased sums of analyses are explained by possible presence of considerable part of Fe²⁺ ions in ΣFeO composition.

Самородное железо, как отмечалось, образует многочисленные включения округлых зёрен, цепочковидно расположенных в матрице феррокерсутита и ориентированных субпараллельно плоскости (110) его кристалла. Наиболее крупные индивиды металлида (4...13 мкм) сосредоточены в цен-

тральном участке феррокерсутитовой матрицы, а обильная сыпь мелких зёрен (≤1...2 мкм) образует линейные обособления по периферии кристалла (рис. 1). Включения каплевидных самородных металлидов, в том числе железа, в породообразующих минералах отмечается многими исследователями [8–13], закономерно ориентированные удлиненные микрозёрна железа изучены в структуре распада смешанного кристалла ильменита [14]. Наблюдаемое ориентированное распределение металлида Fe в амфиболовой матрице объясняется теорией роста кристалла в расплаве, содержащем посторонние механические примеси, отодвигаемые растущей гранью [15], что и предопределило линейное расположение мелких глобул железа параллельно растущей грани (110) кристалла. Границы округлых зёрен металлида с минералом-хозяйном резкие, прямолинейные, на более крупных индивидах Fe наблюдаются червеобразные ответвления в амфиболовую матрицу и несколько «размытые» границы (рис. 2), что объясняется частичным подплавлением недостаточно остывших глобул Fe. Концентрируются металлиды между ламелями Fe-содержащего рутила, которые или огибают округлые зёрна железа, или прерываются на границе с ними (рис. 3). Подобное взаимоотношение продукта распада твёрдого раствора и округлых зёрен самородного Fe свидетельствует о захвате растущим кристаллом феррокерсутита из расплава на раннемагматической стадии (протокристаллизации) закристаллизованного в форме разлитых по размеру глобул металлического железа. Сферическая форма металлида, как показано исследованиями самородного минералообразования в базитовых и гранитоидных магмах [16, 17], обусловлена капельно-жидкими обособлениями металлической фазы Fe из силикатного расплава.

Кристаллохимические формулы в пересчёте на феррокерсутит

1. (K_{0,413}Na_{0,265}Ca_{2,128}(Mn_{2,295}Fe_{2,256})_{4,54}Ti_{1,502}[Al_{1,318}(Si_{1,885}Ti_{1,115})₆O₂₂]₂O₂
2. (K_{0,826}Na_{0,307}Ca_{2,23}(Mn_{1,85}Fe_{1,83})_{3,68}Ti_{1,641}[Al_{1,542}(Si_{1,975}Ti_{1,023})₆O₂₂]₂O₂
3. (K_{0,871}Na_{0,256}Ca_{1,55}(Fe_{2,084}Mn_{1,94})_{4,024}Ti_{1,887}[Al_{1,459}(Si_{1,765}Ti_{1,016})₆O₂₂]₂O₂
4. (K_{0,633}Na_{0,312}Ca_{1,569}(Fe_{2,028}Mn_{1,885})_{3,911}Ti_{1,871}[Al_{1,54}(Si_{1,884}Ti_{1,016})₆O₂₂]₂O₂
5. (K_{0,325}Na_{0,216}Ca_{1,918}(Fe_{2,353}Mn_{2,223})_{4,576}Ti_{1,792}[Al_{1,101}(Si_{1,125}Ti_{0,873})₆O₂₂]₂O₂
6. (K_{0,317}Na_{0,265}Ca_{2,108}(Fe_{2,511}Mn_{2,49})_{4,94}Ti_{1,417}[Al_{1,201}(Si_{1,632}Ti_{1,368})₆O₂₂]₂O₂
7. (K_{0,785}Na_{0,145}Ca_{1,623}(Fe_{2,02}Mn_{1,905})_{3,925}Ti_{1,712}[Al_{1,637}(Si_{1,481}Ti_{0,569})₆O₂₂]₂O₂
8. (K_{0,635}Na_{0,331}Ca_{1,805}(Fe_{2,212}Mn_{2,105})_{4,317}Ti_{1,547}[Al_{1,533}(Si_{1,294}Ti_{0,706})₆O₂₂]₂O₂

Кристаллохимические формулы Fe-содержащего рутила

9. (Ti_{0,708}Fe_{0,137}Si_{0,114}Mn_{0,077}Al_{0,068}K_{0,028}Ca_{0,021}Na_{0,011})_{1,163}O₂
10. (Ti_{0,694}Fe_{0,169}Si_{0,103}Mn_{0,096}Al_{0,064}Ca_{0,026}K_{0,021}Cr_{0,005})_{1,179}O₂
11. (Ti_{0,712}Fe_{0,163}Si_{0,095}Mn_{0,089}Al_{0,058}Ca_{0,03}K_{0,016}Mg_{0,005}Cr_{0,003})_{1,17}O₂
12. (Ti_{0,672}Fe_{0,15}Si_{0,13}Mn_{0,095}Al_{0,07}K_{0,032}Ca_{0,023}Na_{0,011})_{1,184}O₂
13. (Ti_{0,711}Fe_{0,174}Mn_{0,112}Si_{0,088}Al_{0,052}Ca_{0,03}K_{0,016})_{1,183}O₂
14. (Ti_{0,725}Fe_{0,163}Si_{0,091}Mn_{0,084}Al_{0,056}Ca_{0,02}K_{0,018}Cr_{0,004})_{1,162}O₂
15. (Ti_{0,691}Fe_{0,158}Mn_{0,119}Si_{0,104}Al_{0,059}Ca_{0,036}K_{0,02})_{1,186}O₂

Химический состав самородного металлида, проанализированный в различных его зёрнах (рис. 4), отвечает практически чистому железу с примесью Ti (1,21...3,09 ат. %) и Mn, не превышающего 0,56 ат. % (табл. 3).

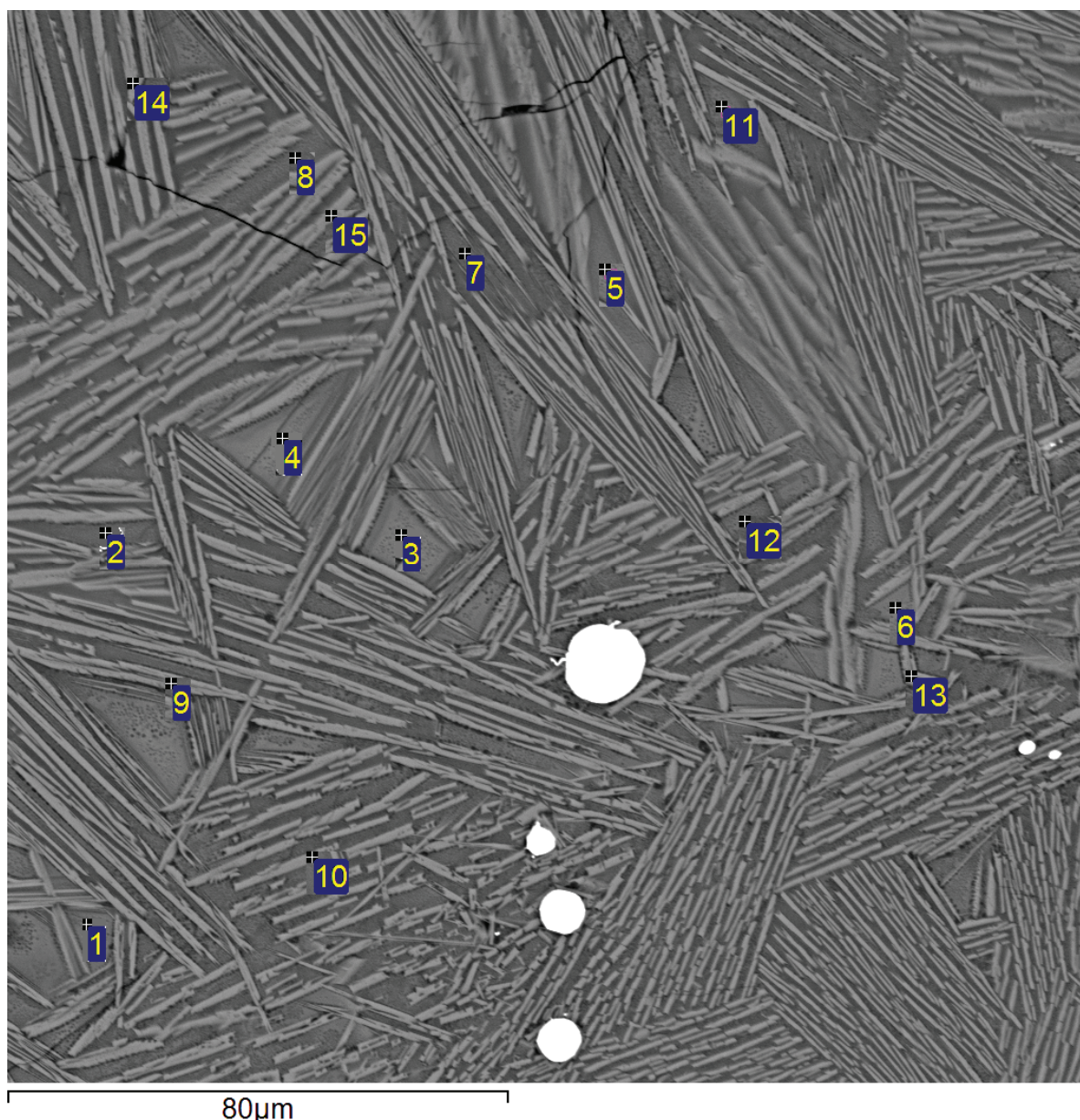
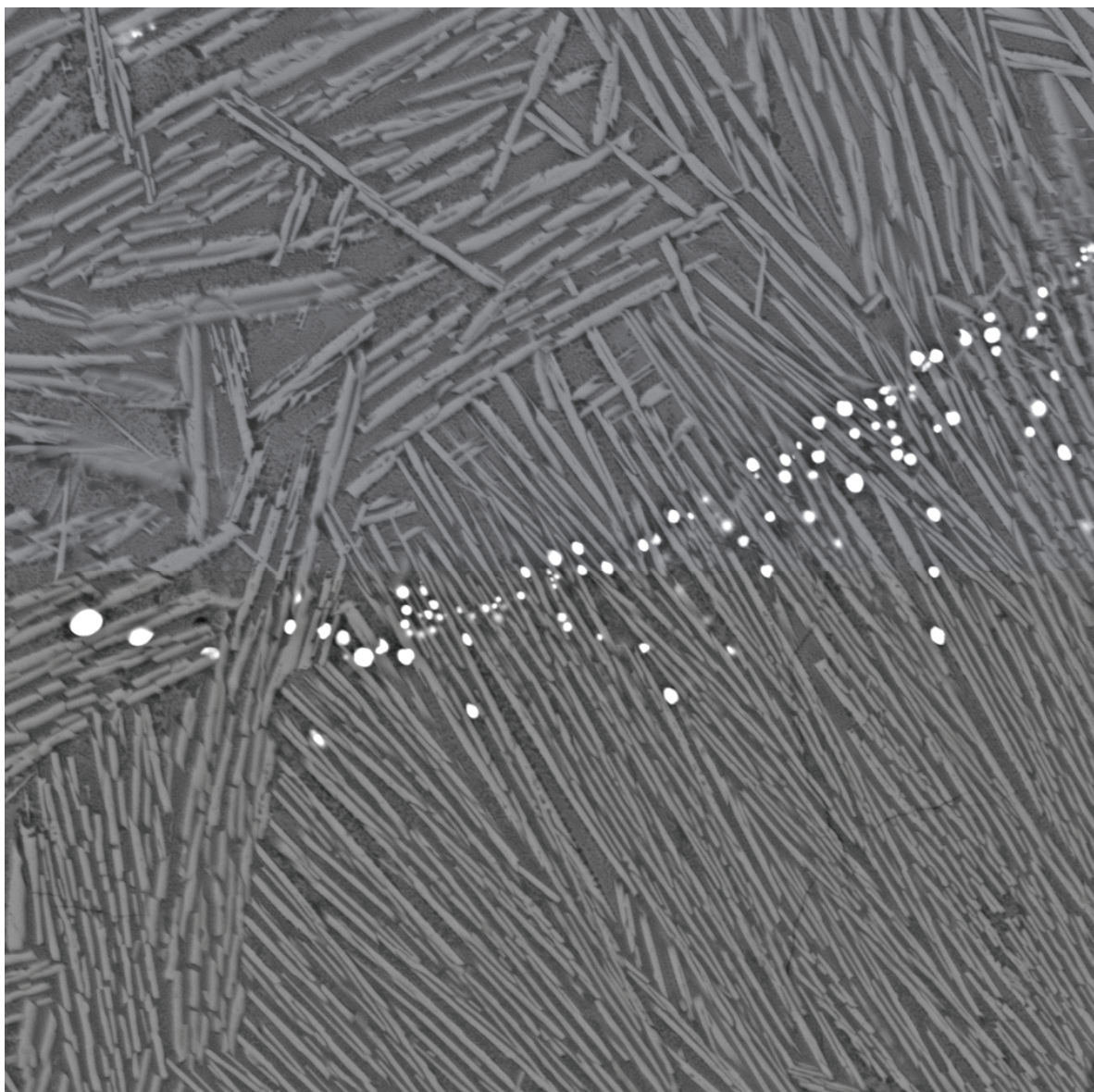


Рис. 2. Фрагмент структуры распада феррокерсутита: тёмно-серое – феррокерсутит; светло-серые вытянутые ламели – Fe-содержащий рутил; белые округлые зёрна – самородное железо. Цифры 1–8 соответствуют точкам анализа феррокерсутита, 9–15 – точкам анализа ламелей Fe-содержащего рутила

Fig. 2. Fragments of the structure of ferrokaersutite breakdown: dark-grey – ferrokaersutite; light-grey drawn lamellae – Fe-containing rutile; white rounded grains – native iron. 1–8 correspond to the points of analysis of ferrokaersutite, 9–15 correspond to the points of analysis of Fe-containing rutile lamellae

В магнитной фракции этой же протоочки плагиогранита диагностировано два зерна металла Fe в форме мелких сферул размером не более 0,15...0,2 мм с микропористой, участками ямчатой или бугорчатой поверхностью рельефа. Электронно-микроскопическими исследованиями среза глобуля чётко проявляются его неровные, залистые или выступающие границы (рис. 5). Химический состав, проанализированный по профилю зерна, отвечает беспримесному железу с содержанием Fe 99,18...100,5 ат. %. По периферии зерна

наблюдаются микронных размеров округлые пустотки, появление которых многими исследователями самородного железа объясняется присутствием в растворённой форме и в виде газовых включений компонентов флюида, главным образом водорода [17]. Судя по чистоте химического состава металла Fe, обособление его капель от силикатной матрицы произошло в высокотемпературных условиях, близких к температуре плавления железа (1535 °C). При кристаллизации глобуля Fe и последующих фазовых его превращений в



40µm

Рис. 3. Цепочковидное распределение металлидов железа в феррокерсутите; ламели Fe-содержащего рутила (светлые) огибают каплевидные включения Fe или прерываются на границе с ними

Fig. 3. Catenate distribution of iron metallides in ferrokaersutite; lamellae of Fe-containing rutile (light) pass around the drop-shaped Fe impurities or break up on the boundary with them

условиях понижающейся температуры расплава и невысоком парциальном давлении кислорода ($\lg f_{O_2} = -17,5 \dots -13,5$) [3] глобуль Fe, не затронутый процессом окисления, сохранился в качестве включения в раннемагматическом минерале, видимо, кварце, реликтовые зёрна которого диагностированы в микроямках поверхности глобуля. Неровности поверхности рельефа объясняются нахождением его в форме включений в раннемагматических минералах и деформацией в процессе механического дробления материала пробы.

Таблица 3. Химический состав самородного железа (ат. %)

Table 3. Chemical composition of native iron (at. %)

Элементы Elements	1	2	3	4	5	6	7
Fe	99,79	99,47	98,50	98,47	98,66	97,42	97,68
Ti	1,21	1,32	1,64	2,06	1,76	3,09	2,75
Mn	0,19	0,21	0,45	0,32	0,26	0,56	0,32
Сумма/Total	101,19	100,97	100,59	100,85	100,68	101,07	100,75

Примечание: порядковые номера соответствуют точкам анализируемых зёрен железа на рис. 4.

Note: index numbers correspond to the points of the investigated grains in Fig. 4.

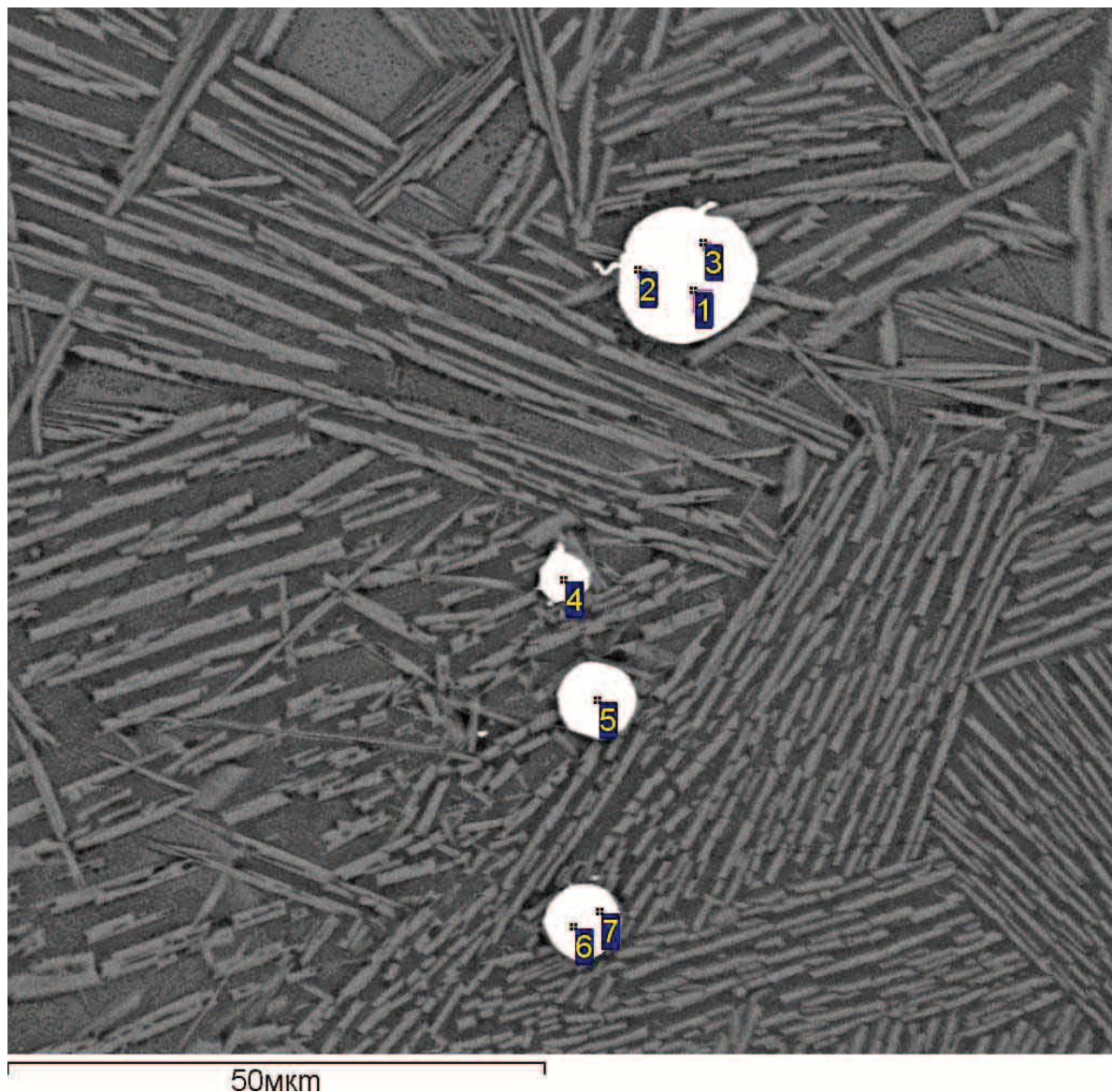


Рис. 4. Включения самородного железа в феррокерсутите; цифрами обозначены анализируемые точки зёрен

Fig. 4. Native iron impurities in ferrokaersutite; the investigated points of grains are marked with the figures

Таким образом, в изученных гранитоидах главной фазы комплекса самородные металлы железа с примесью Ti, Mn и беспримесное железо (феррит) установлены лишь в плагиограните Новониколаевского массива (г. Россыпуха). Глобулы (Fe, Ti, Mn), преимущественно микронных размеров, оказались законсервированными в феррокерсутите – ксеногенном амфиболе для гранитных пород. Появление ксенокристалла феррокерсутита, присутствие в продукте его распада – железосодержащем рутиле примеси Cr, типоморфного элемента базитовых магм, обязано порции реликтового габброидного расплава, поступившего с плагиогранитной магмой в камеру кристаллизации. Судя по химическому составу феррокерсутита (обогащённость титаном, железом, обилие включений глобулей ме-

таллидов), инъецированный ксеногенный материал, по сути, представлял собой металлизированный расплав основного состава, производный первой габброидной фазы. В гранитоидах завершающих третьей и четвертой фаз внедрения – лейкоплагиогранитах и лейкогранитах, самородное железо среди аксессуарных минералов, а также в форме включений в породообразующих не установлено. Лишь в роговообманковом лейкоплагиогранит-порфире 3 фазы (Новониколаевский массив) отмечено сферическое зерно магнетита размером 0,1...0,15 мм железо-чёрного цвета с металлическим блеском. В срезе глобуль имеет однородное строение (рис. 6), довольно выдержанный химический состав, проанализированный по диаметру зерна, и отвечает практически чистому магнетиту с незначительной

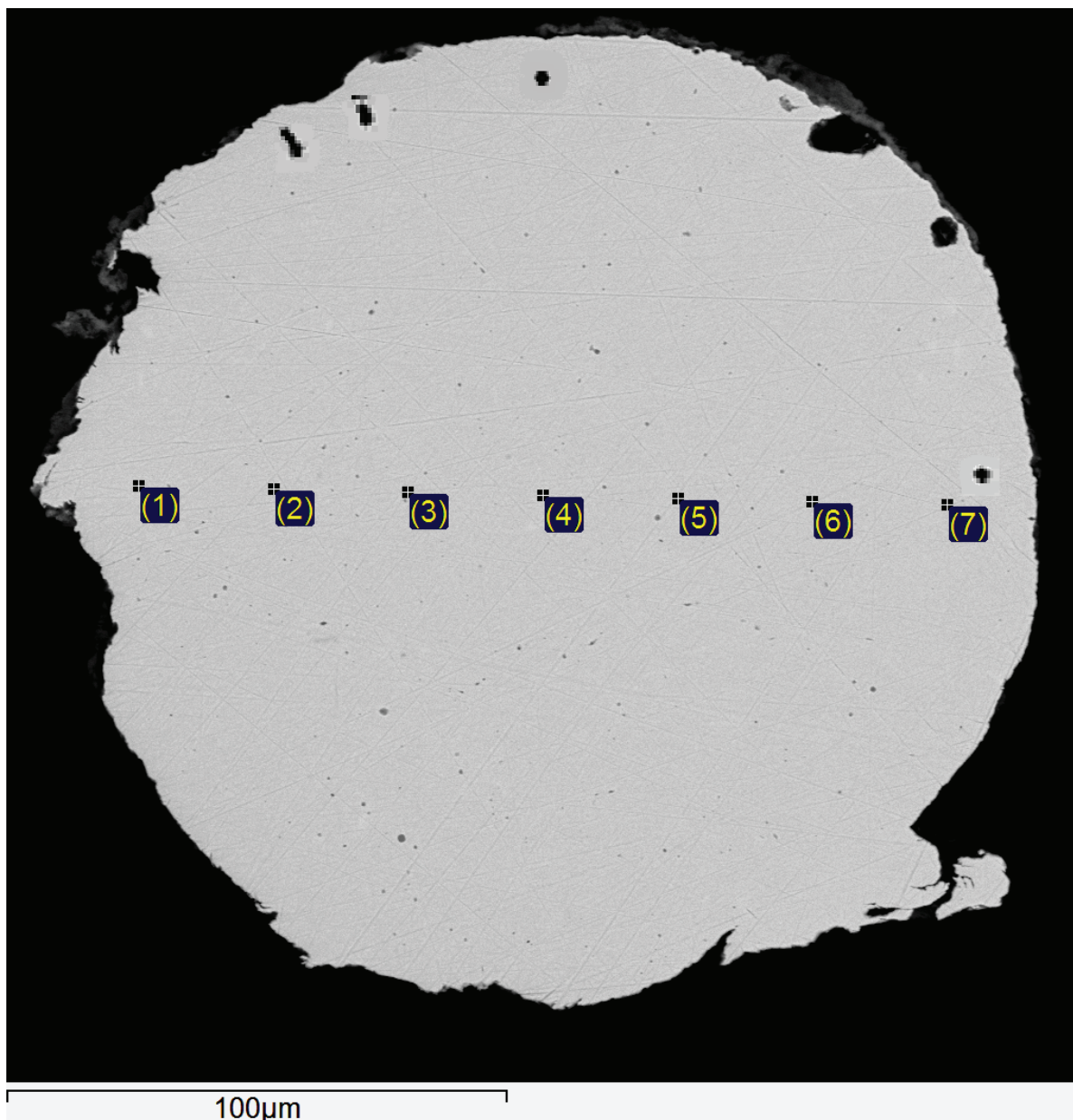


Рис. 5. Округлое зерно самородного железа с извилистыми границами; по краю зерна тёмно-серые округлые пустотки газовых пузырьков

Fig. 5. Rounded grain of native iron with wavy boundaries; dark-grey rounded blebs on the periphery of the grain

примесь Mn (табл. 5). В центральном участке зерна наблюдается овальной формы пустотка размером $60 \times 35 \text{ мкм}$ (рис. 6), и не исключается её принадлежность ядру железа, выпавшему из магнетитовой матрицы в процессе подготовки препарата. Шаровые оболочки магнетита вокруг ядер железа в магматических породах отмечаются многими исследователями [8–10, 18]. Согласно существующим представлениям [17, 19], окисление капель жидкого Fe происходит в раннемагматическую стадию в условиях понижения температуры и повышения кислородного потенциала по схеме: $\text{Fe} \rightarrow \text{иоцит}$ $\text{FeO} \rightarrow \text{магнетит}$ $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. Проведёнными элек-

тронно-микроскопическими исследованиями выделений промежуточной иоцитовой фазы в магнетитовой матрице не установлено, что, видимо, связано с резкой сменой умеренно-восстановительных условий кристаллизации на окислительные, неблагоприятные для обособления иоцита. Отсутствие в составе сферического магнетита примесей Ti, Al, Si, типоморфных для акцессорного титаномагнетита рассматриваемых пород [1–3], является следствием раннемагматического высокотемпературного окисления капельно-жидкого железа в условиях повышенной активности кислорода и относительной «сухости» расплава.

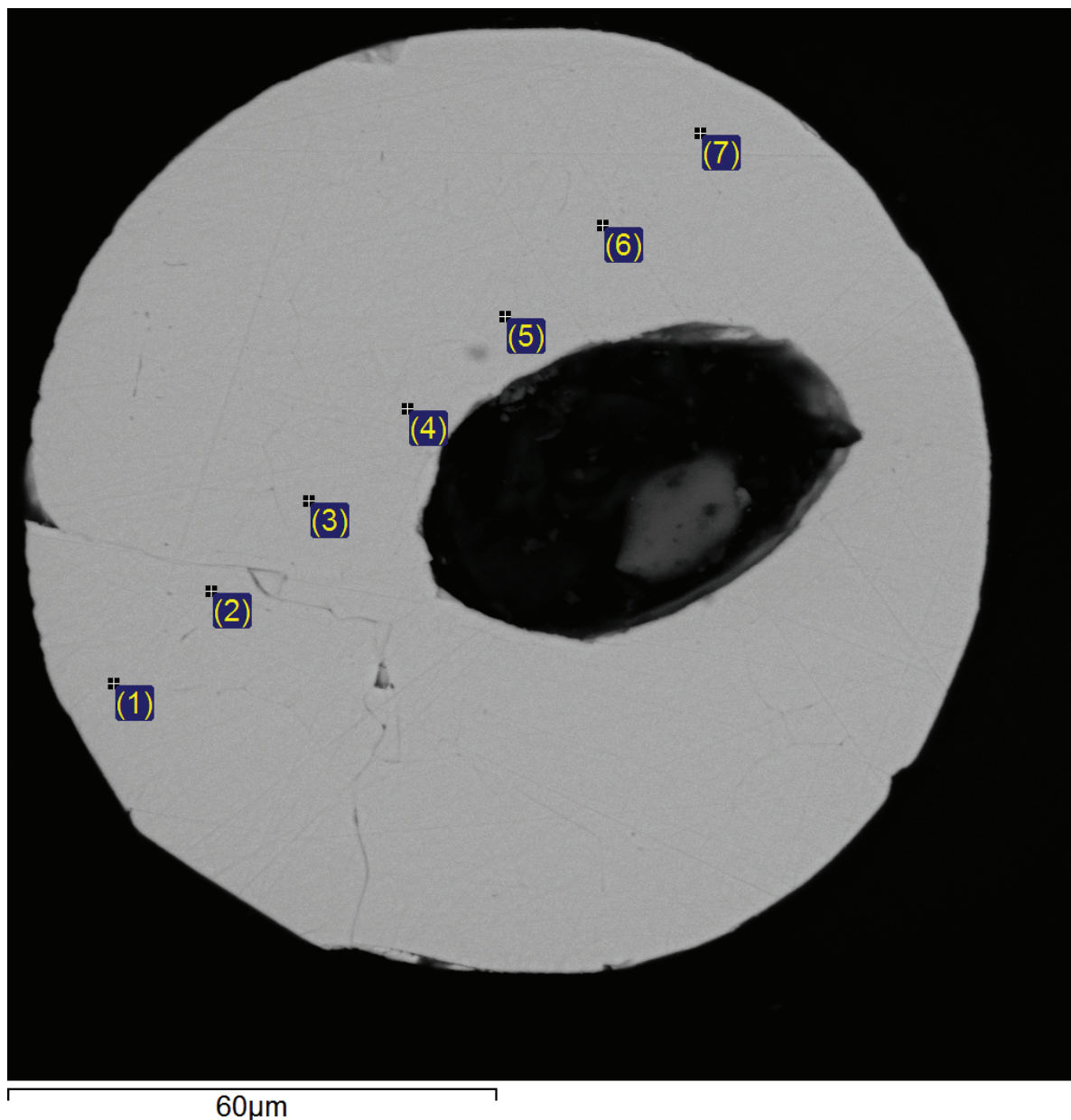


Рис. 6. Строение среза глобуля магнетита; в центре зерна тёмно-серое – пустотка

Fig. 6. Magnetite globule section structure; bleb is the dark-grey spot in the center of the grain

Таблица 5. Химический состав глобуля магнетита (мас. %)

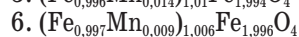
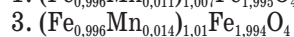
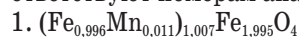
Table 5. Chemical composition of magnetite globule (wt. %)

Окислы/Oxides	1	2	3	4	5	6	7
FeO	30,12	30,34	30,49	30,03	30,26	29,98	30,33
Fe ₂ O ₃	66,95	67,45	67,78	66,76	67,25	66,64	67,43
MnO	0,33	0,41	0,33	0,27	0,33	0,29	0,28
Сумма/Total	97,4	98,2	98,6	97,06	97,84	96,91	98,04

Примечание: 1) содержание FeO и Fe₂O₃ получены пересчётом суммарного содержания железа пропорционально их стехиометрическому соотношению в магнетите; 2) порядковые номера соответствуют анализируемым точкам зерна магнетита, обозначенных на рис. 6.

Note: 1) FeO and Fe₂O₃ contents were obtained by recalculation of total iron content proportionally to stoichiometric ratio in magnetite; 2) index numbers correspond to the studied points of magnetite grains marked in Fig. 6.

Кристаллохимические формулы магнетита (соответствуют номерам анализа):



Заключение

Из изложенного материала следует, что в процессе становления в средне-верхнедевонское время полифазного алейско-змеиногорского гранитоидного комплекса проявилась металлизация магматического расплава железо-титан-марганцевой и ферритовой направленности. В настоящее время общепризнано объяснение сферической формы индивидов самородных металлов как результат их

ликвационного обособления из алюмосиликатного расплава в виде рудных капель, восстановленных под воздействием интрателлурического флюида, содержащего H , CH_4 , CO и др. [4, 10]. На резко восстановительный режим флюидов на ранних этапах эволюции «сухих» высокотемпературных алюмосиликатных расплавов указывается рядом исследователей [20], однако масштабность процесса металлизации в производных последовательных инъекций расплава была резко различной. Наиболее активно процесс ликвации железо-титан-марганцевых металлидов проявился в базитовом расплаве, сформировавшем габброиды первой фазы внедрения, на что указывает присутствие в плагиограните главной фазы ксеногенных кристаллов феррокерсутита, геденбергита – типоморфных минералов габброидных магм. Обильные включения законсервированных в феррокерсутите округлых зёрен металлидов (Fe, Ti, Mn), нахождение среди аксессуаров феррита в значительной мере обязано металлизированному габброидному расплаву, поступившему в камеру кристаллизации в процессе продвижения плагиогранитной магмы главной интрузивной фазы. Ликвация капель металлидов (Fe, Ti, Mn) и феррита в габброидном расплаве, видимо, имела место в промежуточном мантийном очаге под воздействием восстановительных интрателлурических флюидов, водородных и углеводородных по составу. Судя по насыщенности феррокерсутита K_2O , мантийные флюиды транспортировали калий, который в форме легколетучих бескислородных соединений может также выступать в роли восстановителя [17]. Температура отделения металлических фаз железа с примесью Ti , Mn и беспримесного косвенно оценивается по их парагенетической ассоциации с корундом, рутилом, температура плавления которых более $1500\text{ }^\circ\text{C}$. Согласно диаграмме устойчивости самородных металлов, окислов и силикатов в зависимости от температуры и фугитивности кислорода [17], совместное нахождение самородного железа, корунда, рутила возможно при температуре до $1550\text{ }^\circ\text{C}$ в интервале значений $\lg f_{O_2}$ от -30 до -25 . Подобные значения T и f_{O_2} наиболее вероятны для глубинного промежуточного магматического очага. Видимо, на раннем этапе развития габброидного магматизма существовали благоприятные условия для формирования и отделения флюидного рудного

расплава, обогащенного железом, титаном, марганцем. Сохранению устойчивости отделившейся металлической фазы железа способствовала также весьма низкая активность серы в магматическом расплаве.

Редкие находки глобулей железа в гранитоидных дифференциатах заключительных фаз свидетельствуют о существовавших условиях для восстановления и ликвации металлической фазы Fe , которые могли реализоваться как в мантийном промежуточном очаге, так и в процессе продвижения расплава по магмоподводящему каналу. Однако весьма ограниченная распространённость акцессорных металлидов железа, в том числе продукта их окисления – глобулей магнетита, связана с ослаблением режима водородно-углеродистых мантийных флюидов, ростом кислородного потенциала и щёлочности заключительных порций лейкогранитного расплава. На высокий кислородный потенциал формирования лейкократовых гранитов заключительной фазы, их обогащённость железом указывает широко распространённый раннемагматический акцессорный гематит, повышенные железистость и титанистость хлорбиотита, неструктурная примесь Fe^{3+} в плагиоклазе, калишпате.

Выводы

1. На начальной стадии эволюции полифазной магматической системы – этапе формирования габброидного расплава в условиях высоких температур и «сухости» расплава под воздействием интрателлурических водородно-углеродистых флюидов и при участии бескислородных соединений калия, проявилась интенсивная ликвация металлической фазы железа с примесью Ti и Mn из габброидного расплава и создавала на раннем этапе предпосылки для формирования рудоносных магматических систем.
2. В процессе длительно эволюционирующего гранитоидного расплава в мантийном промежуточном очаге резко восстановительный режим флюидов сменялся на возрастающую фугитивность кислорода, повышающуюся щёлочность расплава, что не способствовало проявлению процесса металлизации лейкогранитного расплава заключительной фазы становления гранитоидного комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туркин Ю.А. Тоналит-плагиогранит-лейкогранитовая формация Рудного Алтая // Природные ресурсы Горного Алтая. – 2009. – № 2. – С. 70–79.
2. Туркин Ю.А., Новоселов К.Л. Петролого-геохимические особенности девонских гранитоидов северо-западной части Рудного Алтая // Известия ТПУ. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 5–15.
3. Новоселов К.Л., Туркин Ю.А. Типоморфизм акцессорного титаномagnetита девонских гранитоидов северо-западной части Рудного Алтая // Известия ТПУ. – 2014. – № 1. – Т. 324. – С. 5–14.
4. Маракушев А.А. Петрогенезис. – М.: Недра, 1988. – 293 с.
5. Минералы. Справочник, Т. III, вып. 3. – М.: Изд-во «Наука», 1981. – 397 с.
6. Пятенко Ю.А., Воронков А.А., Пудовкина З.В. Минералогическая кристаллохимия титана. – М.: Наука, 1976. – 155 с.
7. Бритвин С.Н. Сложные оксиды и силикаты титана, ниобия и тантала в щелочных системах: кристаллохимия, условия образования, свойства и новые области применения: автореф. дис. ... д-ра наук. – СПб., 2013. – 42 с.
8. Трунилина В.А. Самородные металлы и интерметаллические соединения в магматических породах Верхояно-Колымских мезозой // Самородное металлообразование в магматическом

- процессе: сб. науч. трудов. – Якутск: ЯНЦ СО АН СССР, 1991. – С. 157–176.
9. Сандимирова Е.И. Микросферы как индикаторы флюидных (флюидно-магматических) процессов областей современного вулканизма // Вулканизм и геодинамика: IV Всерос. симпозиум по вулканологии и палеовулканологии. – Петропавловск-Камчатский, 2009. – С. 806–809.
 10. Гребенников А.В. Эндогенные сферулы мел-палеогеновых игнимбритовых комплексов Якутинской вулcano-тектонической структуры (Приморье) // Зап. Рос. Минер. общ-ва. – 2001. – Ч. СХХХХ. – № 3. – С. 56–68.
 11. Fredriksson K., Martin R. The origin of black spherules found in Pacific islands, deep-sea sediments, and Antarctic ice // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* – 1963. – V. 27. – P. 245–248.
 12. Lefe'vre R., Gaudichet A., Billon-Galland M.A. Silicate microspherules intercepted in the plume of Etna volcano // *Nature.* – 1986. – V. 322. – P. 817–820.
 13. McCall G.J.H. Tectites: Showers of Glass from the Sky. – London, Geological Society, 2001. – 256 p.
 14. Haggerty S.E., Toft P.B. Native iron in the continental lower crust: petrological and geophysical implications // *Science.* – 16 August 1985. – V. 229. – P. 647–649.
 15. Леммлейн Г.Г. Морфология и генезис кристаллов. – М.: Наука, 1973. – 328 с.
 16. Самородное металлообразование в магматическом процессе: сб. науч. трудов. – Якутск: ЯНЦ СО АН СССР, 1991. – 184 с.
 17. Самородное металлообразование в платформенных базитах / Б.В. Олейников, А.В. Округин, М.Д. Томшин и др. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1985. – 188 с.
 18. О магматической природе самородного железа в гранитоидах и продуктах его окисления / В.Д. Тянь, П.В. Ермолов, Н.В. Попов, Т.К. Рафиков // *Геология и геофизика.* – 1976. – № 5. – С. 48–54.
 19. Оценка физико-химических условий появления и устойчивости самородных металлов в магматических образованиях / И.А. Зотов, Б.В. Олейников, А.В. Округин, Е.Б. Курдюков // *Докл. АН СССР.* – 1980. – Т. 255. – № 5. – С. 1260–1264.
 20. Флюидный режим Земли и проблема крупномасштабного рудообразования (на примере халькофильных металлов) / В.С. Кузубный, А.Л. Павлов, Ф.М. Ананьев и др. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ие, 1991. – 161 с.

Поступила 07.07.2015 г.

UDC 549.26:549.643.25:553.212

GENETIC FEATURES OF NATIVE IRON AND PRODUCTS OF ITS OXIDATION IN DEVONIAN GRANITOIDS OF THE ALEYSK-ZMEINOGORSKY COMPLEX (NORTH-WESTERN AREA OF RUDNY ALTAI)

Konstantin L. Novoselov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634034, Russia. E-mail: nkonstantin1@rambler.ru

The relevance of researching the native iron-ore mineral formation is determined by identifying mineralogical and physical and chemical criteria for potential ore bearing of the polyphase Aleysk-Zmeinogorsky granitoid complex which occupies the most north-western part of the Russian Rudny Altai territory.

The aim of the research is a detail and comprehensive description of morphology, chemical composition, occurrence, paragenesis and time of native iron metallides segregation in the course of evolutionary development of a fluid-magmatic system.

Research methods include conventional mineralogical and petrographical methods, as well as mineragraphic methods targeting at investigation of the accessory native iron and its associated minerals obtained from crashed granitoid samples according to a common procedure. To carry out analytical studies, the author used the X-ray spectral analysis methods performed on an electronic scanning microscope JSM-6510LV (Jeol Ltd) fitted with an energy-dispersive spectrometer INCA Energy 350+ in a laboratory of the Geology and Mineralogy Institute of the Siberian branch of the Russian Academy of Science (Novosibirsk) (by an analyst M.V. Khlestov).

Research outcomes. The author identified the presence and distribution of accessory native iron microspheres in rocks of successive phases of the granitoid complex formation and singled out two microsphere varieties by chemical composition, i. e. iron with Ti and Mn impurities and pure iron (ferrite); thoroughly studied the structure, chemical composition and breakdown structure of a xenogenic crystal of ferrokaersutite genetically related to a metalized gabbroid silicate melt supplied to the hypabyssal crystallization chamber by plagiogranitic melt in plagiogranitic rocks of the main intrusion phase. Paragenetic associations of native iron, as well as location and conditions of native Fe phase segregation out of a silicate melt of the native phase was identified.

Conclusions. A liquation separation of a metallic phase of iron, including iron with Ti, Mn impurities, clearly manifested itself at an early magmatic stage of a gabbroid melt formation in an intermediate vent under the effect of a reducing intratelluric hydrogen-carbonic fluid together with active action of potassium. The limited occurrence of native Fe globules in derived granitoid melts, especially in finishing leucogranit differentiates, are related to weakening the reducing character of mantle fluids which are displaced by the hyperalkaline fluids with increased potential oxygen. The obtained new data have high petrological importance and practical value for identifying a potential productivity of a granitoid complex for iron-titanium ore mineralization.

Key words:

Globules, native iron, ferrokaersutite, breakdown structure of a solid solution, granitoids.

REFERENCES

1. Turkin Yu.A. Tonalit-plagiogranit-leykogranitovaya formatsiya Rudnogo Altaya [Tonalite-plagiogranite-leucogranite formation of Rudny Altai]. *Prirodnye resursy Gornogo Altaya*, 2009, no. 2, pp. 70–79.
2. Turkin Yu.A., Novoselov K.L. Petrologo-geokhimicheskie osobnosti devonskikh granitoidov severo-zapadnoy chasti Rudnogo Altaya [Petrological and geochemical features of Devonian granitoids in north-west part of Rudny Altai]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 5–15.
3. Novoselov K.L., Turkin Yu.A. Tipomorfizm aktsessornogo titanomagnetita devonskikh granitoidov Severo-zapadnoy chasti Rudnogo Altaya [Accessory titanomagnetite typomorphism of Devonian granitoids in north-western area of Rudny Altai]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 5–14.
4. Marakushev A.A. *Petrogenesis* [Petrogenesis]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 293 p.
5. *Mineraly. Spravochnik* [Minerals]. Moscow, Nauka Publ., 1981. Vol. III, Iss. 3. 397 p.
6. Pyatenko Yu.A., Voronkov A.A., Pudovkina Z.V. *Mineralogicheskaya kristallogimiya titana* [Mineralogical crystallochemistry of titanium]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 155 p.
7. Britvin S.N. *Slozhnye oksidy i silikaty titana, niobiya i tantala v shchelochnykh sistemakh: kristallogimiya, usloviya obrazovaniya, svoystva i novye oblasti primeneniya*. Dis. Doct. nauk [Complex oxides and silicates of titanium, niobium and tantalum in alkali systems: crystal chemistry, conditions of formation, properties and new applications. Dr. Diss.]. St-Petersburg, 2013. 42 p.
8. Trunilina V.A. Samorodnye metally i intermetallicheskie soedineniya v magmaticheskikh porodakh Verkhoyano-Kolymyskikh mezozoid [Native metals and intermetallic compounds in magmatic rocks of Verkhoyansk-Kholymsky mesozoids]. *Samorodnoe metallobrazovanie v magmaticheskoy protsesse: Sbornik nauchnykh trudov* [Standard metal-formation in magmatic process: proc.]. Yakutsk, YaNTs SO AN SSSR Press, 1991. pp. 157–176.
9. Sandimirova E.I. Mikrosferuly kak indykatory flyuidnykh (flyuidno-magmaticheskikh) protsessov oblastey sovremennogo vulkanizma [Microspherules as indicators of fluid (fluid-magmatic) processes occurring in areas of present volcanism]. *Vulkanizm i geodinamika. IV Vserossiyskiy simpozium po vulkanologii i paleovulkanologii* [Volcanism and geodynamics. IV All-Russian symposium in volcanology and paleo-volcanology]. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2009. pp. 806–809.
10. Grebennikov A.V. Endogennyye sferuly mel-paleogenovykh ignimbritovykh kompleksov Yakutinskoj vulkano-tektonicheskoy struktury (Primore) [Endogeneous spherules of cretaceous-paleogene ignimbrite complexes of Yakutinsky volcanic-tectonic structure]. *Zapiski RMO*, 2001, no. 3, P. CXXXX, pp. 56–68.
11. Fredriksson K., Martin R. The origin of black spherules found in Pacific islands, deep-sea sediments, and Antarctic ice. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1963, vol. 27, pp. 245–248.
12. Lefe`vre R., Gaudichet A., Billon-Galland M.A. Silicate microspherules intercepted in the plume of Etna volcano. *Nature*, 1986, vol. 322, pp. 817–820.
13. McCall G.J.H. *Tectites: Showers of Glass from the Sky*. London, Geological Society, 2001. 256 p.
14. Haggerty S.E., Toft P.B. Native iron in the continental lower crust: petrological and geophysical implications. *Science*, 16 august 1985, vol. 229, pp. 647–649.
15. Lemmleyn G.G. *Morfologiya i genezis kristallov* [Morphology and genesis of the crystals]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 328 p.
16. *Samorodnoe metallobrazovanie v magmaticheskoy protsesse: Sbornik nauchnykh trudov* [Native metals formation in magmatic process]. Yakutsk, YaNTs SO AN SSSR Press, 1991. 184 p.
17. Oleynikov B.V., Okrugin A.V., Tomshin M.D. *Samorodnoe metallobrazovanie v platformennykh bazitakh* [Native metals formation in platform basites]. Yakutsk, YaF SO AN SSSR Press, 1985. 188 p.
18. Tyan V.D., Ermolov P.V., Popov N.V., Rafikov T.K. O magmaticheskoy prirode samorodnogo zheleza v granitoidakh i produktakh ego okisleniya [About the magmatic nature of native iron in granitoids and products of its oxidation]. *Geologiya i geofizika*, 1976, no. 5, pp. 48–54.
19. Zotov I.A., Oleynikov B.V., Okrugin A.V., Kurdyukov E.B. Ot-senka fiziko-khimicheskikh usloviy poyavleniya i ustoychivosti samorodnykh metallov v magmaticheskikh obrazovaniyakh [Assessment of physical and chemical conditions of occurrence and sustainability of native metals in magmatic formations]. *Doklady AN SSSR*, 1980, vol. 255, no. 5, pp. 1260–1264.
20. Kuzebny V.S., Pavlov A.L., Ananov F.M. *Flyuidny rezhim Zemli i problema krupnomasshtabnogo rudoobrazovaniya (na primere khalkofilnykh metallov)* [Earth's fluid conditions and the issue of large-scale ore formation on the example of chalcophilic metals]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991. 161 p.

Received: 07 July 2015.

УДК 621.438:681.5.09

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Августинович Валерий Георгиевич,

д-р техн. наук, профессор каф. авиационных двигателей Аэрокосмического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, Пермь – ГСП, Комсомольский пр., 29. E-mail: august@avid.ru

Кузнецова Татьяна Александровна,

канд. техн. наук, доцент каф. конструирования и технологий в электротехнике Электротехнического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, Пермь – ГСП, Комсомольский пр., 29. E-mail: tatianaakuznetsova@gmail.com

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки алгоритмических методов повышения надежности систем автоматического управления нового поколения газотурбинных двигателей (САУ ГТД), применяемых в различных отраслях промышленности, в частности в газотурбинных электростанциях, утилизирующих нефтяной попутный газ на нефтяных месторождениях Российской Федерации.

Цель работы: обоснование эффективности создания алгоритмической избыточности на основе применения встроенных математических моделей для повышения надежности САУ ГТД. Разработка робастной линейной адаптивной математической модели газотурбинного двигателя, работающей в реальном масштабе времени, удовлетворяющей высоким требованиям к точности отображения объекта в условиях детерминированных, стохастических и случайных изменений состояния двигателя.

Методы исследования. Построение динамической линейной модели ведется методом пространства состояний, при этом в качестве основы статической модели двигателя используется дроссельная характеристика индивидуального двигателя, полученная на сдаточных испытаниях или на «гонке» в эксплуатации после проведения обслуживания. Учет детерминированных изменений состояния двигателя ведется методом введения поправки статической характеристики на ухудшение КПД узлов двигателя с наработкой по ресурсу, которое определяется с помощью матрицы коэффициентов влияния. Учет стохастических изменений ведется методом анализа диагностической матрицы ситуаций, в том числе с применением численных методов Монте-Карло с использованием последовательностей случайных чисел, полученных по алгоритму И.М. Соболя (LP?-последовательностей). Учет случайных изменений ведется на основе методов одномерной и многомерной Калман-фильтрации. При разработке алгоритмов применялись методы объектно-ориентированного программирования на языке C++ и методы модельного эксперимента в среде MatLab.

Результаты. Разработаны алгоритмы адаптивной встроенной математической модели газотурбинного двигателя, позволяющей выполнять функции определения отказов информационных каналов и замещения информации отказавших каналов в условиях детерминированных, стохастических и случайных изменений состояния двигателя. Проведенные стендовые безмоторные и моторные испытания разработанных алгоритмов показали их работоспособность и высокую эффективность для повышения надежности САУ ГТД.

Ключевые слова:

Система автоматического управления, газотурбинный двигатель, встроенная модель двигателя, надежность, адаптивность, помехи, изменения двигателя, Калман-фильтрация, LP?-последовательности.

Введение

Проблема выбора оптимальных направлений утилизации попутного нефтяного газа (ПНГ) связана с решением актуальных социально-экономических вопросов.

По экспертным оценкам [1] до 12 % от общего объема загрязнений в России составляют выбросы на факельных установках. Из-за сжигания попутного нефтяного газа в атмосферный воздух происходит выброс вредных загрязняющих веществ, в частности диоксида углерода, вызывающего парниковый эффект.

В Энергетической стратегии России на период до 2030 г., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации № 1 715-р от 13.11.2009 г., являющейся одним из основопола-

гающих нормативных документов по развитию топливно-энергетического комплекса, отдельно выделено направление, связанное с рациональным использованием попутного нефтяного газа. В соответствии с Постановлением правительства РФ № 7 от 8 января 2009 г. «О мерах по стимулированию сокращения загрязнения атмосферного воздуха продуктами сжигания ПНГ на факельных установках» ограничен объем сжигания ПНГ в факелах на месторождениях в размере не более 5 % от общего объема его добычи и установлены штрафные платежи за сверхлимитное сжигание газа.

При этом ПНГ является ценным углеводородным компонентом. В этой связи возможность рационального использования ПНГ делают его важным ресурсом оздоровления экологической обста-

новки и увеличения объема российских углеводородных запасов.

В частности, к путям утилизации ПНГ можно отнести его использование в качестве топлива на локальных энергоцентрах – высокотехнологичных газотурбинных электростанциях (ГТЭС). Основу ГТЭС составляет один или несколько газотурбинных двигателей (ГТД) – силовых агрегатов, механически связанных с электрогенератором и объединенных системой управления в единый энергетический комплекс.

ГТД как объект управления является сложной динамической системой, параметры которой характеризуются случайным разбросом в широком диапазоне, вызванным внешними и внутренними помехами.

Надежность двигателя во многом определяется качеством систем автоматического управления (САУ ГТД). Одним из основных направлений повышения надежности цифровых САУ ГТД является создание алгоритмической избыточности на основе применения встроенных адаптивных математических моделей двигателя, инвариантных к действию широкого спектра внешних и внутренних помех.

Основные методы и содержание исследования

Идея алгоритмического резервирования системы управления двигателем на основе встроенной математической модели очевидна и не нова [2–4]. Математическая модель как дополнительный (третий) независимый источник информации позволяет построить мажоритарную систему в двухканальных САУ (рис. 1) [5], выявляющую такие трудно идентифицируемые отказы отдельного канала, как «дрейф» параметра (неидентифицируемых в двухканальных схемах), и распознавать ситуации «отказ двигателя».

Основными требованиями к встроенным моделям является малый объем занимаемой памяти, высокое быстродействие (имитация процессов в реальном масштабе времени), заданная точность отображения параметров двигателя в статике и динамике в широком диапазоне режимов работы, условий и состояний многомерного и многосвязного объекта идентификации – газотурбинного двигателя (ГТД). Очевидно, что эти требования во многом являются противоречащими друг другу, что обуславливает необходимость оптимизации в смысле некоторых выбранных комплексных критериев качества моделируемых процессов. Как

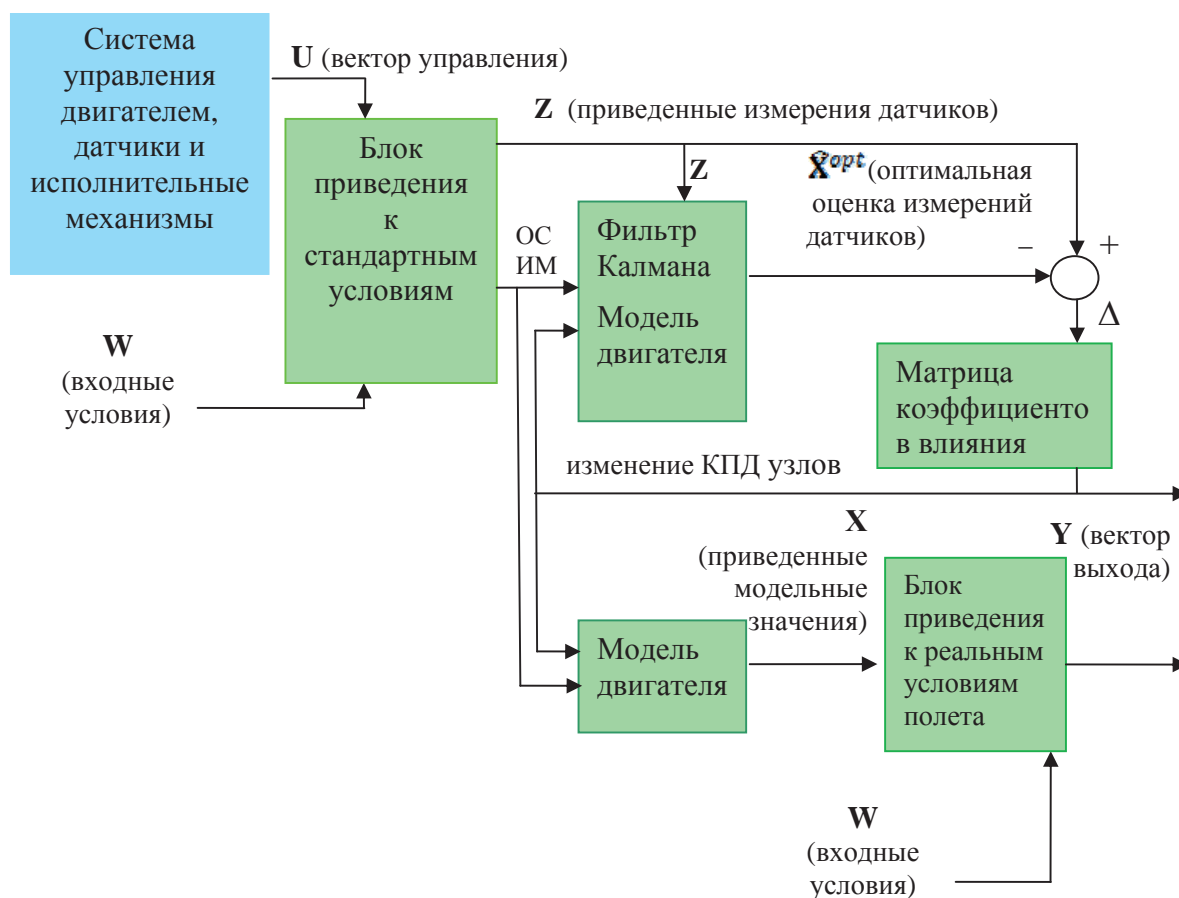


Рис. 1. Структурная схема САУ со встроенной моделью ГТД

Fig. 1. Structure diagram of automated control system (ACS) with the built-in model of gas-turbine engine (GTE)

правило, на практике компромиссное решение находят за счет понижения точности модели, так как требования к объему памяти и быстродействию являются безусловными. Такое понижение точности осуществляется в основном за счет понижения уровня модели.

В связи с этим возникает проблема выбора уровня математической модели для решения поставленной задачи. Следует отметить, что в настоящее время существует опыт практического применения как линейных (низкого уровня), так и нелинейных узловых моделей (высокого уровня) в системах моделирования, сопровождающих натурные испытания [6, 7], и алгоритмического резервирования во встроенных моделях, работающих в реальных условиях [8–10].

Тем не менее, создание алгоритмической избыточности на основе применения встроенных математических моделей сопровождается определенными технологическими и теоретическими трудностями, связанными с высокой размерностью пространства состояний двигателя, которая, как правило, существенно превосходит размерность вектора измеряемых в процессе эксплуатации параметров. В этой связи установить детерминированное однозначное соответствие между ними достаточно сложно. В результате возникают проблемы идентификации отказа датчика с последующим замещением информации модельным значением и распознавания «отказа» (изменения конфигурации) двигателя.

Обозначенная проблема является общетеоретической независимо от уровня используемой модели двигателя. На практике повышение уровня модели не приводит автоматически к повышению надежности САУ. Таким образом, при идентификации неисправного информационного канала и его замещения в системе автоматического управления с помощью встроенной модели ГТД одним из основных ее свойств необходимо признать адаптивность к упомянутым выше изменениям состояния объекта. Более того, это свойство адаптивности модели во многом является критическим для успешности решения поставленных задач.

Предлагается применение линейной адаптивной встроенной модели двигателя (LABEM – Linear Adaptive Built-in Engine Model), предназначенной для работы совместно с системой управления газотурбинным двигателем в реальной среде и удовлетворяющей предъявляемым требованиям надежности. В качестве основы статической модели двигателя используется дроссельная характеристика (1) индивидуального двигателя, полученная на сдаточных испытаниях или на «гонке» в эксплуатации после проведения обслуживания (например, замене электронно-цифрового регулятора САУ), т. е.

$$\mathbf{X}, \mathbf{Y} = f(\mathbf{U}, \mathbf{W}), \quad (1)$$

где \mathbf{W} – вектор входа; \mathbf{U} – вектор управления; \mathbf{Y} – вектор выхода; \mathbf{X} – вектор состояния.

Для элиминации множества значений векторов входа в модели используется понятие *обобщенного вектора входа* (параметры с индексом «0»), который формируется с помощью теории подобия газотурбинного двигателя процедурой, известной как «приведение к стандартным атмосферным условиям».

Динамическая линейная модель строится по методу пространства состояний [11–13]. Модель имеет следующий канонический вид системы дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами (2), задающих зависимость от обобщенного вектора входа:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_0 &= \mathbf{A}(x)\mathbf{X}_0 + \mathbf{B}(x)\mathbf{U}_0, \\ \mathbf{Y}_0 &= \tilde{\mathbf{N}}(x)\mathbf{X}_0 + \mathbf{D}(x)\mathbf{U}_0 + \mathbf{V}, \end{aligned} \quad (2)$$

где \mathbf{V} – вектор информационного шума сигнала от первичных преобразователей (датчиков).

Изменения состояния объекта (двигателя) (в том числе, в результате действия внешних и внутренних помех) могут быть в общем случае классифицированы как:

- детерминированные, априорно известные изменения под влиянием контролируемых факторов (условия эксплуатации, наработка по ресурсу и т. п.);
- стохастические изменения, обусловленные, например, различным начальным тепловым состоянием роторов и статоров (изменения радиальных зазоров и др.), неконтролируемыми отборами воздуха и мощности и др.;
- случайные изменения, вызванные неконтролируемым изменением конфигурации двигателя (например, повреждения лопаток турбокомпрессора, загрязнение проточной части двигателя, изменение характеристик вентилятора и др.).

Соответственно, необходимы три вида поправок для адаптации модели к возможному изменению состояния двигателя.

Для учета **детерминированных изменений двигателя** в LABEM предусмотрена поправка статической характеристики на ухудшение КПД узлов двигателя с наработкой по ресурсу в рабочих циклах. Соответствующее изменение параметров (в %) определяется с помощью коэффициентов влияния КПД на параметры двигателя в зависимости от режима работы с последующим линейным суммированием. Учет изменений производится в поправке на состояние двигателя с помощью диагностической матрицы.

Принципы использования диагностической матрицы применим и при учете **стохастических изменений двигателя**. При этом предполагается, что большинство состояний, отличных от базовой характеристики двигателя с учетом поправок, отображается в *неизменяемых параметрах двигателя* – отклонениях КПД турбины высокого давления (ТВД), КПД турбины низкого давления (ТНД), утечек воздуха из-за компрессора высокого давления (КВД) в наружный контур и величин отборов воздуха из-за КВД.

Диагностическую матрицу получают в результате решения системы линейных уравнений с использованием матрицы коэффициентов влияния $\frac{\delta f_{ij}}{\delta x_k}$, где функции f_{ij} – отклонения *измеряемых параметров двигателя*: частот вращения роторов компрессоров низкого и высокого давления, давления за компрессором, температуры газа за турбиной ($f_1 = \delta n_1, f_2 = \delta n_3, f_3 = \delta P_k^*, f_4 = \delta T_T^*$). Коэффициенты влияния определяются в результате численного эксперимента на поузловой нелинейной модели двигателя (высшего уровня). Индекс i соответствует номеру измеряемого параметра, k – номеру неизмеряемого параметра. Поскольку измеряемые величины имеют статистический разброс, то при вычислении упомянутых отклонений необходимо использовать их осредненные значения, либо произведя несколько измерений (номер измерения – j), либо пропустив через оптимизированный фильтр (например, скользящего среднего).

Входными параметрами системы являются приведенный расход топлива и отклонения измеренных средних значений параметров в исправных управляющем и резервном каналах от эталонных (базовых) с учетом поправок. После интерполяции коэффициентов влияния в зависимости от режима данные используются в системе нормальных линейных уравнений (3), имеющей вид:

$$\left\{ \begin{aligned} & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\frac{\delta f_{ij}}{\delta x_1} \frac{\delta f_{ij}}{\delta x_1} \right] \delta x_1 + \dots + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\frac{\delta f_{ij}}{\delta x_1} \frac{\delta f_{ij}}{\delta x_k} \right] \delta x_k = \\ & = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\frac{\delta f_{ij}}{\delta x_1} \right] \delta P_{ij}, \\ & \dots \\ & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\frac{\delta f_{ij}}{\delta x_k} \frac{\delta f_{ij}}{\delta x_1} \right] \delta x_1 + \dots + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\frac{\delta f_{ij}}{\delta x_k} \frac{\delta f_{ij}}{\delta x_k} \right] \delta x_k = \\ & = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\frac{\delta f_{ij}}{\delta x_k} \right] \delta P_{ij}, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где δx_k – искомые отклонения неизмеряемых параметров; δP_i – относительные отклонения измеряемых параметров от базовой характеристики двигателя с учетом поправок.

В связи с тем, что двигатель представляет собой стохастическую систему, описываемую пространством состояний большой размерности с предысторией, принято считать, что не представляется возможным априорно описать все его текущие состояния. Поэтому для слежения за его состоянием в текущей реализации разрабатываемой модели использована диагностическая матрица размерностью (ограниченной числом измерительных каналов) 4×4 . При этом в качестве неизмеряемых параметров выбраны КПД турбокомпрессора высокого давления, КПД турбокомпрессора низкого давле-

ния, утечки воздуха через уплотнения, отбор воздуха из компрессора высокого давления. Тогда система уравнений (3) включает 4 уравнения, является *определенной системой уравнений*, и легко разрешимой любыми известными методами решения систем линейных алгебраических уравнений.

Однако в рамках данного исследования была предпринята успешная попытка решения *неопределенной системы уравнений* вида (3), получаемой в общем случае превосходящего числа неизмеряемых параметров двигателя над измеряемыми.

Было предложено в качестве неизмеряемых параметров выбрать восемь параметров – дополнительно к перечисленным выше четырем неизмеряемым параметрам двигателя ещё четыре отклонения: КПД вентилятора, КПД турбин высокого и низкого давления и противопомпажный перепуск воздуха за компрессором низкого давления. Таким образом, была получена неопределенная система из 8 уравнений с 8 переменными. Неопределенность полученной системы уравнений обусловлена превосходством числа неизвестных (число неизмеряемых параметров двигателя – восемь) над числом известных переменных (число измеряемых – четыре) параметров двигателя, а, следовательно, сингулярностью матрицы коэффициентов при искомым переменных, т. е. равенством основного определителя системы нулю. Данная система не имеет единственного решения, т. е. является вырожденной.

Решение таких систем возможно методом простого перебора. В этом случае выбираются множества базисных (основных) переменных (искомых неизмеряемых параметров двигателя), для которых основной определитель квадратный (4×4) и не равен нулю. Все остальные переменные (свободные или неосновные) приравниваются к нулю. В результате получают множество групп по 4 переменных x_k , число которых не более числа сочетаний $C_8^4 = 70$. Часть основных определителей этих систем также равны нулю – и системы не имеют решения. В решаемой практической задаче получилось порядка 10 таких групп. Далее известными методами (например, по правилу Крамера) решается множество систем из четырех уравнений с четырьмя неизвестными.

Рассмотренный способ достаточно точен и прост, но плохо формализуем. Кроме того, велик объем довольно громоздких вычислений. Все это делает его малоэффективным для применения в реальном масштабе времени в условиях эксплуатации.

В качестве разумной альтернативы было предложено решение рассмотренной неопределенной системы уравнений численными методами Монте-Карло с использованием последовательностей случайных чисел, полученных по алгоритму И.М. Соболя (Sobol sequences, называемых также LPτ-последовательностями). Метод выбран как нашедший широкое практическое применение для минимизации полимодальных целевых функций [14, 15].

Для определения множественных неизвестных неизмеряемых параметров двигателя решалась стандартная задача многокритериальной оптимизации. В качестве двух критериев были выбраны минимум суммы модулей разностей между левыми и правыми (F) частями уравнений и минимум Евклидовой нормы (Q) вектора решения системы $X(x_i)$. Суперпозиция целевых функций выбранных критериев, взятых с различными весовыми коэффициентами, позволила получить интегральный критерий. Весовые коэффициенты в интегральной целевой функции выбирались на основе экспертных оценок.

Оптимизация велась в два этапа. Сначала определялось «грубое» решение, далее в его окрестностях – точное решение. Переменными параметрами поиска явились: задаваемый диапазон изменения (поиска) параметров, число итераций в первом и втором прогоне, весовые коэффициенты в интегральном минимизируемом критерии.

В частности при задании: диапазона изменения параметров от 0 до 100 %, числе итераций при первом и втором прогоне $N=5000$, весовых коэффициентах в первом прогоне при интегральном критерии при F и Q , равных 0,3 и 0,7 соответственно, а во втором прогоне – 0,5, доверительном интервале $\pm 0,5$, суммарная среднеквадратичная ошибка полученного решения тестовой задачи по всем восьми координатам составила $\sigma=0,31$. При изменении числа итераций при втором прогоне до $N=1000$, доверительного интервала до $[-0,4; +0,6]$ суммарная среднеквадратичная ошибка решения уменьшается до $\sigma=0,28$. При этом по одной координате в обоих случаях средняя абсолютная ошибка по модулю составляет $\Delta=0,21$, а относительная ошибка изменяется в диапазоне $\varepsilon \in [0,017; 0,231]$.

Очевидно, что возможно дальнейшее повышение точности решения путем изменения параметров поиска и оптимального выбора интегральной целевой функции (как на основе изменения весовых коэффициентов, так путем изменения самих критериев).

Следует учитывать, что после определения отклонений неизмеряемых параметров необходимо провести сравнение с ограничителями (лимитерами) на отклонения. В случае если расчетные отклонения превышают лимитеры, при вычислении поправок принимаются их лимитированные значения. В решаемой практической задаче для КПД турбокомпрессоров ограничение составляет $+5 \dots -5$ %, для отборов и утечек ограничение составляет $0 \dots +10$ %.

Для уменьшения погрешностей модели в пределах определенного диапазона **случайных изменений двигателя** предусматривается работа интегратора на установившемся режиме, «подтягивающего» модельные значения параметров, определенных выше, к средним измеренным значениям исправных управляющего и резервного каналов. Это обеспечивает устойчивую идентификацию отказавшего канала с помощью модели и в случае отка-

за каналов плавный переход на управление по модельным значениям параметров. Работа интегратора описывается формулой (4). При интегрировании производится корректировка модельного физического значения в сторону уменьшения разности с измеренным значением:

$$\dot{Y} = Y + \int (\dot{Y} - Y_{\text{эц}}) dt. \quad (4)$$

При этом выполняются логические операции ограничения, вследствие которых величина абсолютной интегральной поправки не может превосходить заранее заданную величину. Далее интегральные поправки вычисляются в относительном виде для последующей коррекции модели. Вычисленные поправки суммируются линейно с соответствующим знаком с базовой характеристикой.

Кроме того, для повышения надежности и точности модели в условиях действия случайных помех применяется *Калман-фильтрация входных и выходных параметров модели*. Необходимость в использовании дополнительных устройств идентификации, к которым следует относить фильтр Калмана, обусловлена действием внешних и внутренних помех (в том числе, отказов), как в канале встроенной модели (обусловленных ошибкой моделирования), так и в канале измерения (обусловленных погрешностью датчиков и отказами узлов двигателя) [16, 17]. Возможность применения фильтров Калмана обусловлена нормальностью распределения случайных величин и эргодичностью случайных процессов в каналах ЛАВЕМ, доказанными на основе статистической обработки данных испытаний двигателя [18–20].

Входная одномерная фильтрация ведется по ходу дозирующей иглы (ДИ). Для реализации алгоритма Калман-фильтрации в блок фильтрации входных параметров встраивается математическая модель ДИ, вырабатывающая сигнал модельного (прогнозируемого) значения хода поршня ДИ. Алгоритмы Калман-фильтрации строятся на сравнении измеренных ($z_{\text{ди}}$) и модельных ($x_{\text{ди}}$) значений хода дозирующей иглы с целью определения в текущий момент оптимального коэффициента Калмана (K) на основе решения задачи минимизации математического ожидания квадрата ошибки $\min M(e^2)$ оптимальной оценки хода дозирующей иглы ($e = x_{\text{ди}} - \hat{x}_{\text{ди}}$) [21–23]. При этом оптимальная оценка хода дозирующей иглы вычисляется с помощью рекуррентного соотношения (5):

$$\hat{x}_{\text{ди}k+1} = K_{k+1} z_{\text{ди}k+1} + (1 - K_{k+1}) (\hat{x}_{\text{ди}k} + \Delta x_{\text{ди}k}). \quad (5)$$

Полученная оптимальная оценка положения поршня ДИ поступает на вход модели регулятора перепада давления (дифференциального клапана), выходом которой является расход топлива, подаваемый на вход ЛАВЕМ.

По аналогичному принципу строится *многомерная Калман-фильтрация выходных параметров* линейной адаптивной встроенной модели двигателя. На выходе ЛАВЕМ подключается многомер-

ный фильтр Калмана, определяющий оптимальные оценки выходных параметров – частот вращения турбин низкого (n_1) и высокого (n_3) давления, температуры газа за турбиной (T_T), давления (P_K) с помощью матричного уравнения (6):

$$\hat{X}_k = (1 - K_k)X_k + K_k Z_k, \quad (6)$$

где на k -шаге: $X_k = \{n_1, n_3, T_T, P_K\}$ – вектор-столбец прогнозируемых модельных значений координат выхода LABEM; \hat{X}_k – вектор-столбец оптимальных оценок этих координат; Z_k – вектор-столбец их измеренных датчиками значений; K_k – матрица коэффициентов Калмана для выходных координат.

Точность алгоритмов одномерной и многомерной фильтрации Калмана зависит от корректности задания по всем идентифицируемым параметрам дисперсий модели и датчиков. Выбор значений дисперсий ведется на основе статистической обработки больших массивов данных стендовых и натурных испытаний двигателей.

Результаты моделирования и экспериментальных исследований

Результаты натурных испытаний LABEM в составе САУ на моторном стенде показали высокую точность вычислений. Пример осциллограммы изменения температуры за турбиной (T_T , град С) во времени, полученной в результате моделирования и измерений с помощью двухканальной системы термопар, приведен на рис. 2.

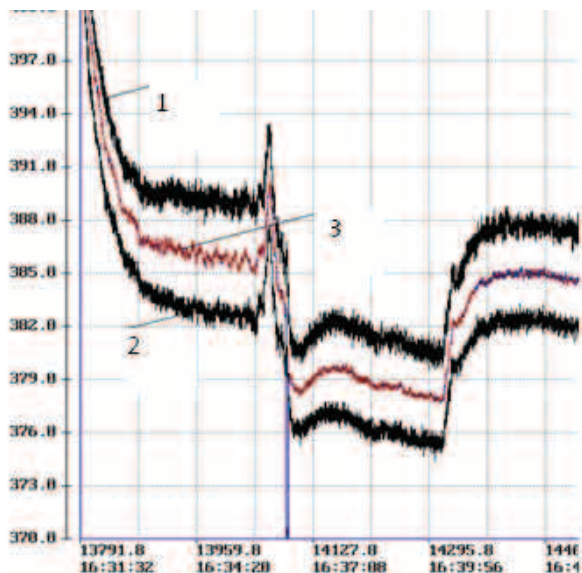


Рис. 2. Осциллограмма результатов натурных испытаний LABEM на моторном стенде (1, 2 – измерения основного и резервного каналов двухканальной системы термопар, 3 – модельное значение температуры за турбиной)

Fig. 2. Oscillogram of the results of LABEM full-scale testing on a motor bench (1, 2 are the measurements of the main and redundant channels of two-channel systems of thermocouples, 3 is the model value of the temperature behind the turbine)

Результаты стендовых безмоторных испытаний многомерного фильтра по каналам температуры газа за турбиной частоты и вращения ротора компрессора низкого давления (КНД) приведены на рис. 3, 4.

Следует отметить, что решаемая задача Калман-фильтрации есть задача идентификации, а не сглаживания. Фильтр Калмана не рассчитан на сглаживание получаемых с датчиков данных, а нацелен на определение наиболее вероятного значения измеряемого с их помощью реального параметра – его оптимальной оценки, полученной с учетом «зашумленных» модельного (прогнозируемого) значения и измерения датчика. В качестве «расплаты» за обеспечение большей достоверности и надежности модели фильтр Калмана может внести некую ошибку (шум), изменяющуюся по случайному закону, который предлагается отфильтровывать (сглаживать) на выходе Фильтра Калмана с помощью, например, алгоритмов скользящего среднего или алгоритмов Хэмминга. Кроме того, эта ошибка может быть минимизирована и путем применения алгоритмов скользящего среднего на выходе измерителей (датчиков).

Заключение

Проведенное моделирование в среде MatLab и результаты полунатурных (моторных испытаний) позволяют сделать вывод о работоспособности разработанных алгоритмов в условиях действия внешних и внутренних помех, повышении точности идентификации и качества управления.

Однако при проектировании встроенных моделей газотурбинных двигателей следует учитывать, что, поскольку объект имеет существенно нелинейные свойства, применение модели в качестве замещения объекта в информационном пространстве ограничено. В частности, модель двигателя не может быть использована по своему назначению на режимах авторотации, запуска, а также в таких ситуациях, как самопроизвольное погасание камеры сгорания, помпаж компрессора и некоторых других.

Оценка погрешности настоящей модели, полученная посредством сравнения результатов моделирования на узловую нелинейной модели, дала следующие результаты для основных режимов эксплуатации двигателя: по частоте вращения ротора низкого давления 1,5 %, по частоте вращения ротора высокого давления 0,5 %, по давлению за компрессором 4 %, по температуре газа за турбиной 2,5 %. Как и следовало ожидать, погрешность модели увеличивается с уменьшением режима из-за нелинейности характеристик, достигая двукратной величины на минимальном режиме. Учитывая, что основные режимы работы составляют 90 % времени эксплуатации, полученные величины погрешности модели являются приемлемыми.

В целом полученные результаты соответствуют современным международным требованиям к

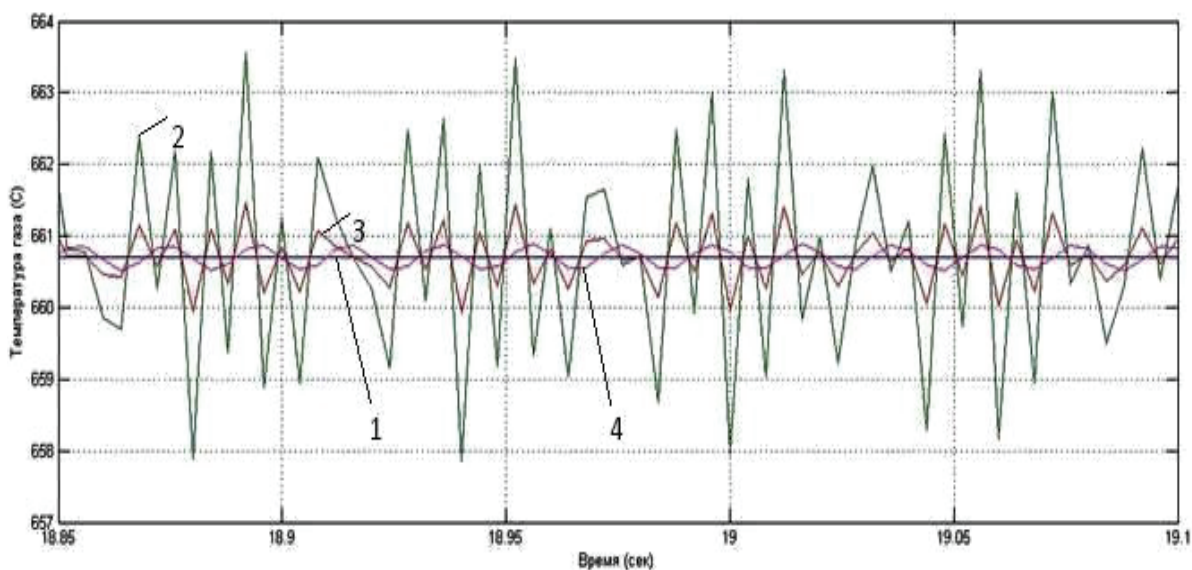


Рис. 3. Осциллограмма изменения сигнала температуры газа за турбиной на выходе многомерного фильтра Калмана (1 – модельное значение, 2 – измеренные значения, 3 – значения параметра на выходе фильтра Калмана, 4 – на выходе фильтра Калмана и Хэмминга)

Fig. 3. Oscillogram of the change in gas temperature signal behind the turbine at the output of multidimensional Kalman filter (1 is the model value, 2 are the measured values, 3 are the values of the parameter at the Kalman filter output, 4 are the values of the parameter at the Kalman and Hamming filter output)

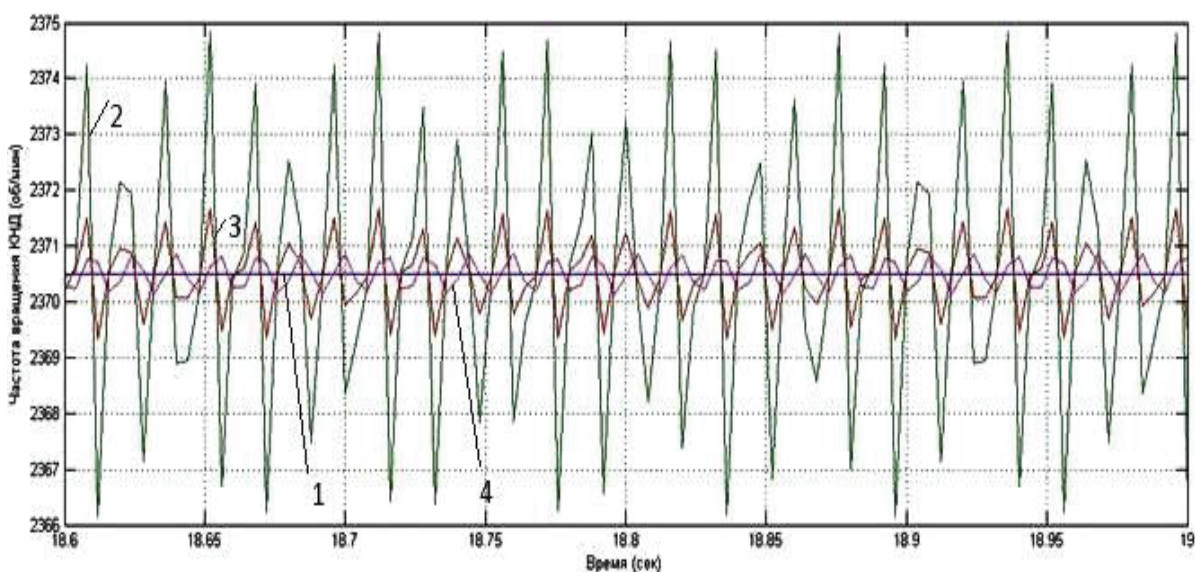


Рис. 4. Осциллограмма изменения сигнала частоты вращения КНД на выходе многомерного фильтра Калмана (1 – модельное значение, 2 – измеренные значения, 3 – значения параметра на выходе фильтра Калмана, 4 – на выходе фильтра Калмана и Хэмминга)

Fig. 4. Oscillogram of the change in the low pressure compressor (LPC) rotation frequency signal at the output of multidimensional Kalman filter (1 is the model value, 2 are the measured values, 3 are the values of the parameter at the Kalman filter output, 4 are the values of the parameter at the Kalman and Hamming filter output)

системным исследованиям структуры и функционированию сложных объектов и могут быть использованы при проектировании отказоустойчи-

вых систем автоматического управления газотурбинными двигателями для повышения его надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кириллов В.В. Полезное использование попутного нефтяного газа в Российской Федерации: текущая ситуация и перспективы // Опыт Правительства Российской Федерации и нефтяных компаний по эффективному использованию попутного нефтяного газа: Материалы Региональной конф. по странам Европы и Центральной Азии. – Сургут, 2013. URL: <http://rpn.gov.ru/node/686> (дата обращения: 20.04.2015).
- Panov V. Auto-tuning of real-time dynamic gas turbine models // Proc. ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. – Germany, Dusseldorf, 2014. URL: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1908299> (дата обращения: 15.01.2015).
- Kong Ch., Kang M., Park G. Study on Condition Monitoring of 2-Spool Turbofan Engine Using Non-Linear Gas Path Analysis Method and Genetic Algorithms // International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing. – 2013. – V. 1. – № 2. – P. 214–220.
- Assessment of Modeling Uncertainties Impact on Performance Recovery Analysis of Overhauled Civil Turbofan Engines / A. Kando, J. Kuschke, H. Schulte, S. Staudache // Challenges in Technology Innovation: Global Collaboration: Proc. 21st International Symposium on Air Breathing Engines (ISABE 2013). – Busan, Korea, 2013. – V. 1. – P. 892–904.
- Malloy D.J., Webb A.T., Kidman D. F-22/F119 Propulsion System Ground and Flight Test Analysis Using Modeling and Simulation // Power for Land, Sea, and Air: Proc. ASME Turbo-Expo 2002. – Amsterdam, Netherlands, 2002. URL: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1574588> (дата обращения: 20.01.2015).
- Интегральные системы автоматического управления силовыми установками самолетов / Ю.С. Белкин, Б.В. Боев и др. – М.: Машиностроение, 1983. – 283 с.
- Идентификация систем управления авиационных ГТД / В.Г. Августиниович, В.А. Акиндинов, Б.В. Боев и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 196 с.
- Kobayashi T., Simon D.L. Integration of on-line and off-line diagnostic algorithms for aircraft engine health management // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2007. – V. 129 (4). – P. 986–993.
- Kobayashi T., Simon D.L. Aircraft Engine On-Line Diagnostics through Dual-Channel Sensor Measurements: Development of Baseline System // Power for Land, Sea, and Air: Proc. ASME Turbo-Expo 2008. Berlin, Germany, 2008. URL: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1623492&resultClick=3> (дата обращения: 20.03.2015).
- Borguet S., Leonard O. A sensor-fault-tolerant diagnosis tool based on a quadratic programming approach // Power for Land, Sea and Air: Proc. ASME Turbo Expo 2007. – Montreal, Canada, 2007. URL: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1591276&resultClick=3> (дата обращения: 20.03.2015).
- Steady State Detection in Industrial Gas Turbines for Condition Monitoring and Diagnostics / C. Celis, E. Xavier, T. Teixeira, G. Pinto // Turbine Technical Conference and Exposition: Proc. ASME Turbo Expo 2014. – Dusseldorf, Germany, 2014. URL: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1908296&resultClick=3> (дата обращения: 15.01.2015)
- Simon D.L., Lift J.S. A data filter for identifying steady-state operating points in engine flight data for condition monitoring applications // Power for Land, Sea and Air: Proc. ASME Turbo Expo 2007. – Glasgow, UK, 2010. URL: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1608411&resultClick=3> (дата обращения: 25.01.2015).
- Кузнецова Т.А., Кулютникова Е.А., Рябуха А.А. Идентификация электрических цепей при моделировании динамических режимов методом пространства состояний // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 3. – С. 188–190.
- Соболь И.М. Численные методы Монте-Карло. – М.: Наука, 1973. – 312 с.
- Соболь И.М. Равномерно распределенные последовательности с дополнительным свойством равномерности // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1976. – Т. 16. – № 5. – С. 1332–1337.
- Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Journal of Basic Engineering. – 1960. – V. 82 (series D). – P. 35–45.
- Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана–Бьюси. Детерминированное наблюдение и стохастическая фильтрация. – М.: Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 200 с.
- Кузнецова Т.А., Августиниович В.Г., Якушев А.П. Статистический анализ процессов в системах управления авиационных двигателей с бортовыми математическими моделями // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 5. – С. 236–238.
- Лялькина Г.Б., Бердышев О.В. Математическая обработка результатов эксперимента // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – С. 180.
- Mihankhah A., Salmasi F.R., Salahshoor K. Partial and total actuator faults accommodation for input-affine nonlinear process plants // ISA Transactions. – 2013. – V. 52 (3). – P. 351–357.
- Borguet S., Dewalle P., Leonard O. On-line transient engine diagnostics in a Kalman filtering framework // Power for Land, Sea and Air: Proc. ASME Turbo Expo 2005. – Reno-Tahoe, Nevada, USA, 2005. URL: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1584182&resultClick=3> (дата обращения: 15.02.2015).
- Welch G., Bishop G. An Introduction to the Kalman Filter. URL: http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf (дата обращения: 25.01.2015).
- Кузнецова Т.А., Губарев Е.А., Лихачева Ю.В. Алгоритмы оптимальной фильтрации в задачах идентификации параметров систем автоматического управления авиационных двигателей // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2014. – Т. 12. – № 9. – С. 12–20.

Поступила 15.05.2015 г.

UDC 621.438:681.5.09

ENHANCEMENT OF GAS-TURBINE ENGINE CONTROL RELIABILITY USING ALGORITHMIC PROCEDURES

Valeriy G. Avgustinovich,

Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolskiy Avenue,
Perm, 614990, Russia. E-mail: august@avid.ru

Tatiana A. Kuznetsova,

Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolskiy Avenue,
Perm, 614990, Russia. E-mail: tatianaakuznetsova@gmail.com

The relevance of the work is caused by the need to develop the algorithmic methods of improving reliability for automatic control systems of new generation of gas-turbine engines (ACS GTE). The ACS GTE are used in different branches of industry, including gas-turbine power plants utilizing oil-associated gas on oil fields of the Russian Federation.

The main aim of the study is to evaluate the effectiveness of developing algorithmic redundancy using the built-in mathematical models to improve the ACS GTE reliability; to develop the robust adaptive linear gas-turbine engine model, operating in real time, satisfying the high accuracy requirements under deterministic, stochastic and random changes in the engine condition.

The methods used in the study. The dynamic linear model is built by the state space method; herewith the individual engine throttle characteristic is used as the basis of static model. This throttle characteristic was obtained in the acceptance tests or «race» during the operation after the maintenance. The account of the deterministic changes in the engine condition is based on the method of adjusting the static characteristics to the worsening of engine components efficiency due to expenditure of resources, which is defined by a matrix of influence coefficients. The account of the stochastic variations is based on the method of analysis of the diagnostic matrix of situations, including the use of numerical methods Mont Carlo using the random numbers sequences obtained by the I.M. Sobol algorithm (LP τ -sequences). The account of the random changes is based on the methods of one-dimensional and multi-dimensional Kalman-filtering. The methods of object-oriented programming in C++ and experimental modeling in MatLab were used for developing the algorithms.

The results. The authors have developed the algorithms of the adaptive built-in mathematical model of an gas-turbine engine which allows determining the failure of information channels, and replacing the failed channel information in case of deterministic, stochastic and random changes of the engine parameters. The carried out non-motorized and motorized bench developed algorithms' testing showed their operability and high efficiency to improve the ACS GTE reliability.

Key words:

Automatic control systems, gas-turbine engine, built-in engine model, reliability, adaptability, interference, engine changes, Kalman-filtering, LP-sequence.

REFERENCES

- Kirillov V.V. Poleznoye ispolzovaniye poputnogo neftyanogo gaza v Rossiyskoy Federatsii: tekushchaya situatsiya i perspektivy [The usage of associated petroleum gas in the Russian Federation: current situation and prospects]. *Materialy Regionalnoy konferentsii po stranam Evropy i Tsentralnoy Azii. Opyt Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii i neftnyanym kompaniy po effektivnomu ispolzovaniyu poputnogo neftyanogo gaza* [Proc. of the Reg. Europe and Central Asia Conf. The experience of the Russian Government and the oil companies on the effective use of associated petroleum gas]. Surgut, Russia, 2013. Available at: <http://rpn.gov.ru/node/686> (accessed 20 April 2015).
- Panov V. Auto-tuning of real-time dynamic gas turbine models. *Proc. of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition*. D'sseldorf, Germany, 2014. Available at: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1908299> (accessed 15 January 2015).
- Kong Ch., Kang M., Park G. Study on Condition Monitoring of 2-Spool Turbofan Engine Using Non-Linear Gas Path Analysis Method and Genetic Algorithms. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 2013, vol. 1, no. 2, pp. 214–220.
- Kando A., Kuschke J., Schulte H., Staudache S. Assessment of Modeling Uncertainties Impact on Performance Recovery Analysis of Overhauled Civil Turbofan Engines. *Proc. of 21st International Symposium on Air Breathing Engines (ISABE 2013). Challenges in Technology Innovation: Global Collaboration*. Busan, Korea, 2013, vol. 1, pp. 892–904.
- Malloy D.J., Webb A.T., Kidman D. F-22/F119 Propulsion System Ground and Flight Test Analysis Using Modeling and Simulation. *Proc. ASME Turbo-Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air*. Amsterdam, Netherlands, 2002. Available at: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1574588> (accessed 20 January 2015).
- Belkin Yu.S., Boyev B.V. *Integralnye sistemy avtomaticheskogo upravleniya silovymi ustanovkami samoletov* [The Integrated automatic control system of aircraft power plants]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1983. 283 p.
- Avgustinovich V.G., Akindinov V.A., Boyev B.V. *Identifikatsiya sistem upravleniya aviatsionnykh GTD* [The identification of aircraft gas turbine engines control systems]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1984. 196 p.
- Kobayashi T., Simon D.L. Integration of on-line and off-line diagnostic algorithms for aircraft engine health management. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2007, vol. 129 (4), pp. 986–993.
- Kobayashi T., Simon D.L. Aircraft Engine On-Line Diagnostics through Dual-Channel Sensor Measurements: Development of Baseline System. *Power for Land, Sea, and Air. Proc. ASME Turbo-Expo 2008*. Berlin, Germany, 2008. Available at: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1623492&resultClick=3> (accessed 20 March 2015).
- Borguet S., L'eonard O. A sensor-fault-tolerant diagnosis tool based on a quadratic programming approach. *Power for Land, Sea and Air. Proc. ASME Turbo Expo 2007*. Montreal, Canada, 2007. Available at: <http://proceedings.asmedigitalcollection.as>

- me.org/proceeding.aspx?articleid=1591276&resultClick=3 (accessed 20 March 2015).
11. Celis C., Xavier E., Teixeira T., Pinto G. Steady State Detection in Industrial Gas Turbines for Condition Monitoring and Diagnostics. *Turbine Technical Conference and Exposition. Proc. ASME Turbo Expo 2014*. Dusseldorf, Germany, 2014. Available at: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1908296&resultClick=3> (accessed 15 January 2015).
 12. Simon D.L., Lift J.S. A data filter for identifying steady-state operating points in engine flight data for condition monitoring applications. *Power for Land, Sea and Air. Proc. ASME Turbo Expo 2007*. Glasgow, UK, 2010. Available at: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1608411&resultClick=3> (accessed 25 January 2015).
 13. Kuznetsova T.A., Kulyutnikova E.A., Ryabukha A.A. Identifikatsiya elektricheskikh tsepey pri modelirovanii dinamicheskikh rezhimov metodom prostranstva sostoyaniy [The identification of the electrical circuit in dynamic conditions modeling by state space method]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzhya*, 2013, no. 3, pp. 188–190.
 14. Sobol I.M. *Chislennyye metody Monte Karlo* [The numerical methods of Monte Carlo]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 312 p.
 15. Sobol I.M. Ravnomerno raspredelennyye posledovatel'nosti s dopolnitelnym svoystvom ravnomernosti [The uniformly distributed sequences with an additional feature of uniformity]. *Zhurnal Vychislitel'noy Matematiki i Matematicheskoy Fiziki*, 1976, vol. 16, no. 5, pp. 1332–1337.
 16. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, 1960, vol. 82 (series D), pp. 35–45.
 17. Brammer K., Ziffing G. *Filtr Kalmana–Byusi. Determinirovannoye nablyudeniye i stokhasticheskaya filtratsiya* [Kalman–Bussi filtre. Determined observation and stochastic filtration]. Moscow, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury Publ., 1982. 200 p.
 18. Kuznetsova T.A., Avgustinovich V.G., Yakushev A.P. Statisticheskii analiz protsessov v sistemakh upravleniya aviatsionnykh dvigateley s bortovymi matematicheskimi modelyami [The statistical analysis of processes in aircraft engine control systems with on-board mathematical models]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzhya*, 2014, no. 5, pp. 236–238.
 19. Lyalkina G.B., Berdyshev O.V. Matematicheskaya obrabotka rezultatov eksperimenta [Mathematical processing of the experimental results]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2014, no. 3, pp. 180.
 20. Mihankhah A., Salmasi F.R., Salahshoor K. Partial and total actuator faults accommodation for input-affine nonlinear process plants. *ISA Transactions*, 2013, vol. 52 (3), pp. 351–357.
 21. Borguet S., Dewallef P., L'eonard O. On-line transient engine diagnostics in a Kalman filtering framework. *Power for Land, Sea and Air. Proc. ASME Turbo Expo 2005*. Reno-Tahoe, Nevada, USA, 2005. Available at: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1584182&resultClick=3> (accessed 15 February 2015).
 22. Welch G., Bishop G. An Introduction to the Kalman Filter. Available at: http://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf (accessed 25 January 2015).
 23. Kuznetsova T.A., Gubarev E.A., Likhacheva Yu.V. Algoritmy optimal'noy filtratsii v zadachakh identifikatsii parametrov sistem avtomaticheskogo upravleniya aviatsionnykh dvigateley [The optimal filtering algorithms in tasks of automatic control aircraft engine parameters identification]. *Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayushchie sistemy*, 2014, vol. 12, no. 9, pp. 12–20.

Received: 15 May 2015.

УДК 553.07

ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ РУДОВМЕЩАЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ КОМПЛЕКСНОГО ЗОЛОТОУРАНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СЕВЕРНОЕ (ЭЛЬКОНСКИЙ УРАНОВОРУДНЫЙ РАЙОН)

Зайченко Андрей Петрович,

аспирант кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.
E-mail: andrey.vl@list.ru

Домаренко Виктор Алексеевич,

канд. геол.-минерал. наук, доцент кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: viktor_domarenko@mail.ru

Перегудина Елена Владимировна,

ассистент кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.
E-mail: pere-elena@mail.ru

Актуальность работы обусловлена недостаточной изученностью внутреннего строения месторождения Северное, входящего в состав Эльконского рудного района (Республика Якутия). Расшифровка внутреннего строения рудолокализирующей структуры месторождения позволит с большей точностью выделять блоки с богатым комплексным золотоурановым оруденением и более целенаправленно формировать систему геологоразведочных работ, исключая при этом потери во время отработки месторождения. Несмотря на уникальность объектов, географо-экономические условия, труднообогатимые руды делают добычу урана рентабельной при достаточно высокой цене металла. Проведенные исследования позволят локализовать участки комплексных руд и собственно золоторудные, существенно увеличить запасы полезных компонентов, что может положительно повлиять на сложившуюся ситуацию, поскольку нынешние внутренние потребности страны не восполняются за счёт эксплуатации отечественных месторождений и компенсируются складскими запасами, а также за счёт импорта из-за рубежа. В результате исследований выявляется возможность повышения рентабельности отработки месторождения, безболезненно провести импортозамещение в урановой отрасли. Данная методика с успехом может быть использована на объектах со схожими геолого-структурными условиями локализации оруденения.

Цель работы: изучение структурных условий локализации комплексного золотоуранового оруденения на месторождении Северное (Эльконский урановорудный район) с целью выявления закономерностей формирования рудолокализирующих тектонических нарушений, изучения их поведения в пространстве и размещения в них комплексных золотоурановых руд.

Методы исследования. Изучение и обработка данных полевой геологической документации проводилось с применением данных фотодокументации керна. При построении структурных разрезов использовались программные продукты Micromine и Corel Draw.

Результаты. Было выяснено внутреннее строение рудолокализирующей зоны Северная, выделены оперяющие тектонические структуры (скола, отрыва), сформировавшие сложное блочно-мозаичное строение рудной зоны, построена структурная модель месторождения.

Ключевые слова:

Эльконский урановорудный район, месторождение Северное, трещины скола, трещины отрыва, уран, золото.

Для достижения цели по изучению внутреннего строения рудовмещающей структуры месторождения и закономерностей локализации метасоматитов и золото-урановых руд месторождения Северное необходимо решить следующие задачи:

- определить основные морфоструктурные элементы, принимающие участие в строении месторождения, их генезис;
- выявить закономерности локализации золотоуранового оруденения и условия формирования богатых руд;
- построить геолого-структурную модель размещения структурных элементов месторождения.

Краткая характеристика геологического строения Эльконского района

Ресурсы урана эльконской группы комплексных золотоурановых месторождений составляют около 319 тыс. т, или около 6 % извлекаемых мировых запасов [1].

Эльконский урановорудный район находится в центральной части Алданского щита (Центрально-Алданский район), сложен преимущественно архейскими метаморфитами гранулитовой и амфиболитовой фаций [2] и входит в состав Алдано-Тимптонского мегаблока (рис. 1) [3–5]. В процессе мезозойской тектоно-магматической активизации при движении блоков земной коры в пределах юж-

ной части щита образовалась система мелких горстов и грабенов, к одному из которых и приурочены структуры Элькона [6–9].

В геологическом строении района выделяют образования трёх структурных этажей. Образования нижнего структурного этажа слагают фундамент, они представлены ультраметаморфическими и метакристаллическими комплексами позднеархейско-раннепротерозойского возраста [10].

Второй структурный этаж слагают рифей-нижнекембрийские терригенно-карбонатные толщи федоровской серии платформенного этапа развития, несогласно залегающие на породах фундамента [11].

В ходе мезозойской тектоно-магматической активизации сформировались грабенообразные структуры, выполненные юрскими угленосными отложениями, и вулканоплутонические пояса щелочных пород и гранитоидов (рис. 1).

Особенности геологического строения месторождения Северное

Месторождение Северное является вторым по значению объектом Эльконского урановорудного района. Оно приурочено к одноименной тектонической структуре северо-западного простирания, расположенной в северной части Эльконского горста, в 2,5 км от Зоны Южной (рис. 1).

Золотоурановое оруденение месторождения контролируется долгоживущими тектоническими структурами, сформированными в кристаллическом фундаменте в раннепротерозойское время и неоднократно подновлявшимися. Отдельные швы структуры сопровождаются разновозрастными различными по условиям образования и составу гидротермально-изменёнными породами, которые слагают обширные вытянутые в СЗ направлении поля (рис. 2) [13]. Среди них выделяют хлорит-серцит-альбитовые метасоматиты, пирит-карбо-

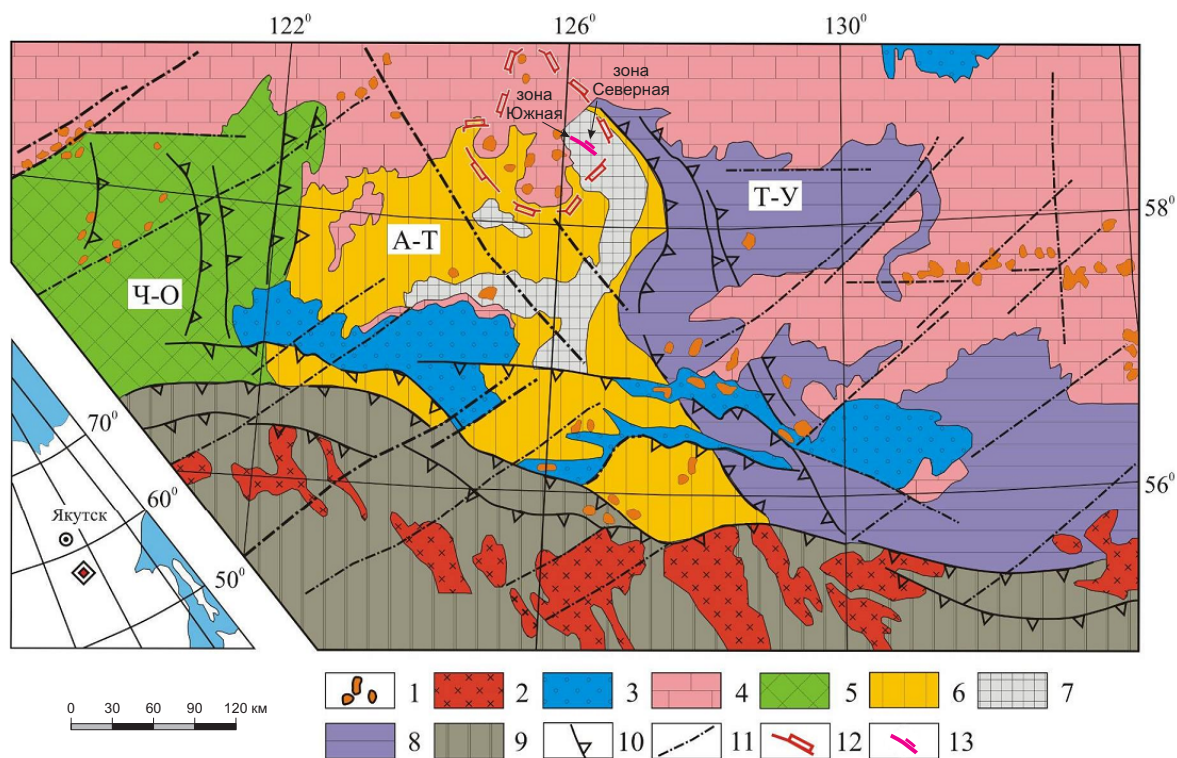


Рис. 1. Геологическая позиция Эльконского рудного района в структурах центральной части Алданского щита [12]: Мегаблоки: Ч-О – Чаро-Олекминский; А-Т – Алдано-Тимтонский; Т-У – Тимптоно-Учурский. Интрузивные комплексы этапа мезозойской ТМА: 1) щелочные граниты, граносиениты, сиениты; 2) гранитоиды нормального ряда, интрузивы; 3) юрские терригенные отложения; 4) отложения рифейско-кембрийского платформенного чехла; 5) метаморфиты олекминского комплекса (поздний архей – ранний протерозой); 6) метаморфиты иенгского комплекса (нижнеархейские образования); 7) метаосадки федоровской серии (протерозой); 8) образования тимптоно-джелтулинского комплекса (архей); 9) вулканоплутонические образования зверевского и станового комплексов (ранний протерозой); 10) главные разрывные нарушения; 11) второстепенные разрывные нарушения; 12) граница Центрально-Алданского рудного района; 13) зоны Южная и Северная

Fig. 1. Geological position of Elkon ore region in structures of central part of Aldanian shield [6]: Megablocks: Ч-О – Chara-Olekminsky; А-Т – Aldano-Timtonsky; Т-У – Tiptono-Uchursky. Igneous complexes of the era of Mesozoic tectonic magmatic activation: 1) alkaline granites, granosyenites, syenites; 2) granitoids of normal series, penetrative rocks; 3) Jurassic terrigenous deposits; 4) deposits of Rifean-Cambrian platform mantle; 5) metamorphites of olekminsky complex (Late Archean – Early Proterozoic); 6) metamorphites of iengrskogo complex (Low-Archean formations); 7) metasediments of fedorovskaya series (Proterozoic); 8) formations of timptono-dzhelutinsky complex (Archean); 9) volcanic-plutonic formations of zverevsky and stanovy complexes (Early Proterozoic); 10) main faults; 11) secondary faults; 12) boundary of Central-Aldanian ore region; 13) Yuzhnaya and Severnaya areas

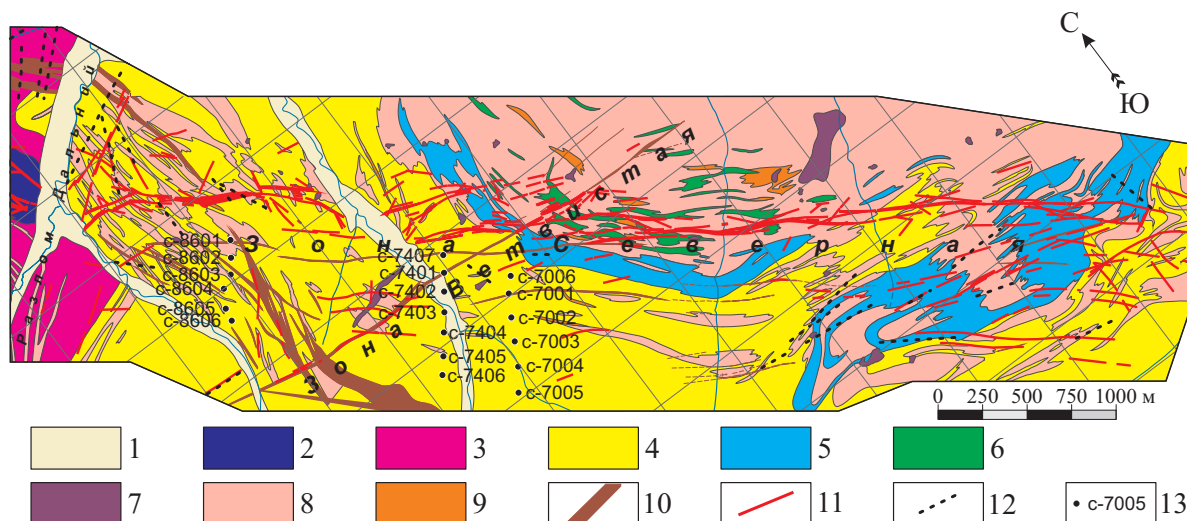


Рис. 2. Геолого-структурная схема месторождения Северное по данным ОАО «Русбурмаш» с изменениями авторов: 1) аллювиальные отложения долин рек четвертичного возраста. Метаморфиты федоровской свиты: 2) керибиканский горизонт; 3) леглиерский горизонт; 4) любкакайский горизонт; 5) медведевский горизонт; 6) Отложения верхнеалданской свиты. Интрузивные образования архейского возраста: 7) аляскитовые граниты; 8) лейкократовые граниты, биотитовые и биотит-амфиболовые граниты, диопсидовые и амфибол-диопсидовые граниты; 9) гранито-гнейсы и интенсивно гранитизированные метаморфиты; 10) метаморфизованные тела и дайки диоритового состава (ортогнейсы). Тектоно-метасоматические структуры мезозойской тектоно-магматической активизации: 11) минерализованные швы и зоны катаклаза, брекчирования, окварцевания; 12) blastomylonites, mylonites and blastocataclases; 13) разведочные скважины

Fig. 2. Geological block diagram of the deposit Severnoe by the data of «Rusburmash» with authors' changes: 1) alluvial deposits of river valley of the Quaternary age. Metamorphites of fedorovskaya suite: 2) keribikansky horizon; 3) legliersky horizon; 4) lyubkakaysky horizon; 5) medvedevsky horizon; 6) Deposits of Upper-Aldanian suite. Intrusive formations of Archean age: 7) alaskite granites; 8) lightcolored granites, biotite and biotite-amphibolic granites, diopside and amphibole-diopside granites; 9) granite gneiss and intensively и интенсивно granitized metamorphites; 10) metamorphized bodies and dykes of dioritic composition (orthogneiss). Tectonic-metasomatic structures of Mesozoic tectonic-magmatic activation: 11) mineralized sutures and zones of cataclasis, brecciation, silification; 12) blastomylonites, mylonites and blastocataclases; 13) exploratory wells

нат-калишпатовые метасоматиты (элькониты), березиты, пропициты, фениты, кварц-полевошпатовые метасоматиты.

В ходе мезозойской ТМА наряду с внедрением интрузивов щелочногранитоидного состава сформировались поля и зоны кварц-серицит-пиритовых метасоматитов («эльконитов» по Г.Н. Пилипенко [14], или «гумбеитов» по А.Ф. Коржинскому [15]). С этими метасоматитами генетически связано золотоурановое оруденение. Главными рудными минералами являются: браннерит, коффинит, золотосодержащий пирит. Вещественный состав гидротермально-изменённых пород и руд детально рассмотрен в работах В.Е. Бойцова, Г.Н. Пилипенко [16], А.В. Молчанова [3].

Детальные исследования по изучению структуры месторождения помогут выявить закономерности в его строении, что, в свою очередь, позволит спрогнозировать развитие оруденения за пределами проведенных работ. Опыт таких исследований на примере изучения месторождения Чертово Корято [17] позволяет предположить прирост запасов полезных компонентов, главным образом за счет структур отрыва, образованных под воздействием растягивающих напряжений.

Характеристика внутреннего строения рудовмещающей структуры

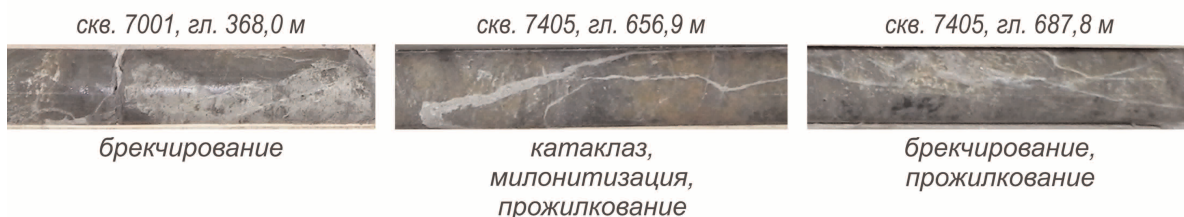
Для изучения внутренней структуры месторождения использовались главным образом данные полевой геологической документации керн, собранные по 18 скважинам, общей протяженностью 10382 м, расположенным по трем разведочным линиям (РЛ) (рис. 2). В результате их обработки формировалась база данных, в которую заносились различные структурные элементы с обязательной привязкой их по интервалу скважин, а также ориентировкой по отношению к оси керн. Выделялись следующие структурные элементы: зоны брекчирования, зоны катаклаза, зоны милонитизации, участки расланцевания и повышенной трещиноватости, участки развития прожилковой минерализации, зоны дробления. В случаях возникновения необходимости уточнения информации по интересующим нас интервалам дополнительно привлекались данные фотодокументации керн.

Систематизация в различных видах электронных таблиц и баз данных позволяет во многих случаях существенно ускорить и автоматизировать процесс обработки и визуализации, используя для этого различные программные продукты.

Структурный элемент: главное нарушение, трещины скола.
Ориентировка к оси керна: 40-55°



Структурный элемент: трещины скола.
Ориентировка к оси керна: 0-20°



Структурный элемент: трещины отрыва.
Ориентировка к оси керна: 70-90°

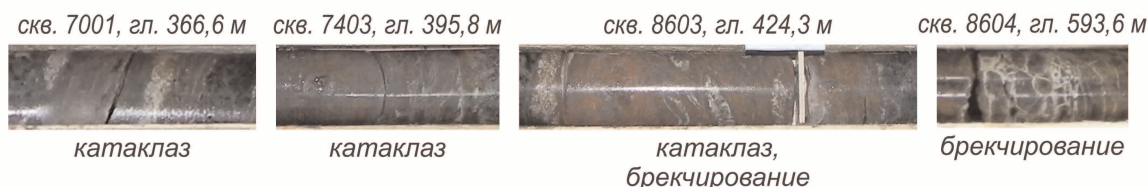


Рис. 3. Характер рудовмещающих структур в керне разведочных скважин

Fig. 3. Mode of ore-hosting structures in the core of the exploratory wells

Построение и визуализация структурной модели осуществлялись с использованием специализированного программного обеспечения Micromine и программного обеспечения для работы с графической информацией CorelDRAW.

Исходя из пространственного расположения рудной зоны (с падением на юго-запад под углом 55...60°) и заложения скважин 68...70° был сделан вывод, что структурные элементы, относящиеся к главному нарушению, ориентированы по отношению к оси керна под 45...55°. При формировании главного взброса образовались как минимум три системы оперяющих трещин: две системы трещин скола и одна система трещин отрыва. Первая система трещин скола сформировалась субпараллельно главному дизъюнктиву. Вторая система трещин сколовых дислокаций ориентирована к основной структуре под углом 50...60° (около 0° по отношению к его оси). Система трещин отрыва образует пологозалегающие структуры с углом 35...45° к основной зоне (около 90° по отношению к оси керна) (рис. 3).

Главным элементом геологического строения месторождения является протяжённая (до 8,4 км) тектоническая структура запад-северо-западного простирания, мощность которой достигает 350 м (рис. 2).

В процессе тектонических деформаций горных пород формируются трещины двух генетических типов, образующиеся при сдвиге и растяжении-сжатии. Это трещины скалывания и отрыва, являющиеся оперяющими к основному нарушению [18–20].

При полевых наблюдениях виден эффект разновремени трещин скола и отрыва со смещением вторых относительно первых, хотя трещины формируются одновременно с основной структурой, а смещение трещин отрыва связано с внутренними динамическими связями внутри породы.

Изучение характера размещения оруденения месторождения Северное показало, что рудовмещающее тектоническое нарушение имеет характер взброса с амплитудой перемещения до 10 м.

На основе изучения внутреннего строения рудовмещающей зоны нами выявлены структуры первого и второго порядков и их роль в рудолокализации [21].

На всех изученных нами разведочных линиях структура первого порядка представляет систему сближенных неоднократно подновлявшихся субпараллельных тектонических швов общей мощностью до 50...100 м.

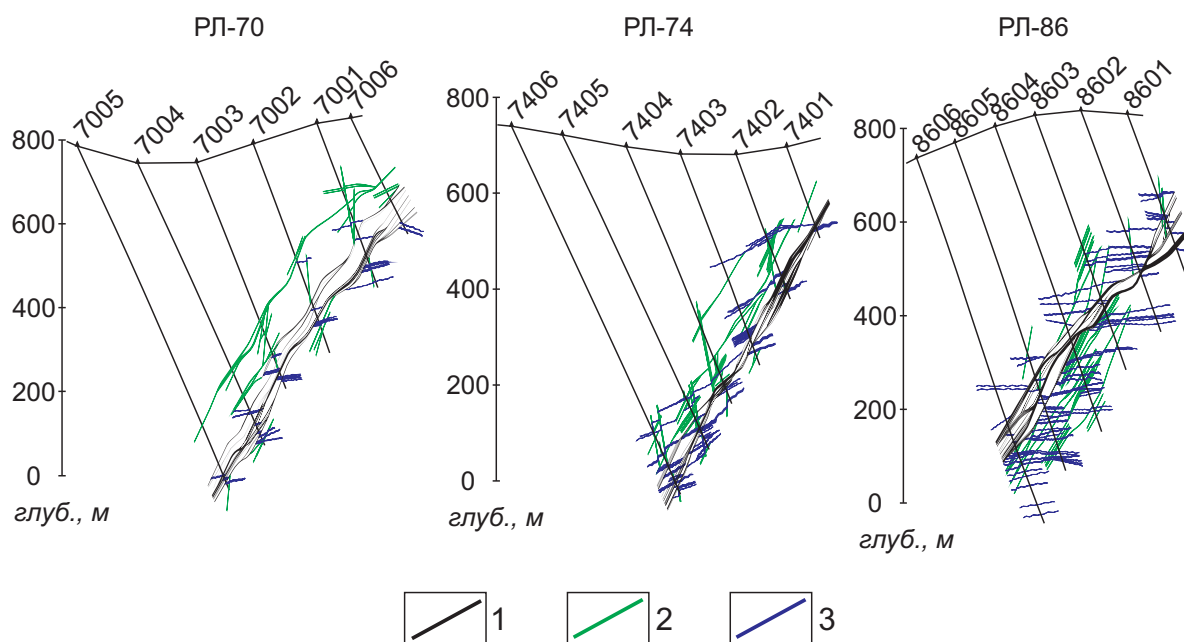


Рис. 4. Расположение рудовмещающих структур в вертикальных разрезах по РЛ-70, 74, 86: 1) основное тектоническое нарушение (структура первого порядка); 2) трещины скола (структура второго порядка); 3) трещины отрыва (структура второго порядка)

Fig. 4. Ore-hosting structures in vertical sections by RL-70, 74, 86: 1) main tectonic fault (the structure of the first order); 2) shear fracture (the structure of the second order); 3) fault structure (the structure of the second order)

Структуры второго порядка на месторождении характеризуются широким, но неравномерным развитием. Они представлены двумя генетическими типами трещин: скола и отрыва. Наибольшее распространение они получили в лежащем блоке. Это хорошо заметно по РЛ 70 и РЛ 86 (рис. 4).

На всех изученных разрезах трещины скола наблюдаются по двум резко отличающимся направлениям: первая система образует протяженные зоны расланцевания и милонитизации, субпараллельные структурам первого порядка, вторая ориентирована к основной структуре под углом 50...60°. Наиболее легко картируется первая система трещин, что связано с принятой системой разведочных работ, и большая часть трещин отрыва, субпараллельная разведочным линиям, не подсекается скважинами (рис. 4).

Наибольший интерес представляют трещины отрыва и узлы их сочленения с основным нарушением в связи с большей открытостью трещин отрыва и возможностью локализации богатого оруденения. Эти трещины получили максимальное развитие в лежащем боку основного дизъюнктива, что в большинстве случаев согласуется с теоретическими моделями трещинообразования. Трещины отрыва могут образовывать как пологозалегающие структуры, так и структуры с углом падения, достигающим 28°. Ввиду недостаточной изученности лежащего блока оценить распространение трещин по вертикали достаточно сложно, но согласно данным бурения по РЛ-86 протяженность их по падению может достигать 150 м (рис. 4).

Выводы

В результате проведенных работ по изучению особенностей внутреннего строения месторождения Северное, а также характера размещения золотоуранового оруденения авторы выделили и типизировали дизъюнктивные нарушения, относящиеся к разным порядкам и генетическим типам: основное нарушение (серия субпараллельных структур), трещины скола, трещины отрыва; установили определяющую роль трещин отрыва в структуре месторождения. Именно в них, а также в области их сочленения с основным нарушением часто встречаются повышенные значения оруденения (рис. 5).

А также были сформулированы следующие выводы:

- рудоносная зона имеет сложное мозаично-блоковое строение с закономерным сочетанием трещин скола и отрыва;
- в строении и размещении опережающих трещин намечается определенная закономерность на всем протяжении основного тектонического нарушения. Замечено более широкое размещение их в лежащем крыле;
- подтвердилось выделенное ранее предшественниками более широкое развитие золотого оруденения, по отношению к урановому, локализуемому внутри золотого оруденения (рис. 6), а также опережающее формирование золотого оруденения по отношению к урановому;
- на основании новых данных, включающих данные структурных построений, а также характер

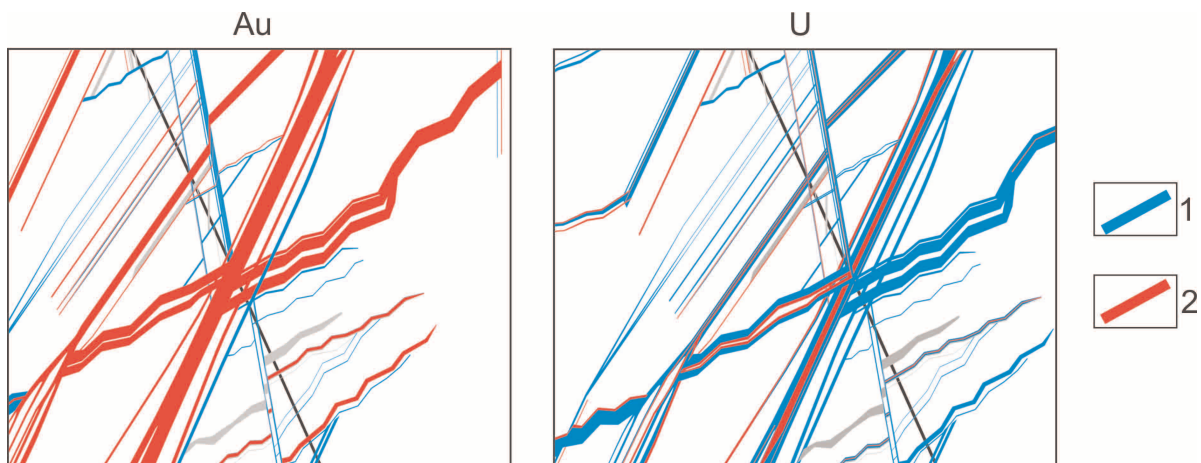


Рис. 5. Характер распространения кондиционного уранового оруденения в разрезах по РЛ-70, РЛ-86: 1) зона брекчирования, катаклаза, милонитизации; 2) кондиционные урановые руды

Fig. 5. Mode of distribution of conditioned uranium mineralization in sections by RL-70, RL-86: 1) zone of brecciation, cataclasis, mylonitization; 2) conditioned uranium ores

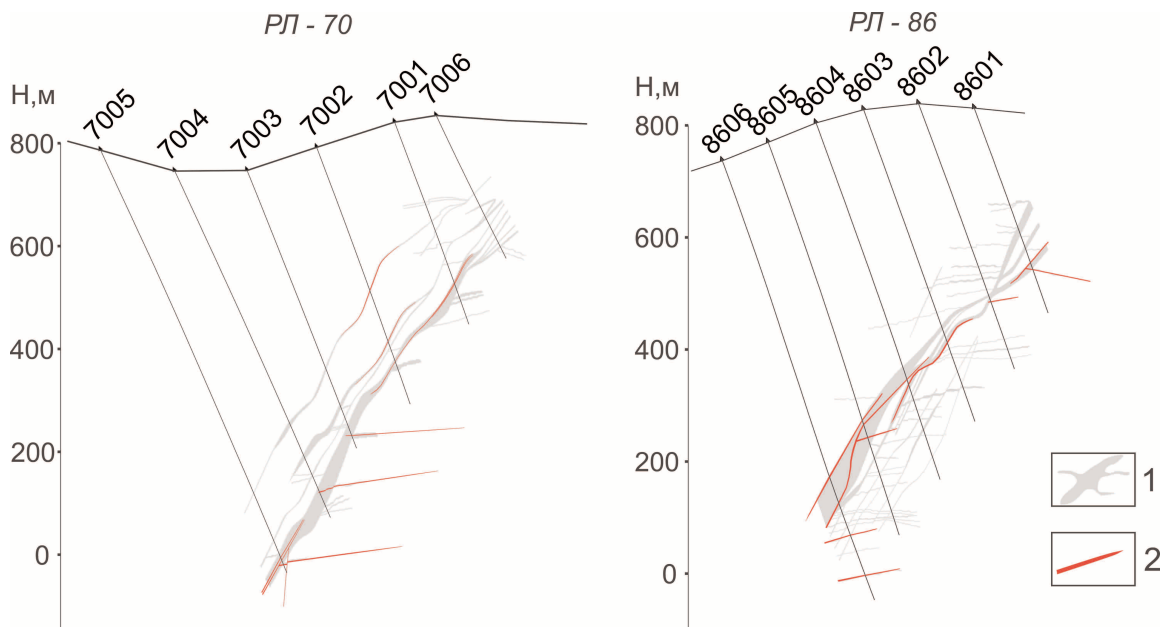


Рис. 6. Характер распространения золотого (слева) и уранового (справа) оруденения в разрезе РЛ-74: 1) безрудная зона брекчирования, катаклаза, милонитизации; 2) рудоносная зона (содержание золота от 0,5 г/т, урана – от 0,01 %)

Fig. 6. Mode of distribution of gold (left) and uranium (right) mineralization in the section RL-74: 1) barren zone of brecciation, cataclasis, mylonitization; 2) ore-bearing zone (gold content is from 0,5 g/t, uranium content is from 0,01 %)

поведения оруденения, можно предполагать прирост запасов в отношении золота и урана;

- понимание строения внутренней структуры позволяет с большей точностью выделить блоки с

богатым комплексным оруденением и более целенаправленно формировать систему геолого-разведочных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Урановый холдинг «АРМЗ». 2007–2015. URL: <http://www.armz.ru/companies/newcompany/elkon> (дата обращения: 13.01.2015).
2. The Kuranakh epithermal gold deposit (Aldan Shield, East Russia) / S.M. Rodionov, R.S. Fredericksen, N.V. Berdnikov, A.S. Yakubchu // *Ore Geology Reviews*. – 2014. – V. 59. – P. 55–65.
3. Терехов А.В. Рудоносность гидротермально-метасоматических образований Эльконского золото-урановорудного узла (Южная Якутия): дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – СПб., 2012. – 220 с.
4. Молчанов А.В. Металлогения урана Алданского и Анабарского щитов: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – СПб., 2004. – 373 с.
5. Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. Geodynamics of late Mesozoic PGE, Au, and U mineralization in the Aldan shield, North Asian Craton // *Ore Geology Reviews*. – 2015. – V. 68. – P. 30–42.
6. Объяснительная записка к государственной геологической карте Российской Федерации масштаба 1:200000. изд. второе. Серия Алданская / Д.В. Утробин, В.И. Шевченко, К.А. Воробьев, Г.А. Шумбасова. – СПб., 2002. – 301 с.
7. Кочетков А.Я. Мезозойские золотоносные рудно-магматические системы Центрального Алдана // *Геология и геофизика*. – 2006. – Т. 47. – № 7. – С. 850–864.
8. Максимов Е.П. Центрально-Алданская золото-урановорудная магматогенная система (Алдано-Становой щит, Россия) // *Тихоокеанская геология*. – 2010. – Т. 29. – № 2. – С. 3–26.
9. Казанский В.И. Уникальный Центрально-Алданский золото-урановый рудный район (Россия) // *Геология рудных месторождений*. – 2004. – Т. 46. – № 3. – С. 195–211.
10. Глебовицкий В.А. Проблема эволюции метаморфических процессов в подвижных областях. – Л.: Наука, 1973. – 127 с.
11. Астрейко А.Л. Отчет «Разработка критериев разбраковки и оценки золотоносности минерализованных зон комплексного золото-серебро-молибден-уранового оруденения Эльконского горста». – Алдан, ФУГП «Алдангеология», 2003. – 100 с.
12. Казанский В.И., Максимов Е.П. Геологическая позиция и история формирования Эльконского урановорудного района (Алданский щит, Россия) // *Геология рудных месторождений*. – 2000. – Т. 42. – № 4. – С. 212–230.
13. Каждан А.Б., Булыгин Р.М., Кашеев Л.П. О рудоконтролирующей роли глубинных меридиональных разломов в Эльконском урановорудном районе (МГРИ) // Информационный сборник: материалы по геологии урановых месторождений. – М.: ФГУП ВИМС, 1969. – Вып. 6. – С. 27–36.
14. Пилипенко Г.Н. О метасоматитах формации эльконитов, вмещающих крупнейшее золото-урановое оруденение, и об их отличии от гумбеитов // *Физико-химические факторы петро- и рудогенеза: новые рубежи: матер. конф.* – М.: ИГЕМ РАН, 2009. – С. 312–315.
15. Коржинский А.Ф. Гидротермально-измененные породы редкометалльных месторождений Восточной Сибири. – М.: Наука, 1967. – 417 с.
16. Бойцов В.Е., Пилипенко Г.Н., Дорожкина Л.А. Модель формирования комплексных золотоурановых месторождений Центрально-Алданского рудного района // *Известия вузов: Геология и разведка*. – 2006. – № 2. – С. 23–31.
17. Структурно-динамическая модель золоторудных месторождений, образованных в несланцевом и черносланцевом субстрате. Ч. 2. Месторождение Чертово Корято (Патомское нагорье) / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верховин // *Известия Томского политехнического университета*. – 2009. – Т. 314. – № 1. – С. 23–38.
18. Вольфсон Ф.И., Яковлев П.Д. Структуры рудных полей и месторождений. – М.: Недра, 1975. – 272 с.
19. Riedel W. Das Aufquellen geologischer Schnellmassen als plastischer Formänderungsvorgang // *Neues Jb. für Miner., Geol. und Paleont.* – 1929. – Bd. 62. – Abt. B. – S. 151–170.
20. Riedel W. Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen // *Zbl. Mineralogie, Geol. und Paleont.* – 1929. – Abt. B, 30. – S. 354–368.
21. Зайченко А.П., Домаренко В.А. Особенности строения рудовмещающей структуры комплексного золото-уранового месторождения Северное (Эльконский рудный район, Южная Якутия) // *Разведка и охрана недр*. – 2015. – № 7. – С. 7–11.

Поступила 02.04.2015 г.

UDC 553.07

INTERNAL ARCHITECTURE OF ORE-BEARING STRUCTURE OF COMPLEX GOLD-URANIUM DEPOSIT SEVERNOE (ELKON URANIUM ORE REGION)

Zaychenko Andrey Petrovich,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk,
634050 Russia. E-mail: andrey.vl@list.ru

Domarenko Viktor Alekseyevich,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk,
634050 Russia. E-mail: viktor_domarenko@mail.ru

Peregudina Yelena Vladimirovna,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk,
634050 Russia. E-mail: pere-elena@mail.ru

Relevance of the research is conditioned by insufficient knowledge of the internal structure of deposit Severnoe which is a part of the Elkon ore region (Republic of Yakutia). Interpretation of the internal structure of ore-localizing texture of the deposit will allow selecting more accurately blocks with rich complex gold-uranium mineralization and forming more targeted system of exploration work, avoiding losses during the development of the deposit. Despite the uniqueness of the objects, geographic and economic conditions, complex ores make uranium mining profitable at sufficiently high price for metal. The investigations will allow locating the areas of complex ores and properly gold ones, and significantly increasing the reserves of useful components that can positively influence the situation, as the current internal demands of the country are not replenished by exploiting native deposits and they are compensated by stores, as well as by importation. As a result of investigations there is a possibility to improve the profitability of deposit development and to make safely the import substitution in uranium industry. This technique can be successfully used at the objects with similar geological and structural conditions of mineralization localization.

The aim of the research is to study structural localization conditions of complex gold-uranium mineralization at the deposit Severnoe (Elkon uranium ore region) for identifying the patterns of ore localizing tectonic deformation formation and studying their behavior in space and placing complex gold-uranium ores inside.

Methods. The authors have studied and processed field geological data using the core photo-documentation. Micromine and Corel Draw software were used in structural sections construction.

Results. The authors determined the internal structure of the ore localizing zone Severnaya, selected the feathering tectonic structures (shear, fault) which formed a complex block-mosaic structure of ore zone and built the deposit structural model.

Key words:

Elkon uranium ore region, Severnoe deposit, shear fracture, fault structure, uranium, gold.

REFERENCES

1. *Uranovy holding* [Uranium holding]. Available at: <http://www.armz.ru/companies/newcompany/elkon/> (accessed 13 January 2015).
2. Rodionov S.M., Fredericksen R.S., Berdnikov N.V., Yakubchu A.S. Epitermalnoe mestorozhdenie zolota Kuranakh (Aldanskiy shchit, Vostochnaya Rossiya [The Kuranakh epithermal gold deposit (Aldan Shield, East Russia)]. *Ore Geology Reviews*, 2014, vol. 59, pp. 55–65
3. Terekhov A.V. *Rudonostnost gidrotermalno-metasomaticheskikh obrazovaniy Elkonskogo zoloto-uranovorudnogo uzla (Yuzhnaya Yakutiya)*. Dis. Kand. nauk [Ore-bearing hydrothermal-metasomatic formations of the Elkon uranium ore gold-nodule (South Yakutia). Cand. Diss.]. St. Petersburg, 2012. 220 p.
4. Molchanov A.V. *Metalogeniya urana Aldanskogo i Anabarskogo shchitov*. Dis. Kand. nauk [Uranium metallogeny of the Aldan and the Anabar shields. Cand. Diss.]. St. Petersburg, 2004. 373 p.
5. Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. Geodynamics of late Mesozoic PGE, Au, and U mineralization in the Aldan shield, North Asian Craton. *Ore Geology Reviews*, 2015, vol. 68, pp. 30–42.
6. Utrobin D.V., Shevchenko V.I., Vorobiev K.A., Shumbasova G.A. Obyasnitelnaya zapiska k gosudarstvennoy geologicheskoy karte Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1:200000 [Explanatory note to the state geological map of the Russian Federation, the scale of 1:200000]. *Aldan Series*. St. Petersburg, Aldangeology Publ., 2002. 301 p.
7. Kochetkov A.Ya. Mezozoyskie zolotonosnye rudno-magmaticheskie sistemy Tsentralnogo Aldana [Mesozoic gold-bearing ore-magmatic systems of Central Aldan]. *Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 7, pp. 850–864.
8. Maksimov E.P. Tsentralno-Aldanskiy zoloto-uranovy rudny rayon (Rossiya) [Central Aldan gold-uranium ore magmatogenic system (Aldan-Stanovoy shield, Russia)]. *Pacific Geology*, 2010, vol. 29, no. 2, pp. 3–26.
9. Kazansky V.I. Unikalny Tsentralno-Aldanskiy zoloto-uranovy rudny rayon (Rossiya) [Unique Central-Aldan gold-uranium ore region (Russia)]. *Geology of Ore Deposits*, 2004, vol. 46, no. 3, pp. 195–211.
10. Glebovitsky V.A. *Problema evolyutsii metamorficheskikh protsessov v podvizhnykh oblastiakh* [Problem of metamorphic processes evolution in moveable areas]. Leningrad, Nauka Publ., 1973. 127 p.
11. Astreyko A.L. Otchet «Razrabotka kriteriev razbrakovki i otsenki zolotonosnosti mineralizovannykh zon kompleksnogo zoloto-serebro-molibden-uranovogo orudneniya Elkonskogo gorsta» [The report «Development of criteria for grading and evaluating gold-bearing mineralized zones of complex gold-silver-molybdenum-uranium mineralization of the Elkon horst»]. Aldan, Aldan-geology Publ., 2003. 100 p.
12. Kazansky V.I., Maksimov E.P. Geologicheskaya pozitsiya i istoriya formirovaniya Elkonskogo uranovorudnogo rayona (Aldanskiy shchit, Rossiya) [Geological position and history of formation of the Elkon uranium ore region (Aldan shield, Russia)]. *Geology of Ore Deposits*, 2000, vol. 42, no. 4, pp. 212–230.

13. Kazhdan A.B., Bulygin R.M., Kashcheev L.P. O rudokontroliruyushchey roli glubinnyykh meridionalnykh razlomov v Elkonskom uranovorudnom rayone (MGRI) [About ore-controlling role of deep meridional faults in the Elkon uranium ore region (MGRI)]. *Information Collection: materials on uranium deposits geology*. Moscow, 1969. Iss. 6, pp. 27–36.
14. Pilipenko G.N. O metasomatitakh formatsii elkonitov, vmeshchayushchikh krupneyshee zoloto-uranovoe orudnenie, i ob ikh otlichii ot gumbaitov [Metasomatic formation of elkonits, hosting the largest gold and uranium mineralization, and their difference from gumbaites]. *Fiziko-khimicheskie faktory petro- i rudogeneza: novye rubezhi. Materialy konferentsii* [Proc. of the conference. Physical-chemical factors of petro and ore genesis: new frontiers]. Moscow, IGEM RAN Press, 2009. pp. 312–315.
15. Korzhinsky A.F. *Gidrotermalno-izmenennyye porody redkometalnykh mestorozhdeniy Vostochnoy Sibiri* [Hydrothermal-altered rocks of Eastern Siberia rare metal deposits]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 417 p.
16. Boitsov V.E., Pilipenko G.N., Dorozhkina L.A. Model formirovaniya kompleksnykh zolotouranovykh mestorozhdeniy Tsentralno-Aldanskogo rudnogo rayona [Model of formation of complex gold uranium deposits of Central Aldan ore region]. *Proceedings of the universities: Geology and Exploration*, 2006, no. 2, pp. 23–31.
17. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V. Strukturno-dinamichskaya model zolotorudnykh mestorozhdeniy, obrazovannykh v neslantsevom i chernoslantsevom substrate. Ch. 2. Mestorozhdenie Chertovo Koryto (Patomskoe nagorye) [Structural and dynamical model of gold deposits formed in nonshale and blackshale substratum. P. 2. Chertovo koryto Deposit (Patom Highlands)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 1, pp. 23–38.
18. Wolfson F.I., Yakovlev P.D. *Struktury rudnykh poley i mestorozhdeniy* [The structures of ore fields and deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 272 p.
19. Riedel W. Das Aufquellen geologischer Schnellmassen als plastischer Formänderungsvorgang [English]. *Neues Jb. für Miner., Geol. und Paleont*, 1929, Bd. 62, Abt. B, S. 151–170.
20. Riedel W. Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen [English]. *Zbl. Mineralogie, Geol. und Paleont*, 1929, Abt. B, 30, S. 354–368.
21. Zaychenko A.P., Domarenko V.A. Osobennosti stroeniya rudovmeshchayushchey struktury kompleksnogo zoloto-uranovogo mestorozhdeniya Severnoe (Elkonskiy rudny rayon, Yuzhnaya Yakutiya) [The structural features of the ore-hosting structure of complex gold-uranium Severnoe deposit (Elkon ore region, South Yakutia)]. *Exploration and protection of mineral resources*, 2015, no. 7, pp. 7–11.

Received: 02 April 2015.

УДК 556.314

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РАССОЛОВ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СОЛЕЙ С ОСНОВНЫМИ МИНЕРАЛАМИ СОЛЯНОЙ ТОЛЩИ

Фетисов Вячеслав Владимирович,

канд. геол.-минерал. наук, доцент каф. динамической геологии и гидрогеологии Геологического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета, Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: fetisov.v.v@gmail.com

Катаева Елизавета Петровна,

инженер лаборатории гидрогеодинамического моделирования Геологического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета, Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: kataeva.e.p@gmail.com

Фетисова Наталья Фотеевна,

PhD, мл. науч. сотр. лаборатории геоэкологии горнодобывающих регионов Горного института УрО РАН, Россия, 614002, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а. E-mail: fetisova@mi-perm.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения достоверности идентификации «аварийных» надсолевых рассолов в горных выработках Верхнекамского месторождения солей.

Цель работы: исследование степени равновесия надсолевых и рудничных рассолов месторождения с основными хлоридными (галит, сильвин, карналлит) и сульфатными минералами (гипс, ангидрит).

Методы исследования. Расчеты насыщения рассолов по отношению к минералам соляной толщи месторождения были выполнены на основе физико-химического моделирования для условий нормального атмосферного давления и температуры растворов 10 °С. При характеристике степени насыщения в работе использован индекс насыщения минералов (SI). С учетом высокой минерализации рассолов при вычислении коэффициентов активности была применена модель К.С. Питцера. В качестве основного расчетного модуля был использован код геохимического моделирования PHREEQC (разработчики Д. Паркхурст, Т. Аппело).

Результаты исследования показали, что рудничные рассолы месторождения природного (постседиментационные) и техногенного (конденсационные, закладочные) генезиса находятся в равновесном состоянии или максимально близки к равновесию с галитом (ср. знач. $SI=0,00$; ? $0,09$), сильвином (ср. знач. $SI=0,00$; ? $0,16$) с учетом данных 324 проб, отобранных в 2011–2014 гг. В зависимости от генезиса и химического состава рудничные рассолы в различной степени насыщены по отношению к карналлиту (ср. знач. $SI= ?2,00$; ? $1,08$). Рассолы равновесны с гипсом, несколько недонасыщены по отношению к ангидриту. Надсолевые рассолы высокой минерализации, распространенные в нижней части соляно-мергельной толщи и связанные с выщелачиванием покровной каменной соли месторождения, ввиду их Cl-Na состава равновесны или близки к равновесию с галитом, но недонасыщены по отношению к сильвину.

Ключевые слова:

Верхнекамское месторождение солей, соляные горные выработки, подземные рассолы, модель Питцера, индекс насыщения минералов, равновесие.

Введение

Верхнекамское месторождение солей (ВКМС) расположено на территории Пермского края, в тектоническом отношении связано с центральной частью Соликамской впадины Предуралья краевого прогиба. ВКМС представлено мощной (свыше 500 м) соляной толщей, которая подразделяется (снизу вверх) на подстилающую каменную соль (ПДКС) мощностью 320–400 м, калийную залежь (70–100 м) и покровную каменную соль (ПКС) (20 м). Соляная толща подстилается глинисто-ангидритовыми отложениями мощностью 200–220 м и перекрывается соляно-мергельной (СМТ), терригенно-карбонатной (ТКТ) и пестроцветной (ПТ) толщами уфимского яруса нижнего отдела перми (рис. 1). Комплекс соляных пород относится к иренскому горизонту кунгурского яруса

нижнего отдела пермской системы. Соляная толща месторождения имеет площадь 8100 км², площадь калийной залежи – 3750 км². В калийной залежи выделяются сильвинитовая (средняя мощность 17,5 м) и карналлитовая зоны (средняя мощность 54 м) [1, 2].

На базе месторождения ведется добыча сильвинитов (сырье для производства калийных удобрений), карналлита (получение искусственного карналлита в магниевой промышленности), каменной соли. Отработка калийных пластов осуществляется подземным способом на глубинах 100–500 м.

В горных выработках месторождения часто встречаются рассолы техногенного происхождения (конденсационные и закладочные). Соляная залежь содержит небольшое количество постседиментационных (внутрисолевых) рассолов. Отмеча-

ется, что внутрисолевые рассолы находятся в равновесии с вмещающими породами [3]. Рассолопроявления в горных выработках наблюдаются в виде увлажнения их стенок и (или) кровли, капеей (течей или струй), кратковременных выбросов из шпуров, высачивания, различных форм высаливания (соляные сталактиты, корки, щетки), скопленных на почве (лужи и рассолоборники). С целью выявления рассолопроявлений и их генетической идентификации в горных выработках действующих рудников геологической службой ОАО «Уралкалий» проводится мониторинг, включающий отбор проб рассолов.

В кровле соленосной толщи (ПКС) или вблизи нее развиты рассолы с минерализацией 290–320 г/л, насыщенные или почти насыщенные по отношению к галиту [1].

Серьезной проблемой соляных месторождений является возможность проникновения надсолевых подземных вод в выработанное пространство рудников. Что может быть связано с образованием водопроводящих трещин водозащитной толщи (ВЗТ) при деформации массивов горных пород в результате отработки калийной залежи. В результате прорыва надсолевых вод в мире было затоплено без возможности восстановления около 80 калийных и соляных рудников [4, 5]. Первыми в горные выработки поступают надсолевые рассолы высокой минерализации нижней части СМТ, связанные с выщелачиванием ПКС. Оперативное выявление таких рассолов среди рудничных рассолопроявлений обусловлено безопасностью проведения горных работ.

Объекты и методы

Источниками исходных данных послужили протоколы результатов измерений Управления исследований и контроля качества продукции ОАО «Уралкалий» за 2011–2014 гг. Изученная в работе выборка включала 316 анализов рудничных рассолов различного генезиса (постседиментационные, конденсационные, закладочные), а также анализы надсолевых рассолов и подземных вод, отобранные геологической службой предприятия в скважинах режимной сети.

Постседиментационные (внутрисолевые) рассолы наблюдаются при проходке горных выработок в соляной толще в виде выделений различной интенсивности и продолжительности. Истечение рассолов происходит как из отдельных замкнутых полостей в виде жидкостных выбросов с газом, так и в виде капельного выделения и мало заметных увлажнений соляных стенок выработок [3]. Последнее наблюдается значительно чаще. Отмечается, что рассолы данного генезиса заполняют весьма ограниченное межкристалльное пространство в солях (чаще всего в галите и сильвините), встречаются в прослоях и линзах карбонатных пород и галопелитов среди соляных пластов [6].

Конденсационные рассолы образуются в результате взаимодействия влаги, выделяющейся из воздуха и соляных пород. В горных выработках месторождения данная разновидность рассолов распространена повсеместно в виде луж, небольших озерков в понижениях и капежа с кровли. Состав конденсационных рассолов, формирующихся за счет выщелачивания соляных пород, зависит от состава солей, вскрытых горными выработками, и времени существования рассолов.

Закладочные рассолы представлены жидкой фазой, поступающей в рудники вместе с применяемыми для закладки выработанного пространства отходами переработки солей и отжимающейся в процессе уплотнения закладочного материала в горные выработки. На калийных рудниках месторождения для закладки используются отходы обогащения сильвинитовой и карналлитовой руды. Закладочные работы производятся для обеспечения ненарушенности водозащитной толщи месторождения, уменьшения оседания земной поверхности, размещения отходов производства в выработанном пространстве и уменьшения их негативного влияния на экологическую обстановку в районе [3].

В отдельную подгруппу были выделены 8 проб закладочных рассолов, смешанных с рассолами надсолевой толщи в результате аварийной ситуации на СКРУ-2 (отобраны в ноябре 2014 г.).

Исходные данные химических анализов рассолов включали содержание основных ионов состава, Br^- , величины pH, а также плотности, определенной при температуре 20 °С. Состав отдельных типовых проб рудничных рассолов представлен в таблице.

В природных условиях система «вода – горная порода» является равновесно-неравновесной. Водный раствор всегда неравновесен с отдельными минералами, но одновременно равновесен с определенной гаммой вторичных, формируемых в этой системе минеральных фаз, что определяет способность воды непрерывно растворять одни минералы и формировать другие [7].

Одним из важных параметров равновесно-неравновесной системы «вода – горная порода» является индекс насыщения минералов (SI) [8], который определяется следующим образом

$$SI = \log \frac{K_{iap}}{K_{sp}},$$

где K_{iap} – ионная активность продукта, определяемая с учетом концентрации иона в молях и коэффициента активности; K_{sp} – константа растворимости продукта.

В том случае, если SI равен или близок к нулю, раствор находится в равновесии с данным минералом. Если значение $SI < 0$, раствор недонасыщен к минералу (происходит его растворение). И соответственно, если значение $SI > 0$, раствор пересыщен к минералу, который способен формироваться в этих условиях.

Таблица. Химический состав рудничных рассолов ВКМС различного генезиса

Таблица. Химический состав рудничных рассолов ВКМС различного генезиса

№ пробы Sample	Плотность ρ , г/см ³ Density ρ , g/cm ³	pH	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Br ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Сумма солей Salt amount	Хим. тип (>20 % экв.) Chemical type (>20 % equ.)
			г/л (g/l)									
Постседиментационные (внутрисолевые) рассолы/Post-sedimentation (intrasalt) solutions												
180	1,251	5,00	0,09	0,26	234,00	8,14	16,87	47,90	27,50	26,20	360,96	Cl-Mg
214	1,273	5,20	0,28	0,13	249,00	11,32	32,51	47,10	18,80	27,40	386,54	Cl-Mg-Ca
Конденсационные рассолы/Condensate brines												
231	1,234	4,50	0,01	1,39	217,00	3,01	4,22	6,73	91,00	57,10	380,46	Cl-Na-K
253/7776	1,250	5,70	0,20	0,19	223,00	4,60	27,50	29,20	43,90	35,60	364,19	Cl-Mg-Na-Ca
252/3776	1,234	4,60	0,02	2,53	231,00	1,62	1,94	54,90	34,24	30,80	357,05	Cl-Mg-Na
Закладочные рассолы/Stowage brines												
009П.Р/535Б	1,231	6,33	0,05	3,10	209,82	1,11	1,85	3,17	98,02	54,01	371,13	Cl-Na-K
5503/634В	1,227	6,24	0,05	2,90	220,00	1,60	3,00	28,00	62,00	44,00	361,55	Cl-Na-Mg
5484/950Б	1,250	5,45	0,05	2,00	243,00	1,80	1,50	66,00	19,00	24,00	357,35	Cl-Mg
Закладочные рассолы, смешанные с надсолевыми/Stowage brines mixed with post-salt ones												
1557/311Г	1,212	6,65	0,16	4,00	192,78	0,25	1,73	3,09	106,15	22,26	330,42	Cl-Na

С учетом высокой минерализации рассолов вычисление коэффициентов активности в работе было выполнено на основе модели К.С. Питцера [9, 10], хорошая сходимость которой с экспериментальными данными отмечается в работах, посвященных исследованиям системы «рассолы – горные породы» [11–15]. В качестве основного расчетного модуля для определения равновесия рассолов различного генезиса с главными хлоридными и сульфатными минералами был использован код PHREEQC (разработчики Д. Паркхурст, Т. Апелло) [16]. Физико-химическое моделирование выполнялось для условий нормального атмосферного давления, при температуре растворов 10 °С.

Результаты исследования и обсуждение

При гидрохимической характеристике изученных проб рассолов была выполнена их систематизация по преобладающим ионам (таблица). В формулу состава были включены ионы с содержанием более 20 % -экв.

Постседиментационные рассолы ВКМС характеризуются Cl-Mg, Cl-Mg-Ca составом. Рассолы Cl-Mg состава являются характерными для внутри- и межсолевых в Соликамской, Бузулукской и Прикаспийской впадинах [6, 17]. При метаморфизации рассолов в глинистых и карбонатных осадках, залегающих среди солей, в результате аб- и адсорбционных процессов происходит обогащение кальцием [6]. Конденсационные и закладочные рассолы имеют более пестрый катионный состав, который зависит от состава солей, вскрытых горными выработками, состава пульпы, времени существования рассолов и др. Среди рассолов *конденсационного генезиса* преобладают растворы Cl-Na-K, Cl-Mg-Na-Ca, Cl-Mg-Na состава. Среди *закладочных* выделяются три группы по преобладающему ионному составу: Cl-Na-K, Cl-Na-Mg и Cl-Mg (очередность катионов в формулах от большего к меньшему). Рассолы, просачивающиеся из закладываемых камер месторож-

дения, пройденных в сильвините, содержат значительное количество хлористого калия и хлористого натрия, а из выработок, заложенных в карналлитовой породе, поступает рассол, насыщенный в основном хлористым магнием [18].

Изученные пробы закладочных рассолов, смешанных с высокоминерализованными надсолевыми, имеют Cl-Na состав, который соответствует преобладающему составу подземных вод нижней части СМТ.

Следует отметить, что в горных выработках рассолы Cl-Na состава фактически не встречаются. На рассолы такого состава приходится около 2 % изученной выборки; локализованы они с ПдКС (рис. 1) и формируются при ее выщелачивании.

Основными минералами соляных пород ВКМС являются хлоридные (галит, сильвин и карналлит); значительная часть нерастворимого остатка соляных пород представлена сульфатными минералами (ангидрит, гипс) [19, 20]. Диаграмма размаха значений индекса насыщения рудничных рассолов относительно перечисленных минералов представлена на рис. 2. Пунктирная линия соответствует равновесному состоянию системы ($SI=0$). Как видно на графике (рис. 2), изученные пробы рудничных рассолов находятся в равновесии или состоянии, максимально близком к равновесию, с галитом и сильвином. В равновесном состоянии или близком к нему рудничные рассолы различного генезиса находятся также и с гипсом, в меньшей степени с ангидритом.

В большей своей части рассолы не достигают насыщения по отношению к карналлиту. Близки к равновесию с карналлитом постседиментационные, а также закладочные рассолы, имеющие Cl-Mg состав (рис. 3). Концентрация магния в последних изменяется от 44 до 84 г/л. В то же время с ростом концентрации калия в рудничных рассолах падает их степень насыщения к карналлиту (рис. 4).

Индекс	Толща	Пачка, зона	Литология	Общая / средняя мощность, м
KZ				0-50
P_1^{ss}	ПЦТ			0-350
$P_1^{sl_2}$	ТКТ			90-130
$P_1^{sl_1}$	СМТ			80
		ПП		20
P_1^{br}	Соляная	ПКС		20
		КЗ		54
		СЗ		17,5
		ПдКС		20
				330
P_1^{kr}	ГАТ			230
				100

	1		2		3		4
	5		6		7		8
	9		10				

Рис. 1. Стратиграфический разрез надсолевой толщи и галогенной формации ВКМС по [1] с добавлениями: 1 – глина, 2 – мергель, 3 – каменная соль, 4 – карналлит, 5 – сильвинит, 6 – аргиллит, 7 – доломит, 8 – известняк, 9 – песчаник, 10 – ангидрит. ПЦТ – пестроцветная толща, ТКТ – терригенно-карбонатная толща, СМТ – соляно-мергельная толща, ПП – переходная пачка СМТ, ПКС – покровная каменная соль, КЗ – карналлитовая зона, СЗ – сильвинитовая зона, ПдКС – подстилающая каменная соль, ГАТ – глинисто-ангидритовая толща

Fig. 1. Stratigraphic column of post-salt strata and salt formation in Verkhnekamskoe salt deposit by [1] with: 1 – clay, 2 – marl, 3 – mineral salt, 4 – carnallite, 5 – sylvinite, 6 – mudstone, 7 – dolomite, 8 – limestone, 9 – sandstone, 10 – anhydrite. ПЦТ – speckled strata, ТКТ – terrigenous-carbonate strata, СМТ – salt-mar strata, ПП – intermediate bench of salt-mar strata, ПКС – blanket mineral salt, КЗ – carnallite zone, СЗ – sylvinite zone, ПдКС – underlying mineral salt, ГАТ – clay-anhydrite strata



Рис. 2. Диаграмма размаха индекса насыщения минералов (SI) в рудничных рассолах ВКМС

Fig. 2. Box plot of mineral saturation index (SI) in mining brines of Verkhnekamskoe salt deposit

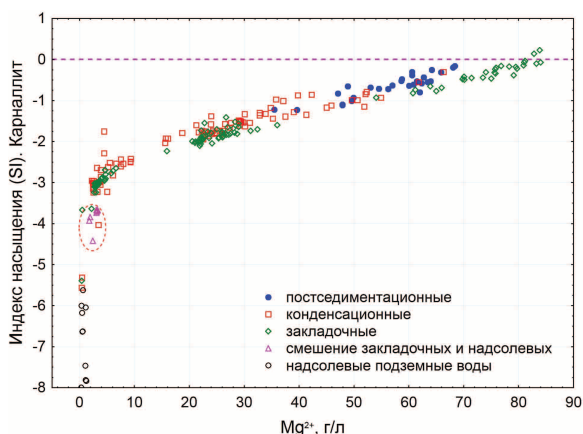


Рис. 3. График зависимости индекса насыщения (SI) по карналлиту от содержания магния

Fig. 3. Diagram of carnallite saturation index (SI) dependence on magnesium content

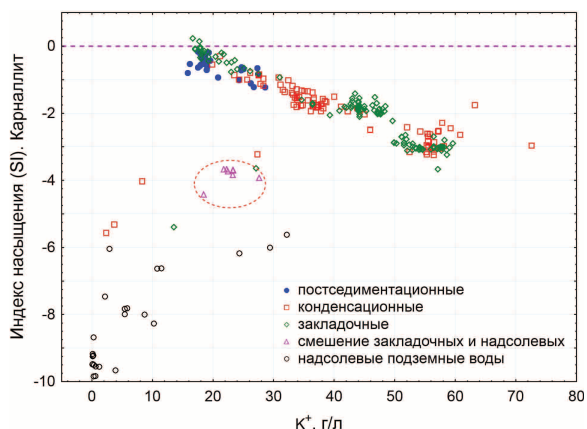


Рис. 4. График зависимости индекса насыщения (SI) по карналлиту от содержания калия

Fig. 4. Diagram of carnallite saturation index (SI) dependence on potassium content

Насыщение к хлоридным минералам растет с увеличением минерализации водного раствора функционально в соответствии с логарифмическим законом, что отмечается исследователями [13]. Аналогичным образом изменяется степень насыщения хлоридных минералов в зависимости от плотности водного раствора (рис. 5–7).

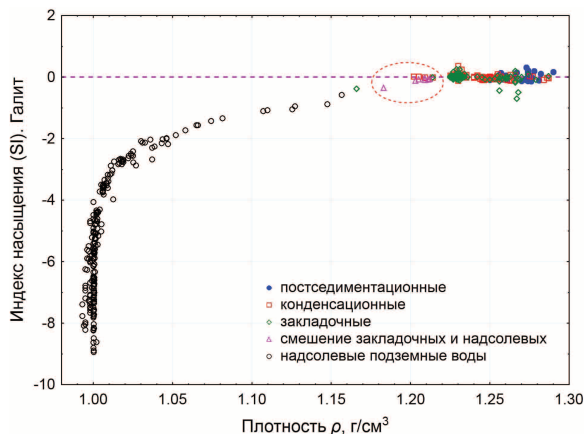


Рис. 5. График зависимости индекса насыщения (SI) по галиту от плотности раствора

Fig. 5. Diagram of salt rock saturation index (SI) dependence on solution density

Закладочные рассолы, смешанные с подземными водами надсолевой толщи (на рис. 3–7 выделены овалом), занимают промежуточное положение между «чистыми» рудничными рассолами и подземными водами надсолевой толщи. Они равновесны с галитом, недонасыщены к сильвину и в меньшей степени насыщены к карналлиту по сравнению с рудничными рассолами.

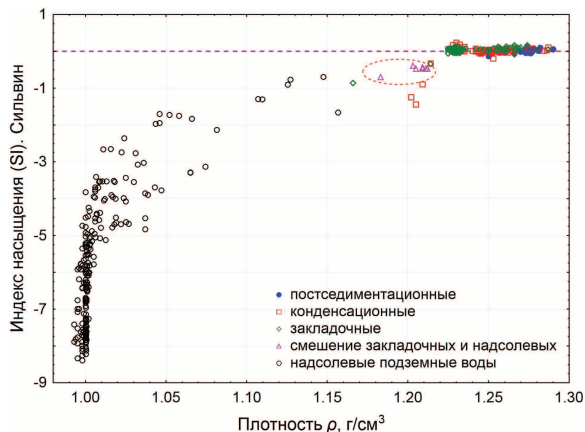


Рис. 6. График зависимости индекса насыщения (SI) по сильвину от плотности раствора

Fig. 6. Diagram of sylvine saturation index (SI) dependence on solution density

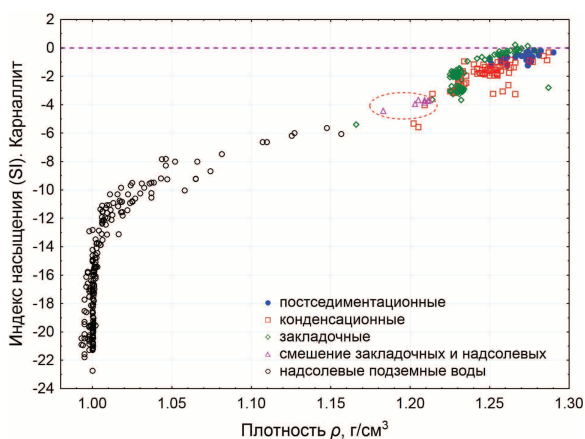


Рис. 7. График зависимости индекса насыщения (SI) по карналлиту от плотности раствора

Fig. 7. Diagram of carnallite saturation index (SI) dependence on solution density

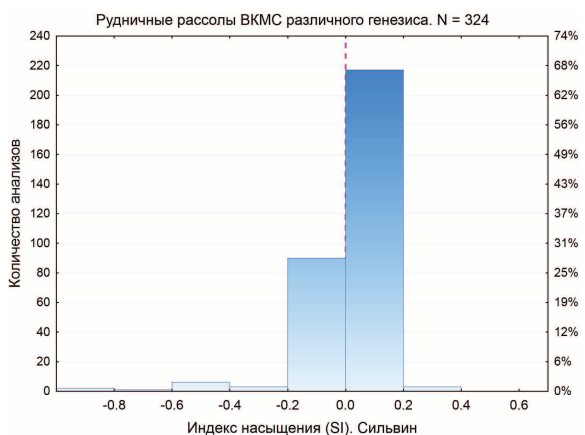


Рис. 8. Гистограмма распределения индекса насыщения рудничных рассолов (SI), отобранных в 2011–2014 гг., по отношению к сильвину

Fig. 8. Histogram of distribution of saturation index (SI) of mining brines, obtained in 2011–2014, relative to sylvine

Последние выводы позволяют рекомендовать применение индекса насыщения рассолов по отношению к хлоридным минералам (в частности, к сильвину) в качестве одного из критериев выявления в горных выработках ВКМС «аварийных» рассолов, связанных с надсолевой толщей. Как отмечено выше, рудничные рассолы различного генезиса равновесны или максимально близки к насыщению с сильвином. На гистограмме (рис. 8) видно, что индекс насыщения рудничных рассолов к сильвину находится в пределах «–0,2» до «0,2», с преобладанием (94 % проб) значений от «–0,11» до «0,18» (по данным 324 анализов). Только незначительная часть проб характеризуется меньшими значениями этого параметра (это рассолы конденсационного генезиса Cl-Na состава, связанные с ПдКС). Для рассмотренных в работе проб закладочных рассолов, смешанных с надсолевыми, характерно снижение степени насыщения по сильвину до значений от «–0,39» до «–0,7».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей. – Пермь, ГИ УрО РАН, 2001. – 429 с.
2. Разрывная тектоника Верхнекамского месторождения солей / А.И. Кудряшов, В.Е. Васюков, Г.С. Фон-дер-Флаас и др. / под науч. ред. А.И. Кудряшова. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2004. – 194 с.
3. Бельтюков Г.В. Карстовые и гипергенные процессы в эвапоритах: автореф. дис.... д-ра геол.-минерал. наук. – Пермь, 2000. – 42 с.
4. Лаптев Б.В. Историография аварий при разработке соляных месторождений // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – № 12. – С. 41–46.
5. Лаптев Б.В. Аварийные ситуации на Верхнекамском месторождении калийно-магниевого солей // Безопасность труда в промышленности. – 2009. – № 8. – С. 28–31.
6. Попов В.Г., Абдрахманов Р.Ф. Ионообменная концепция в генетической гидрогеохимии / под ред. д-ра геол.-минерал. наук, проф. В.Г. Попова. – Уфа: Гилем, Башкирская энциклопедия, 2013. – 356 с.
7. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. 2-е изд., исправл. и доп. – М.: Недра, 1998. – 366 с.
8. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода: Т. 1: Система вода–порода в земной коре: взаимодействие, равновесие, моделирование / В.А. Алексеев, Б.Н. Рыженко, С.Л. Шварцев и др. – Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2005. – 244 с.
9. Crowe A.S., Longstaffe F.J. Extension of geochemical modelling techniques to brines: coupling the Pitzer equations with models // Proc. of Solving Groundwater Problems with Models. Nat. Water Well Assoc. Conf. – Denver, CO. – Dublin, Ohio, 1987. – P. 110–129.
10. Mironenko M.V., Polyakov V.B. On algorithm for the calculation of the equilibrium composition of water–salt systems on the basis of the Pitzer model // Geochemistry International. – 2009. – V. 47. – № 10. – P. 1036–1040.
11. Букаты М.Б., Шварцев С.Л. Равновесие высокоминерализованных подземных рассолов с эвапоритовыми минералами (на примере юго-запада Сибирской платформы) // Советская геология. – 1983. – № 8. – С. 114–123.
12. Букаты М.Б. Равновесие подземных рассолов Тунгусского бассейна с минералами эвапоритовых и терригенных фаций // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40. – № 5. – С. 750–763.
13. Букаты М.Б. Геология и геохимия подземных рассолов западной части Сибирской платформы: автореф. дис.... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 1999. – 42 с.
14. Шварцев С.Л. Химический состав и изотопы стронция рассолов Тунгусского бассейна в связи с проблемой их формирования // Геохимия. – 2000. – № 11. – С. 1170–1184.
15. Сидкина Е.С., Новиков Д.А., Шварцев С.Л. Равновесие подземных рассолов западной части Тунгусского артезианского бассейна с минералами вмещающих пород // Вестн. Том. гос. ун-та. – 2012. – № 364. – С. 187–192.
16. Parkhurst D.L., Appelo C.A.J. User's guide to PHREEQC (Version 2): a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. US Geological Survey. – Denver, Colorado, 1999. – 312 p.
17. Мязина Н.Г. Внутри- и межсолевые рассолы кунгурских отложений Прикаспийской синеклизы // Геология, география и глобальная энергия. – 2014. – № 2 (53). – С. 57–65.
18. Максимович Г.А., Бельтюков Г.В. Соляные натечные образования горных выработок // Пещеры. – 1966. – Вып. 6 (7). – С. 3–18.
19. Сметанников А.Ф. Минералогия солей и благородных металлов Верхнекамского месторождения: автореф. дис.... д-ра геол.-минерал. наук. – Сыктывкар, 2012. – 40 с.
20. Генезис и структура Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей, как основа его эффективного и комплексного освоения / И.И. Чайковский и др. // Проблемы минералогии России. – М.: ГЦ РАН, 2012. – С. 157–171.

Поступила 26.08.2015 г.

UDC 556.314

INTERACTION OF NATURAL AND TECHNOGENEOUS BRINES OF VERKHNEKAMSKOE SALT DEPOSIT WITH BASIC MINERALS OF SALT STRATA

Vyacheslav V. Fetisov,

Perm State University, 15, Bukirev street, Perm, 614990, Russia.

E-mail: fetisov.v.v@gmail.com

Elisaveta P. Kataeva,

Perm State University, 15, Bukirev street, Perm, 614990, Russia.

E-mail: kataeva.e.p@gmail.com

Natalya F. Fetisova,

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
78a, Sibirskaya street, Perm, 614002, Russia. E-mail: fetisova@mi-perm.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the need to increase the reliability of identification of «accidental» suprasalt brines in mines of the Verkhnekamskoe salt deposit.

The main aim of the study is to investigate the equilibrium of suprasalt and mine brines of the Verkhnekamskoe salt deposit with basic chloride (halite, sylvine, carnallite) and sulfate minerals (gypsum, anhydrite).

The methods used in the study. The saturation of brines relative to minerals of the salt strata were calculated based on physico-chemical modeling for normal atmospheric pressure and at solution temperature of 10 °C. The saturation index (SI) was used for characterizing the degree of saturation with respect to minerals. Taking into account the high salinity of brines the model of K.S. Pitzer was applied when calculating the activity coefficients. Geochemical modeling code PHREEQC (prepared by David Parkhurst and Tony Appelo) was used as the main calculation module.

The results of the study have shown that the mine brines of the deposit of both natural (postsedimentation) and technogeneus (condensation, hydraulic stowing) genesis is in equilibrium or as close to equilibrium as possible with halite (mean SI=0,00; Std. Dev 0,09) and sylvine (mean SI=0,00; Std. Dev. 0,16) based on data of 324 samples obtained in 2011–2014. Depending on genesis and chemical composition the brines are saturated in varying degree with carnallite (mean SI= -2,00; Std. Dev.1,08). The brines are in equilibrium with gypsum and slightly undersaturated with anhydrite. Suprasalt high salinity brines distributed in the bottom of the salt-marl strata and related to leaching of overlying rock salt, due to their Cl-Na composition, are in equilibrium or near to equilibrium with halite but undersaturated with respect to sylvine.

Key words:

Verkhnekamskoe salt deposit, salt mines, underground brines, Pitzer ion interaction approach, mineral saturation index, equilibrium.

REFERENCES

1. Kudryashov A.I. *Verkhnekamskoe mestorozhdenie soley* [Verkhnekamskoe salt deposit]. Perm, GI UrO RAN Publ., 2001. 429 p.
2. Kudryashov A.I., Vasyukov V.E., Fon der Flaass G.S. *Razryvnaya tektonika Verkhnekamskogo mestorozhdeniya soley* [Faults on the Verkhnekamskoe salt deposit]. Perm, GI UrO RAN Publ., 2004. 194 p.
3. Beltyukov G.V. *Karstovye i gipergennye protsessy v evaporitakh*. Dis. Dokt. nauk [Karst and hypergenic processes in evaporites. Dr. Diss.]. Perm, 2000. 42 p.
4. Laptev B.V. *Istoriografiya avariyy pri razrabotke solyanykh mestorozhdeniy* [Historiography of accidents when developing salt deposits]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2011, no. 12, pp. 41–46.
5. Laptev B.V. *Avariynye situatsii na Verkhnekamskom mestorozhdenii kaliyno magnievykh soley* [Emergency situations on Verkhnekamskoe potassium and magnesium salts deposit]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2009, no. 8, pp. 28–31.
6. Popov V.G., Abdrakhmanov R.F. *Ionoobmennaya kontseptsiya v geneticheskoy gidrogeokhimi* [Ion Exchange Concept in Genetic Aqueous Geochemistry]. Ufa, Gilem Bashkirskaya entsiklopediya Publ., 2013. 356 p.
7. Shvartsev S.L. *Gidrogeokhimiya zony gipergeneza* [Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone]. Moscow, Nedra Publ., 1998. 366 p.
8. Alekseev V.A., Ryzhenko B.N., Shvartsev S.L. *Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda–poroda T. 1. Sistema voda–poroda v zemnoy kore: vzaimodeystviye, kinetika, ravnovesiye, modelirovaniye* [Geological evolution and formation of water–rock system. V. 1. The water–rock system in the crust: interaction, kinetics, equilibrium modeling]. Novosibirsk, Russian Academy of Sciences Publ., 2005. 244 p.
9. Crowe A.S., Longstaffe F.J. *Extension of geochemical modelling techniques to brines: coupling the Pitzer equations with models. Proc. of Solving Groundwater Problems with Models. Nat. Water Well Assoc. Conf.* Denver, CO. Dublin, Ohio, 1987. pp. 110–129.
10. Mironenko M.V., Polyakov V.B. *On algorithm for the calculation of the equilibrium composition of water-salt systems on the basis of the Pitzer model. Geochemistry International*, 2009, vol. 47, no. 10, pp. 1036–1040.
11. Bukaty M.B., Shvartsev S.L. *Ravnovesie vysokominalizovannykh podzemnykh rassolov s evaporitovymi mineralami na primere yugo zapada Sibirskoy platformy* [Equilibrium of highly mineralized underground brines with evaporite minerals (on example of the south-west of the Siberian platform)]. *Sovetskaya geologiya*, 1983, no. 8, pp. 114–123.
12. Bukaty M.B. *Ravnovesie podzemnykh rassolov Tungusskogo basseyna s mineralami evaporitovykh i terrigenykh fatsiy* [Equilibrium between underground brines of the Tunguska basin with minerals of evaporite and terrigenous facies]. *Russian Geology and Geophysics*, 1999. vol. 40, no. 5, pp. 750–763.

13. Bukaty M.B. *Geologiya i geokhimiya podzemnykh rassolov zapadnoy chasti Sibirskoy platformy*. Dis. Dokt. nauk [Geology and geochemistry of underground brines of western part of the Siberian platform. Dr. Diss.]. Tomsk, 1999. 42 p.
14. Shvartsev S.L. Khimicheskiy sostav i izotopy strontsiya rassolov Tungusskogo basseyna v svyazi s problemoy ikh formirovaniya [Chemical composition and strontium isotopes of brines from the Tunguska basin: implications for their formation]. *Geochemistry International*, 2000, no. 11, pp. 1170–1184.
15. Sidkina E.S., Novikov D.A., Shvartsev S.L. Ravnovesie podzemnykh rassolov zapadnoy chasti Tungusskogo artezianskogo basseyna s mineralami vmeshchayushchikh porod [Equilibrium of underground brines of western part of Tunguska artesian basin and minerals of enclosing rocks]. *Tomsk State University Journal*, 2012, no. 364, pp. 187–192.
16. Parkhurst D.L., Appelo C.A.J. *User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations*. US Geological Survey. Denver, Colorado, 1999. 312 p.
17. Myazina N.G. Vnutri i mezhsolvevye rassoly kungurskikh otlozheniy Prikaspiyskoy sineklizy [Insalt and intersalt brines of the Kungurian sediments of the Peri-Caspian syncline]. *Geology, geology and global energy*, 2014, no. 2 (53), pp. 57–65.
18. Maksimovich G.A., Beltyukov G.V. Solyanye natechnye obrazovaniya gornyykh vyrabotok [Salt speleothems of mines]. *Peshchery*, 1966, no. 6 (7), pp. 3–18.
19. Smetannikov A.F. *Mineralogiya soley i blagorodnykh metallov Verkhnekamskogo mestorozhdeniya*. Dis. Dokt. nauk [Mineralogy of salts and precious metals of the Verkhnekamskoe deposit. Dr. Diss.]. Syktyvkar, 2012. 40 p.
20. Chaykovskiy I.I. Genezis i struktura Verkhnekamskogo mestorozhdeniya kaliyno magnievyykh soley kak osnova ego effektivnogo i kompleksnogo osvoeniya [Genesis and structure of the Verkhnekamskoe deposit of potassium and magnesium salts as a base of its efficient and complex development]. *Problemy mineragenii Rossii* [Minerageny Problems of Russia]. Moscow, RAS Publ., 2012. pp. 157–171.

Received: 26 August 2015.

УДК 621.3.013.62; 621.314.21; 621.314.222.8

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ГЕОРЕСУРСОВ

Никонец Алексей Леонидович,

аспирант кафедры «Электрические станции» Национального Университета
«Львовская политехника», Украина, 79013, г. Львов, ул. С. Бандеры, 12.
E-mail: nykonets@gmail.com

Венгер Владимир Петрович,

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий,
городов и сельского хозяйства» Национального Университета
«Львовская политехника», Украина, 79013, г. Львов, ул. С. Бандеры, 12.
E-mail: vol.venher@gmail.com

Венгер Виктор Петрович,

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий,
городов и сельского хозяйства» Национального Университета
«Львовская политехника», Украина, 79013, г. Львов, ул. С. Бандеры, 12.
E-mail: venherviktor@gmail.com

Актуальность работы: Электроэнергия – один из важнейших ресурсов в мире, используемый повсеместно и приводящий в движение другие отрасли промышленности. Передача электроэнергии от места ее производства до места ее потребления, как один из основополагающих принципов процесса мирового электроснабжения, делается возможной в результате преобразований ее параметров, осуществляемых трансформаторами. При обосновании требуемых уровней продольной (витковой) изоляции трансформаторов явление внутреннего резонанса не учитывалось ни одним директивным документом в мире. Изучение этого явления и рекомендации, которые могут быть сформулированы, позволят повысить надежность работы трансформаторов.

Цель работы: изучение особенностей проявления явления внутреннего резонанса при действии перенапряжений сети одновременно на группу обмоток трансформатора.

Методы исследования: частотные методы натурального эксперимента и анализа электрических цепей.

Результаты. Важной, ранее неизвестной особенностью процессов при внутреннем резонансе является неравномерность распределения напряжения вдоль обмоток. Резонансные частоты процессов, которые наблюдаются в элементах трансформатора, зависят не только от параметров трансформатора, но и от параметров сети, в которую этот трансформатор отдает энергию. Резонансные частоты процессов в обмотках низкого напряжения отличаются от резонансных частот процессов между обмотками высокого напряжения и внутри обмотки высокого напряжения. Различается также интенсивность резонансных процессов, что приводит к существенно разным кратностям перенапряжений. При действии перенапряжений одновременно на группу обмоток может возникнуть не только резонанс между напряжениями взаимоиндукции частей одной обмотки, но и резонанс между напряжениями взаимоиндукции одинаковых обмоток разных фаз.

Ключевые слова:

Трансформатор, резонансные перенапряжения, электромагнитные процессы, продольная изоляция, частотный метод исследования, модель, витковая изоляция.

Анализ результатов исследования по изучению явлений внутреннего резонанса

Методология любого исследования должна быть адекватна сути проблемы. Предмет нашего исследования – трансформатор, самый распространенный в мире элемент, с помощью которого производится преобразование электроэнергии в местах ее производства и в местах ее потребления, – объект с распределенными параметрами, у которого между продольными элементами обмоток и между обмотками разных фаз существует явление взаимоиндукции. По сути, исследование электромагнитных процессов в трансформаторе – задача по определению параметров электромагнитного поля, существующего в средах с различными электрическими свойствами, на границах которых должны выполняться определенные условия (граничные условия) [1]. Сложность количественного ма-

тематического описания процессов требовала упрощения первоначальной, подлежащей решению, физической задачи.

Применительно к промышленным трансформаторам упрощение было достигнуто за счет отдельного рассмотрения магнитных и электрических полей, что, как следствие, привело к разработке теории расчета полей рассеяния [2] и методов выбора их изоляции [3–7]. Эти методы не привели к повышению надежности работы трансформаторов, но, до определенного этапа, считались приемлемыми, так как с применением метода проб и ошибок все же давали результат, удовлетворявший практику. Ситуация изменилась, когда возникла практическая необходимость создания сверхмощных трансформаторов на сверхвысокие напряжения, повреждения которых уже не могли быть экономически приемлемыми.

Резонансные характеристики крупных трансформаторов исследуются с конца 60-х гг. XX столетия. В связи с этим проводились обширные исследования явлений в обмотках трансформаторов при различных конфигурациях энергосистемы и при воздействии определенного вида колебательных перенапряжений. Для изучения этих явлений в начале 70-х гг. была создана рабочая группа IEEE (США), а в 1979 г. – РГ 12–07 СИГРЭ, выпустившая отчет 12–14 [8].

Возрастающее количество повреждений изоляции в трансформаторах в последние годы мотивировало СИГРЭ инициировать (в 2008 г.) новую рабочую группу (A2/C4. 39), чья сфера деятельности включает оценку типов электрических переходных взаимодействий между трансформатором и сетью.

Исследования под эгидой СИГРЭ продолжают и в настоящее время [9, 10]. Исследован дополнительно один из возможных источников резонансного возбуждения обмоток – быстрые переходные процессы (до нескольких МГц) в элегазовых подстанциях. Последние публикации продолжают наметившуюся тенденцию детального учета геометрического описания конструкции трансформатора. Так как эта информация – собственность производителя, делается вывод о сложности такого анализа. Как альтернативный подход предлагается использовать модели трансформатора в виде «черного (серого) ящика», так как они не требуют информации о геометрии трансформатора и способны воспроизводить поведение трансформатора с высокой степенью точности. Модели в виде «черного ящика» обычно получают с помощью снятия частотных характеристик с последующей аппроксимацией снятых функций. Такие модели могут быть реализованы с помощью программ моделирования электромагнитных переходных процессов через обобщенную электрическую схему или с помощью численного интегрирования уравнений состояния [11–15].

Подводя итоги обзора выполненных исследований, следует констатировать, что более чем за 50 лет исследований ученым всего мира не удалось сформулировать предложений по корректировке методов изготовления и высоковольтных испытаний продольной изоляции трансформаторов, обеспечивающих надежную эксплуатацию трансформаторов в условиях развития в обмотках резонансных явлений. Единственная причина – несоответствие используемых наукой методов исследования существу исследуемой проблемы. Без понимания физических процессов, которые происходят в обмотках и изоляции трансформатора, невозможно правильно выбрать методы исследования, а следовательно, и разработать рекомендации по повышению надежности работы.

С 2005 г. начинаются исследования внутреннего резонанса на Украине [16]. Предлагаются конкретные способы неразрушающей диагностики предаварийного состояния электрооборудования с

обмотками высокого напряжения. На этом этапе изучается классический вариант явления внутреннего резонанса между индуктивностью обмотки трансформатора и емкостью его главной изоляции. Проводятся экспериментальные исследования частотных характеристик трансформатора как носителей обобщенной информации о свойствах различных элементов конструкции, разрабатывается математическая модель трансформатора, с ее помощью изучаются электромагнитные процессы внутри трансформатора при действии на него перенапряжений со стороны сети. Важно отметить, что на этом этапе исследований не возникло никаких неразрешимых проблем методологического характера.

Проблемы начались при изучении параметров электромагнитных процессов в произвольно выбранной конкретной точке обмотки. Суть проблемы состояла в том, что при попытке реализации экспериментальных частотных характеристик в соответствии с известными канонами ТОЭ [17] результаты параметров режима, полученные с помощью синтезированных математических моделей, *не совпадали* с результатами экспериментальных исследований! Это был критический этап исследований. Уже на этом этапе экспериментально был установлен факт неравномерного распределения напряжения 50 Гц вдоль обмотки ВН в режиме короткого замыкания трансформатора [16].

Изложенная в [18–22] методология исследований электромагнитных процессов в трансформаторах при действии на них перенапряжений представляет собой качественно новый уровень знаний:

- объясняющий причины недостаточной надежности витковой изоляции и неадекватности научных рекомендаций по предупреждению витковых замыканий;
- обосновывающий необходимость адаптации теории цепей к решению нового класса задач по исследованию характеристик общего электромагнитного поля, существующего одновременно в средах с различными электрическими свойствами, трансформатора;
- устраняющий при моделировании нарушение принципа взаимности взаимоиндукции в реальных трансформаторах;
- предлагающий способы адаптации теории цепей к решению нового класса задач, учета резонансных процессов в обмотках под действием потока взаимоиндукции и нелинейности характеристик магнитопровода при действии на трансформатор одновременно соизмеримых по величине перенапряжений разных частот;
- обеспечивающий адекватность воспроизведения электромагнитных процессов в обмотках трансформаторов.

Основные результаты исследования

Исследования проводились на трансформаторе, характеристики которого и методы экспериментального исследования описаны в [21]. В качестве

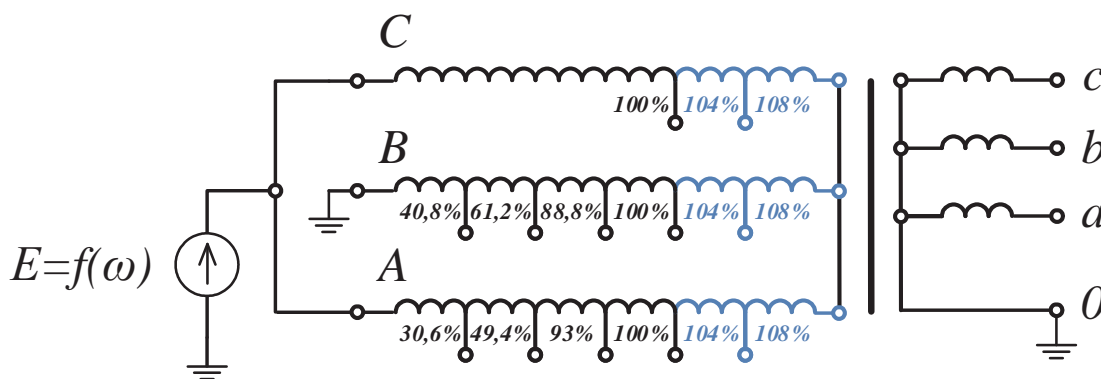


Рис. 1. Схема испытания трансформатора с указанием выводов обмоток ВН и НН, на которых производились измерения

Fig. 1. Circuit of the transformer testing with winding terminals of high voltage (HV) and low voltage (LV) at which the measurements were carried out

расчетного был выбран режим однофазного замыкания в сети с изолированной нейтралью. В этом случае на двух неповрежденных фазах сети возникают свободные составляющие перенапряжений, совпадающие по фазе. Такой режим удобно эквивалентировать при снятии частотных характеристик, подавая сигнал высокочастотного генератора на две закороченные фазы трансформатора. Третью фазу заземляли и присоединяли к другому выводу генератора (рис. 1).

Учитывая разное количество сделанных дополнительных выводов от основной части обмотки ВН разных фаз и некоторое отличие характеристик сопротивления холостого хода крайних фаз А и С от характеристики для фазы В, опыты проводились в двух вариантах: при замыкании на землю фазы С и при замыкании на землю фазы В. В первом варианте закорачивались фазы А и В. Во втором – А и С (рис. 1).

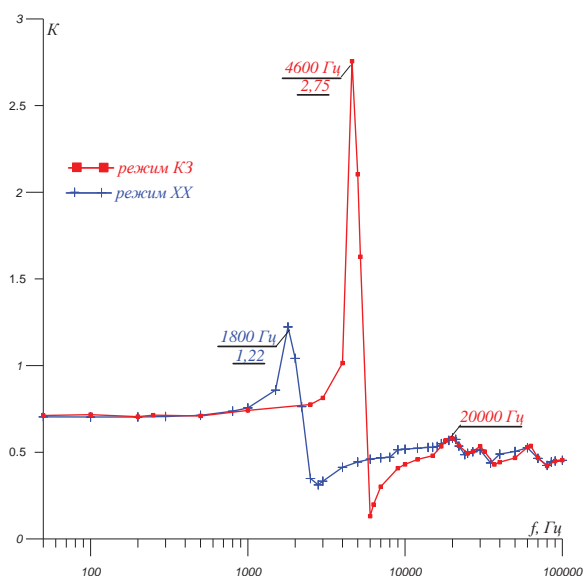


Рис. 2. Зависимость величины напряжения в нейтрали трансформатора от частоты приложенного напряжения при замыкании фазы В сети на «землю»

Fig. 2. Dependence of voltage value in the transformer neutral wire on frequency of the applied voltage at B phase-to-ground fault in the network

Распределение приложенного напряжения между обмотками А, С и В (рис. 1), в зависимости от частоты приложенного напряжения, показано на рис. 2. Как видно из рис. 2, на частоте 1,8 кГц между обмотками А, С и В, в режиме холостого хода трансформатора, наступает резонанс напряжений. Максимальное напряжение обмотки фазы В достигает значения 1,22 от приложенного. Некоторое подобие резонансных процессов наблюдается также при частоте 20 кГц.

В нагрузочном режиме работы трансформатора к его обмотке низкого напряжения (НН) подключены воздушные или кабельные линии, конденсаторы компенсирующих устройств и т. д. Для высокочастотных перенапряжений, действующих на трансформатор это эквивалентно режиму КЗ обмотки НН. Распределение приложенного напряжения между обмотками А, С и В для случая короткого замыкания обмотки НН также показано на рис. 2. Как видно из рис. 2, замыкание обмотки НН увеличивает частоту резонанса напряжения с 1,8 до 4,6 кГц и кратность перенапряжений с 1,22 до 2,75. Важно, что характер распределения напряжений между обмотками зависит от частоты. В свою очередь распределение напряжений вдоль отдельных обмоток также зависит от частоты. Применительно к схеме рис. 1 распределение напряжения вдоль обмоток трансформатора показано на рис. 3.

Классическое распределение напряжений при отсутствии резонансных явлений для частоты 50 Гц показано на рис. 3 жирными линиями. Как видно из рис. 3, в зависимости от частоты приложенного напряжения наблюдаются два принципиально разных случая резонансных явлений. Первый – напряжение в нейтрали (на фазе В) больше, чем при частоте 50 Гц. Это частоты 1800 и 2000 Гц для режима холостого хода и частоты 4600, 4700 Гц для режима короткого замыкания. В этом случае наблюдается резонанс между напряжениями взаимной индукции обмоток фаз А, С и В. Второй случай – напряжение нейтрали меньше классического при частоте 50 Гц. Частоты 15,1; 15,5; 30,31 кГц и 17; 31,1; 33 кГц соответственно для режимов холостого хода и короткого замыкания трансформатора. В этом случае резонансные процессы происходят в каждой из обмоток

ВН независимо друг от друга. Механизм их возникновения описан в [18]. Важно, что в режиме холостого хода при резонансе напряжений взаимной индукции в частях отдельных обмоток ВН возникают не только магнитные потоки рассеяния в обмотках ВН, но и магнитные потоки взаимной индукции, которые наводят перенапряжения в отключенных обмотках НН [22] (рис. 4). Как видно из рис. 4, с ростом частоты приложенного к трансформатору напряжения кратность перенапряжений в обмотках НН растет. При замыкании на «землю» фазы С сети несколько изменяются как кратности перенапряжений фаз а, в, с обмоток НН, так и резонансные частоты (рис. 5).

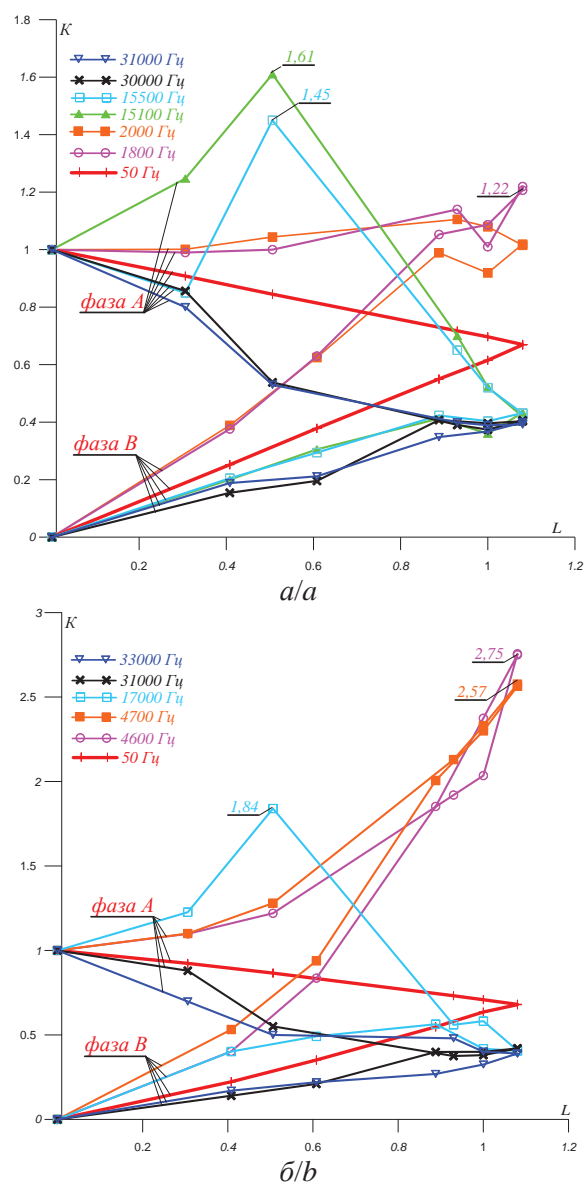


Рис. 3. Распределение перенапряжений вдоль обмоток ВН фаз А и В трансформатора для случая однофазного замыкания на фазе В сети: а) режим холостого хода обмоток НН; б) режим короткого замыкания обмоток НН

Fig. 3. Over-stress distribution along the windings of HV phases A and B of the transformer for a case of single-phase fault at the phase B of the network: a) idle condition of LV windings; b) fault conditions of LV windings

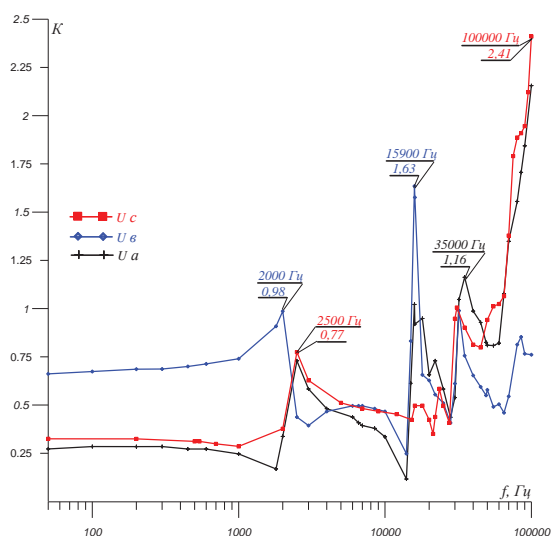


Рис. 4. Зависимость кратностей перенапряжений в отключенных обмотках НН при замыкании на землю фазы В трансформатора от частоты воздействующих перенапряжений

Fig. 4. Dependence of overvoltage ratios in shutdown LV windings at ground short circuit of the transformer phase B on frequency of the incoming over-stress

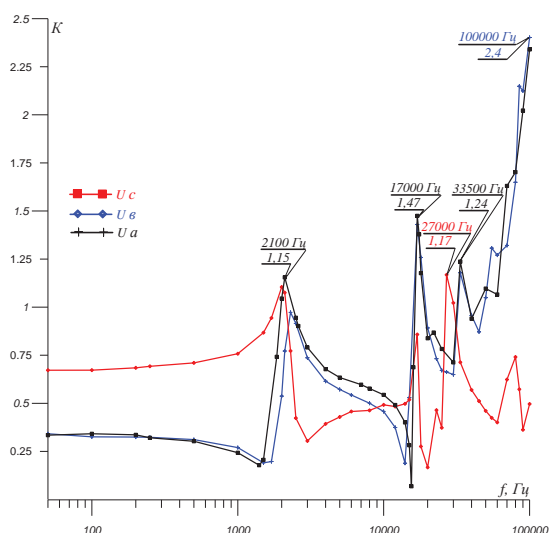


Рис. 5. Зависимость кратностей перенапряжений в отключенных обмотках НН при замыкании на землю фазы С трансформатора от частоты воздействующих перенапряжений

Fig. 5. Dependence of overvoltage ratios in shutdown LV windings at ground short circuit of the transformer phase C on frequency of the incoming over-stress

Важной, ранее неизвестной особенностью процессов при внутреннем резонансе является неравномерность распределения напряжения вдоль обмоток. В результате градиенты напряжения на отдельных частях обмоток превышают кратности перенапряжений на всей обмотке, что нужно учитывать при обосновании необходимых уровней продольной изоляции обмоток. Распределение градиентов напряжения вдоль обмоток трансформатора в режиме холостого хода трансформатора, при замыкании фазы В сети, в зависимости от частоты приложенного напряжения показано на рис. 6. Как следует из рис.

6, б наибольшие градиенты напряжения для заземленной фазы В формируются на регулировочной части обмотки ВН (100–108 %), которая в данном опыте обтекается током замыкания на «землю» (в диапазоне частот 50–17000 Гц), а также на части основной обмотки ВН (88–100 %), примыкающей к нейтрали (при частотах больших 17 кГц). Для фазы А, подключенной к источнику напряжения, дополнительно к опасным участкам фазы В, появилась, при частотах 15–17 кГц, опасная зона в начале обмотки (0–30,6 %, рис. 6, а). Для режима КЗ обмотки НН (рис. 7) опасные зоны не изменились (93–100 и 100–108 %). Изменились резонансные частоты, и возросли кратности перенапряжений.

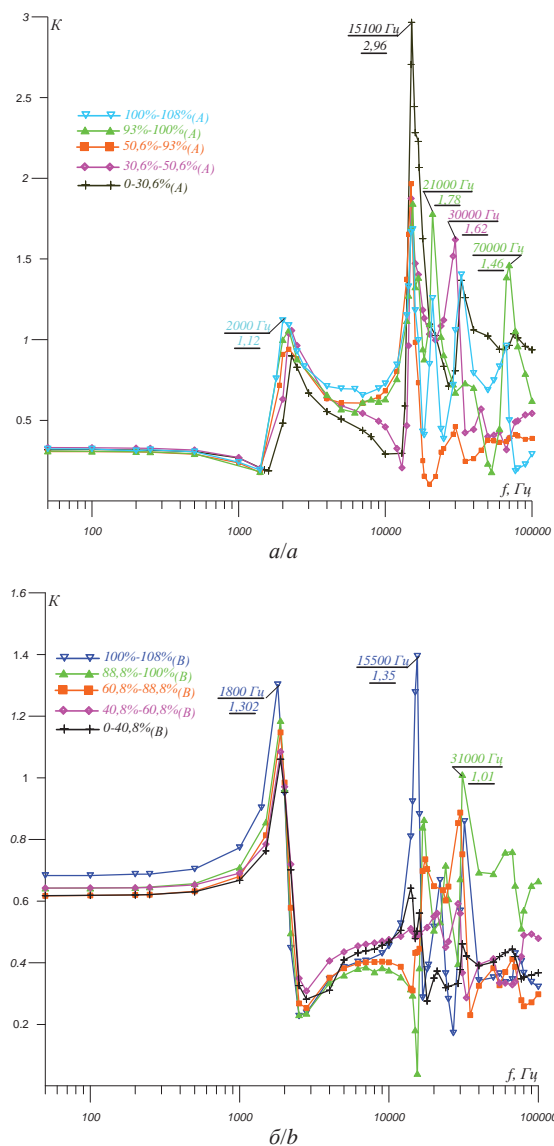


Рис. 6. Распределение градиентов напряжения вдоль обмоток ВН трансформатора в режиме холостого хода при замыкании фазы В сети в зависимости от частоты приложенного напряжения для обмотки фазы: а) А; б) В

Fig. 6. Distribution of stress gradients along the windings of the HV transformer in idle mode at B phase fault in the network depending on frequency of the applied stress for the winding of the phase: а) А; б) В

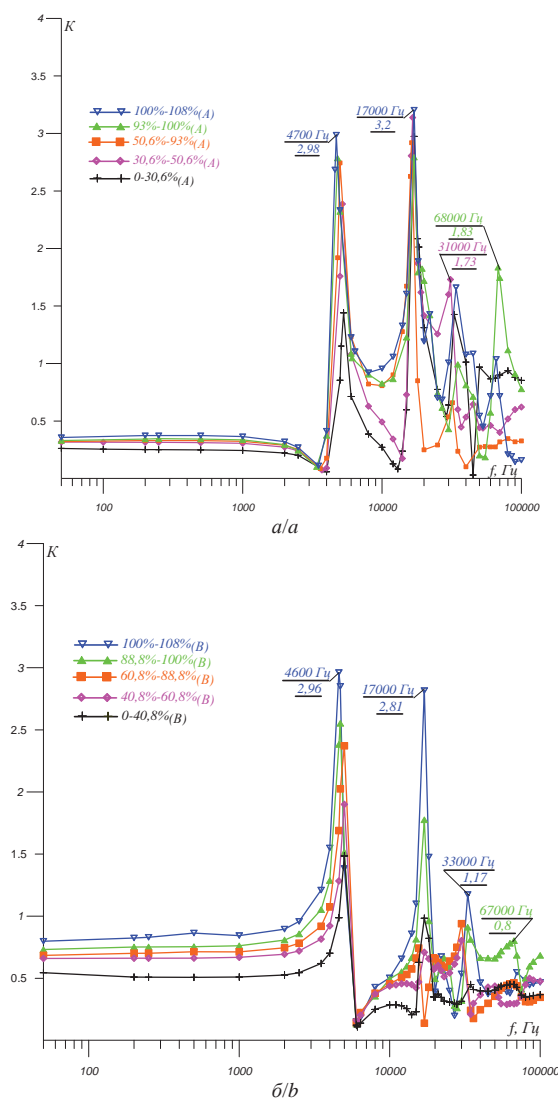


Рис. 7. Распределение градиентов напряжения вдоль обмоток ВН трансформатора в режиме короткого замыкания при замыкании фазы В сети в зависимости от частоты приложенного напряжения для обмотки фазы: а) А; б) В

Fig. 7. Distribution of stress gradients along the windings of the HV transformer in short circuit condition at B phase fault in the network depending on frequency of the applied stress for the winding of the phase: а) А; б) В

Рассмотренные выше режимы холостого хода и КЗ обмотки НН трансформатора являются крайними расчетными режимами. Важно иметь представление об особенностях электромагнитных процессов в реальных нагрузочных режимах. На рис. 8 показана аналогичная рис. 2 зависимость, но для реальных нагрузочных режимов, которые имитировались подключением ко всем фазам обмотки НН конденсаторов емкостью 60, 30, 10 или 1 мкФ. Эти емкости обеспечивали для промышленной частоты 50 Гц загрузку трансформатора реактивной мощностью, соответствующей 15; 7,5; 2,5; 0,25 % от номинальной. Соответственно зависимость кратностей перенапряжений в обмотке НН (фаза б) при замыкании на землю фазы В сети

для разных нагрузочных режимов обмотки НН трансформатора от частоты воздействующего напряжения показана на рис. 9. Поскольку распределение напряжения вдоль обмоток ВН трансформатора зависит от значения емкости конденсаторов, используемых в качестве нагрузки обмотки НН, на рис. 10 показано такое распределение на примере конденсатора емкостью 30 мкФ.

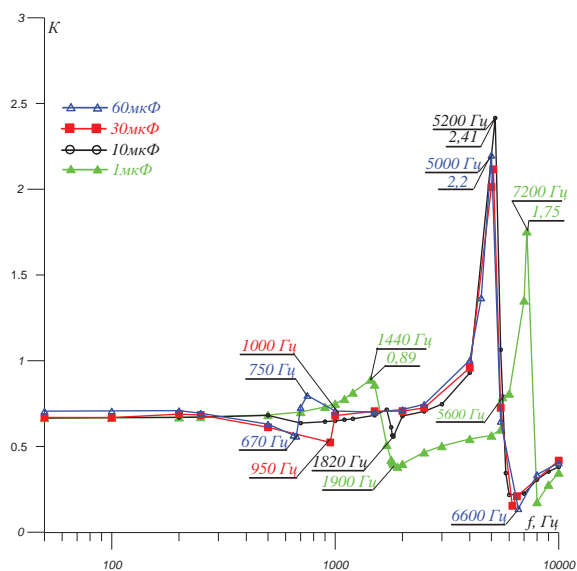


Рис. 8. Зависимость величины напряжения в нейтрали трансформатора от частоты приложенного напряжения при замыкании фазы В на «землю» для разных нагрузочных режимов обмотки НН трансформатора

Fig. 8. Dependence of stress in the transformer neutral on frequency of the applied stress at B phase ground fault for different load modes of the transformer LV winding

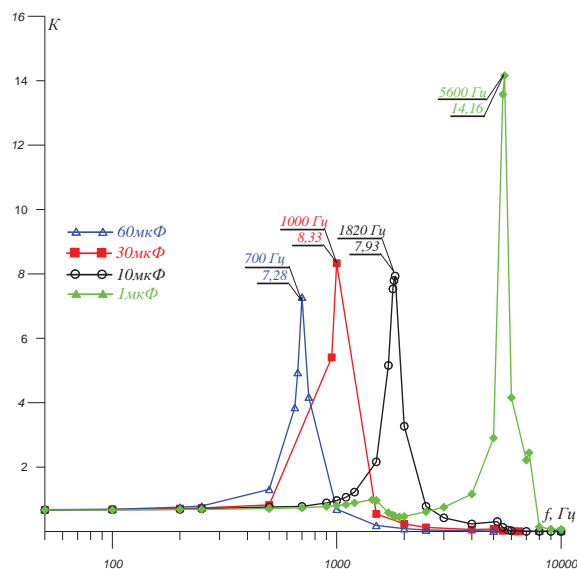


Рис. 9. Зависимость кратности перенапряжений в обмотке НН (фаза b) при замыкании на землю фазы В для разных нагрузочных режимов обмотки НН трансформатора от частоты воздействующих перенапряжений

Fig. 9. Dependence of overvoltage ratio in LV winding (phase b) at B phase ground fault on frequency of the impacting stress

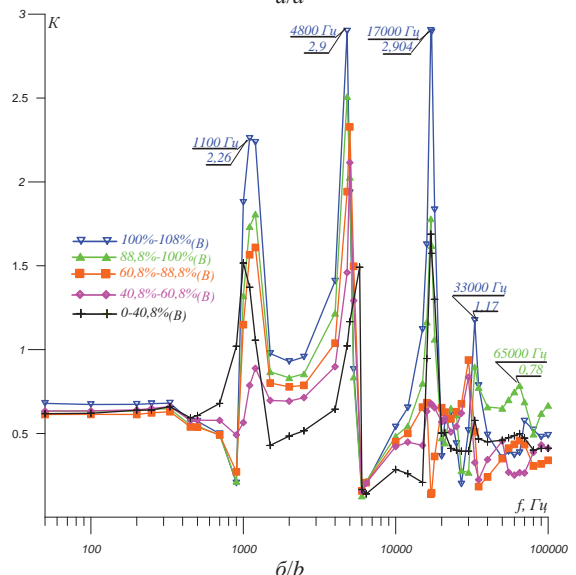
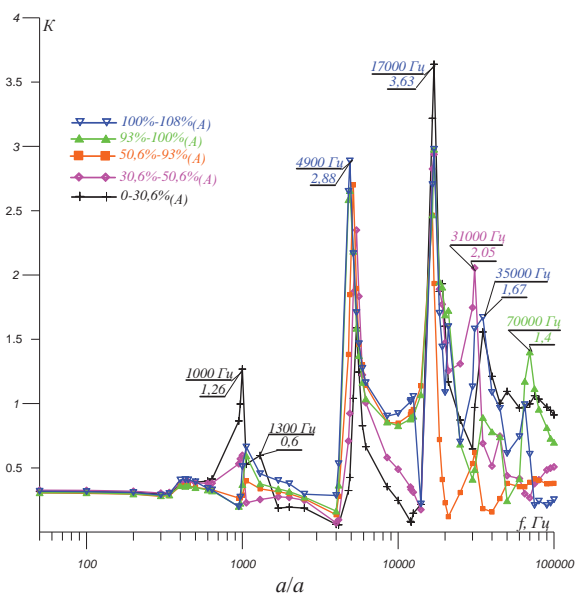


Рис. 10. Распределение градиентов напряжения вдоль обмоток ВН трансформатора для емкостной нагрузки обмоток НН 30 мкФ при замыкании фазы В сети в зависимости от частоты приложенного напряжения: а) фаза А обмотки ВН б) фаза В обмотки ВН

Fig. 10. Distribution of stress gradients along the transformer HV windings for the capacitive load of LV windings 30 μ F at B phase fault depending on frequency of the applied stress: а) phase A of HV winding; б) phase B of HV winding

Анализ результатов опытов, представленных на рис. 8–10, впервые показывает, что резонансные частоты процессов, которые наблюдаются в элементах трансформатора, зависят не только от параметров трансформатора, но и от параметров сети, в которую этот трансформатор отдает электроэнергию. Резонансные частоты процессов в обмотках НН отличаются от резонансных частот процессов между обмотками ВН и внутри обмоток ВН. Различается также интенсивность резонансных процессов. Так, например, резонансные процессы между индуктивностью трансформатора и емкостью сети НН в диапазоне частот 700–7000 Гц

характеризуются кратностями перенапряжений на стороне НН в диапазоне 7–14 (рис. 9). Эти же процессы проявляются в обмотках ВН кратностями 2–3 (рис. 10). Воздействие на обмотки ВН перенапряжений с частотой больше 7000 Гц обуславливает появление перенапряжений в обмотках ВН с кратностью до 3 (рис. 10), но исключает какие-либо перенапряжения в обмотках НН (рис. 9). Важно отметить, что резонансные частоты с опасными кратностями перенапряжений в обмотках ВН определяются исключительно параметрами трансформатора, в то время как резонансные частоты с опасными кратностями перенапряжений для изоляции обмоток НН и оборудования потребителей электроэнергии определяются исключительно параметрами нагрузки трансформатора и, в зависимости от их величины в текущий момент времени, охватывают весь диапазон от 50 до 7000 Гц.

Приведенные выше исследования относятся к распределительным трансформаторам со схемой соединения Y/Y-0, которые при несимметричной нагрузке обуславливают появление на шинах потребителя несимметрии напряжения. Для улучшения качества электроэнергии часто используют трансформаторы со схемой соединения D/Y-0, которые имеют малое сопротивление нулевой последовательности. При соединении обмоток ВН исследуемого трансформатора (рис. 1) в «треугольник» получается стандартный трансформатор 11/0,4 кВ. Для получения максимально возможной информации в опытах заземлялась точка соединения фаз А и В, а генератор высокочастотных сигналов подключался к началу и концу обмотки фазы С одновременно. Программа исследований трансформатора со схемой соединения Δ/Y-0 повторяла программу исследований трансформатора со схемой соединения Y/Y-0.

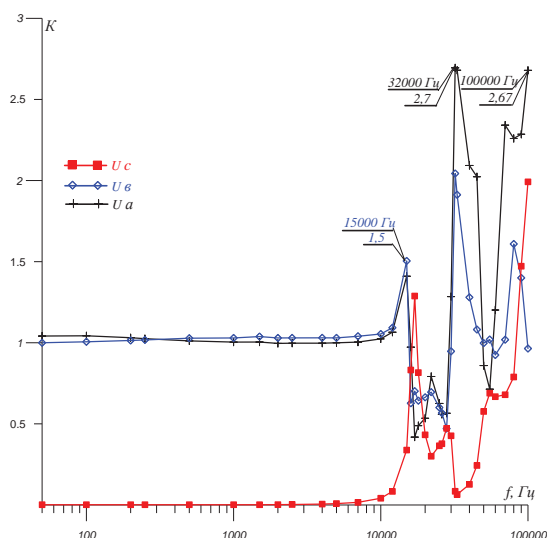


Рис. 11. Зависимость кратностей перенапряжений в отключенных обмотках НН при замыкании на «землю» в питающей сети для трансформатора со схемой соединения обмоток Δ/Y-0

Fig. 11. Dependence of overvoltage ratio in shutdown LV windings at ground fault in supply net for the transformer with Δ/Y-0 winding circuit

Зависимость кратностей перенапряжений в отключенных обмотках НН при замыкании на «землю» в питающей сети для трансформатора со схемой соединения обмоток Δ/Y-0 представлена на рис. 11, а распределение градиентов напряжения вдоль обмотки ВН (фаза А) – на рис. 12. Сравнение данных рис. 11 и 4 показывает, что для схемы соединения Δ/Y-0 перенапряжения развиваются одновременно на двух фазах а и в. Это повышает вероятность повреждения изоляции. Обращает внимание также отсутствие перенапряжений на частоте 2–2,5 кГц, характерных для трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y-0, двукратное увеличение кратности перенапряжений на частотах 32–33,5 кГц и наличие перенапряжений на высоких частотах на фазе с, хотя обмотка ВН фазы С в опыте была закорочена.

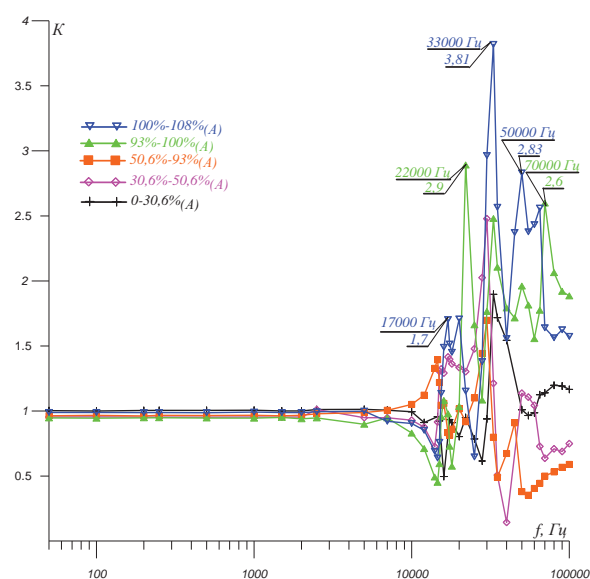


Рис. 12. Распределение градиентов напряжения вдоль обмотки ВН (фаза А) трансформатора со схемой соединения обмоток Δ/Y-0 в режиме холостого хода при замыкании на «землю» в питающей сети

Fig. 12. Distribution of stress gradients along HV winding (phase A) of the transformer with Δ/Y-0 winding circuit in idle conditions at ground fault in supply net

Сравнение данных рис. 12 и 6 показывает, что для обмотки ВН фазы А изменились резонансные частоты, кратности перенапряжений и характер распределения напряжения вдоль обмотки ВН. Так же как и на стороне НН отсутствуют перенапряжения на частоте 2 кГц.

Распределение градиентов напряжения вдоль обмотки ВН (фаза А) в режиме короткого замыкания обмоток НН для трансформатора при однофазном замыкании в питающей сети показано на рис. 13. По резонансным частотам это распределение практически совпадает с данными рис. 12, но характеризуется большими кратностями перенапряжений.

Влияние реальных нагрузочных режимов на характер электромагнитных процессов при замыкании в питающей сети на «землю» иллюстрируют рис. 14, 15. На рис. 14 представлена зависимость кратности перенапряжений в обмотке НН (фаза В) от

частоты воздействующих перенапряжений, а на рис. 15 соответственно показано распределение градиентов напряжений вдоль обмотки ВН (фаза А). Сравнение данных рис. 14 и 9 показывает, что изменение схемы соединения обмоток привело к увеличению и без того высоких кратностей перенапряжений еще в 1,6–1,8 раза. Сравнение данных рис. 15 и 13 показывает, что перенапряжения на резонансных частотах рис. 9 и 14 проявляются также и в обмотках ВН, но со значительно меньшими кратностями. Следует заметить, что эти перенапряжения остаются опасными для продольной изоляции обмоток ВН.

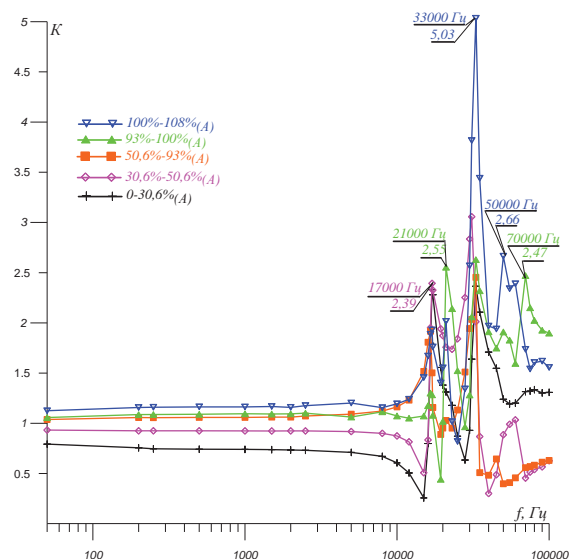


Рис. 13. Распределение градиентов напряжения вдоль обмотки ВН (фаза А) трансформатора со схемой соединения обмоток $\Delta/Y-0$ в режиме короткого замыкания обмоток НН при замыкании на «землю» в питающей сети

Fig. 13. Distribution of stress gradients along HV winding (phase A) of the transformer with $\Delta/Y-0$ winding circuit in short circuit conditions at ground fault in supply net

Проведение экспериментальных исследований, в том числе представленных выше, дает уникальную возможность разобраться в физике электромагнитных процессов при внутреннем резонансе, но, учитывая, что все резонансные процессы развиваются во времени, не позволяет сформулировать практические рекомендации по повышению надежности работы трансформаторов. Необходимый результат можно получить только с помощью математического моделирования этих процессов. Современное состояние разрабатываемых методов моделирования, в том числе с учетом последних, весьма представительных публикаций, таких, например, как [9, 10], не позволяет воспроизвести с помощью моделирования установленные в [18–22], а также в настоящей статье следующие экспериментальные факты:

- 1) неравномерное распределение приложенного напряжения вдоль обмоток трансформаторов;
- 2) возникновение резонансных процессов в отключенных обмотках и их частях под действием стороннего магнитного потока;

- 3) обратное влияние резонансных процессов в отключенных обмотках или их частях на величину стороннего магнитного потока;
- 4) резонансные частоты процессов, которые наблюдаются в элементах трансформатора, зависят не только от параметров трансформатора, но и от параметров сети, в которую этот трансформатор отдает электроэнергию.

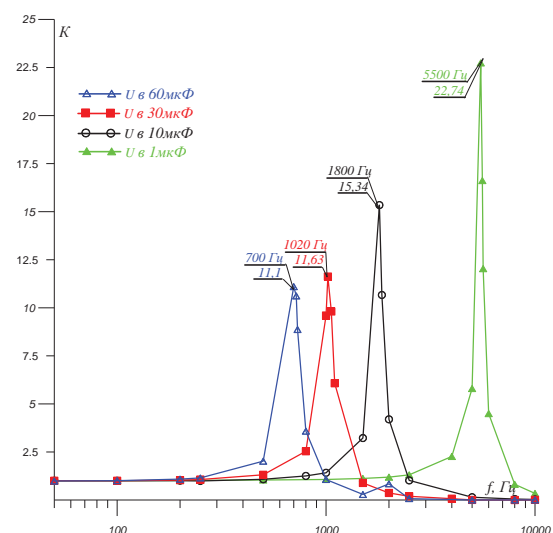


Рис. 14. Зависимость кратности перенапряжений в обмотке НН (фаза В) при замыкании на «землю» в питающей сети для разных нагрузочных режимов обмотки НН трансформатора от частоты воздействующих перенапряжений

Fig. 14. Dependence of overvoltage ratio in LV winding (phase B) at ground fault in supply net for different load modes of LV transformer on frequency of impacting overvoltage

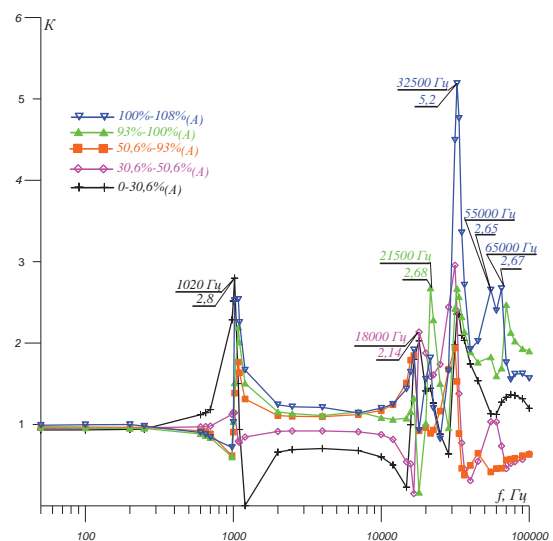


Рис. 15. Распределение градиентов напряжения вдоль обмотки ВН (фаза А) трансформатора со схемой соединения обмоток $\Delta/Y-0$ для емкостной нагрузки обмоток НН 30 мкФ при однофазном замыкании питающей сети в зависимости от частоты приложенного напряжения

Fig. 15. Distribution of stress gradients along HV winding (phase A) of the transformer with $\Delta/Y-0$ winding circuit for capacitive load of LV winding 30 μF at one-phase fault in supply net depending on the applied voltage

Выводы

1. Обмотки трансформатора, при действии на них перенапряжений со стороны питающей сети, следует рассматривать как цепи с распределенными *неоднородными* параметрами, между продольными элементами которых существует явление взаимоиנדукции.
2. При действии перенапряжений одновременно на группу обмоток может возникнуть не только резонанс между напряжениями взаимоиנדукции частей одной обмотки, но и резонанс между напряжениями взаимоиנדукции одинаковых обмоток разных фаз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 263 с.
2. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.
3. Сапожников А.В. Уровни изоляции электрооборудования высокого напряжения. Нормы и методы испытания электрической прочности. – М.: Энергия, 1969. – 296 с.
4. ГОСТ 1516.1–76*. Электрооборудование переменного тока на напряжение от 3 до 500 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 61 с.
5. ГОСТ 1516.2–97. Межгосударственный стандарт, Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. – Киев: Госстандарт Украины, 1999. – 32 с.
6. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозных и внутренних перенапряжений. РД 153–34.3–35.125–99. 2-е изд. Утверждено Первым заместителем председателя Правления РАО «ЕЭС России» О.В. Бритвиным 12.07.1999 г. – СПб.: Из-во ПЭИПК. 1999. – 333 с.
7. ГОСТ 1516.3–96. Межгосударственный стандарт, электрооборудование переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. – Киев: Госстандарт Украины, 1999. – 54 с.
8. Энергетика за рубежом. Трансформаторы. Перенапряжения и координация изоляции: переводы докладов Международной конференции по Большим электрическим системам (СИГРЭ-84) / под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 420 с.
9. Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. P. 1. Expertise, Joint Working Group A2/C4.39, Brochure 577A. – Paris: CIGRE, Apr. 2014. – 175 p.
10. Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. P. 2. Case studies, Joint Working Group A2/C4.39, Brochure 577B. – Paris: CIGRE, Apr. 2014. – 123 p.
11. Dommel H.W. Electromagnetic Transients Program. Reference Manual. (EMTP Theory Book). – Portland, OR: Bonneville Power Administration, 1986. – 700 p.
12. Semlyen A., Dabuleanu A. Fast and accurate switching transient calculations on transmission lines with ground return using recursive convolutions // IEEE Trans. Power App. Syst. – NY, Mar./Apr. 1975. – V. PAS-94. – № 2. – P. 1. – P. 561–575.
13. Gustavsen B., Mo O. Interfacing convolution based linear models to an electromagnetic transients program // Proc. Int. Conf.

3. Резонансные частоты с опасными кратностями перенапряжений в обмотках ВН определяются исключительно параметрами трансформатора.
4. Резонансные частоты с опасными кратностями перенапряжений в обмотках НН определяются исключительно параметрами сети, в которую трансформатор отдает электроэнергию.
5. Для формулирования предложений по повышению надежности работы продольной изоляции трансформаторов необходима разработка методологии исследований и моделирования электромагнитных процессов, при действии на трансформатор перенапряжений со стороны питающей сети.

- Power Systems Transients. – Lyon, France, Jun. 4–7, 2007. – 6 p.
14. Математичне моделювання в електроенергетиці: підручник / О.В. Кириленко, М.С. Сегеда, О.Ф. Буткевич, Т.А. Мазур. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. – 608 с.
15. Сегеда М.С., Черемних Є.В., Мазур Т.А. Математичне моделювання вільних коливань напруги в обмотках трансформаторів з урахуванням взаємоіндукції між витками під час імпульсних перенапруг // Науковий бюлетень Дніпропетровськ НГУ. – 2013. – № 1. – С. 68–76.
16. Физические явления внутреннего резонанса в электрооборудовании с обмотками высокого напряжения / И.Р. Бучковский, М.М. Молнар, А.Л. Никонец, Л.А. Никонец, М.Б. Сабат / под ред. Л.А. Никонца. – Львов: НВФ «Українські технології», 2012. – 167 с.
17. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники, электрические цепи. 8-е изд. – М.: Высшая школа, 1984. – 560 с.
18. Электромагнитные процессы и условия возникновения резонансных перенапряжений в обмотках трансформатора / М.Б. Сабат, А.Л. Никонец, В.П. Венгер, В.П. Венгер // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 4. – С. 91–102.
19. Никонец А.Л., Венгер В.П., Венгер В.П. Методы исследования электромагнитных процессов в обмотках трансформаторов при действии на них перенапряжений со стороны сети // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 3. – С. 86–98.
20. Никонец Л.А., Никонец А.Л., Венгер В.П. Моделирование электромагнитных процессов в обмотках трансформаторов при действии на них перенапряжений сети // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 4. – С. 125–137.
21. Распределение воздействующих на трансформатор напряжений вдоль обмотки ВН / Л.А. Никонец, М.Б. Сабат, И.Р. Бучковский, Р.В. Бучковский, А.Л. Никонец, В.П. Венгер, В.П. Венгер // Электрические станции. – 2014. – № 2. – С. 51–56.
22. Никонец А.Л., Венгер В.П., Венгер В.П. Электромагнитные процессы в обмотках трансформатора при действии на него перенапряжений // Электрические станции. – 2014. – № 12. – С. 18–26.

Поступила 07.09.2015 г.

UDC 621.3.013.62; 621.314.21; 621.314.222.8

ENERGY EFFICIENT PRODUCTION AND TRANSFORMATION BASED ON GEO ASSETS

Aleksey L. Nykonets,

National University Lviv Polytechnic, 12, St. Bandery street, Lviv city,
79013, Ukraine. E-mail: nykonets@gmail.com

Vladimir P. Venger,

National University Lviv Polytechnic, 12, St. Bandery street, Lviv city,
79013, Ukraine. E-mail: vol.venher@gmail.com

Viktor P. Venger,

National University «Lviv Polytechnic», 12, St. Bandery Street, Lviv city,
79013, Ukraine. E-mail: venherviktor@gmail.com

The relevance of the study. Electrical energy is one of the most important resources on the planet, which is used everywhere and lets other industries work. Electrical-power transmission from the place, where electrical energy is produced, to the place, where it is consumed, as one of the fundamental principle of the world power supply process, is possible because of its parameters transformation, done by a transformer. The phenomenon of internal resonance has not been taken into consideration by any executive directive in the World during reasoning the necessary level of longitudinal insulation. Studying the phenomenon and stating recommendations will help to increase the working reliability of transformers.

The main aim of the research is to study the features of internal resonance phenomenon appearance with a group of transformer windings influenced by network overvoltage simultaneously.

The methods used in the study: frequency methods of natural experiment and electrical circuit analysis.

The results. The important unknown before feature of the processes during internal resonance is inequality of voltage distribution along windings. Resonance frequencies of the processes, which are observed in transformer elements, depend not only on parameters of a transformer, but also on network parameters, which the transformer gives energy into. Resonance frequencies of the processes in low voltage windings differ from resonance frequencies of the processes between high voltage windings and within the high voltage winding. The intensity of resonance processes is also different, which results in significantly different overvoltage ratios.

Key words:

Transformer, resonance overvoltage, electromagnetic processes, longitudinal insulation, frequency research method, model, turn insulation.

REFERENCES

1. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektromagnitnoe pole* [Theory of electrotechnology. Electromagnetic field]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. 263 p.
2. Vasyutinsky S.B. *Voprosy teorii i rascheta transformatorov* [Problems of transformer theory and computation]. Leningrad, Energiya Publ., 1970. 432 p.
3. Sapozhnikov A.V. *Urovni izolyatsii elektrooborudovaniya vysokogo napryazheniya. Normy i metody ispytania elektricheskoy prochnosti* [Insulation levels of high-voltage electrical equipment. Standards and methods of electric strength test]. Moscow, Energiya Publ., 1969. 296 p.
4. *GOST 1516.1–76*. Elektrooborudovanie peremennogo toka na napryazhenie ot 3 do 500 kV. Trebovaniya k elektricheskoy prochnosti izolyatsii* [State Standard 1516.1–76*. Alternative current electrical equipment with rated voltage from 3 to 500 kV. Insulation electrical strength requirements]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1985. 61 p.
5. *GOST 1516.2–97. Mezhdunarstvenny standart. Elektrooborudovanie i elektroustanovki peremennogo toka na napryazhenie 3 kV i vyshe. Obschie metody ispytaniy elektricheskoy prochnosti izolyatsii* [State Standard 1516.2–97. Interstate standard, AC electrical equipment and installations with rated voltage 3 kV and higher. Main test methods of electrical strength of insulation]. Kiev, State standard of Ukraine, 1999. 32 p.
6. *Rukovodstvo po zashchite elektricheskikh setey 6–1150 kV ot grozovykh i vnutrennikh perenapryazheniy. RD 153–34.3–35.125–99. Utverzhdeno Pervym zamestitelem predsedatelya Pravleniya RAO «EES Rossii» O.V. Britvinym 12.07.1999 g.* [Manual on 6–1150 kV electrical network protection against lightning and internal overvoltage. RD 153–34.3–35.125–99. Approved by the first vice-chairman of the board of «RAO EES Russia» O.V. Britvin 12.07.1999]. S-Petersburg, PEIPK Publ. house, 1999. 333 p.
7. *GOST 1516.3–96. Mezhdunarstvenny standart, elektrooborudovanie peremennogo toka na napryazhenie ot 1 do 750 kV. Trebovaniya k elektricheskoy prochnosti izolyatsii* [State Standard 1516.3–96. Interstate standard, alternative current electrical equipment with rated voltage from 1 to 750 kV. Insulation electrical strength requirements]. Kiev, State standard of Ukraine, 1999. 54 p.
8. *Energetika za rubezhom. Transformatory. Perenapryazheniya i koordinatsiya izolyatsii: perevody dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii po Bolshym elektricheskim sistemam (SIGRE-84)* [Power engineering abroad. Transformers. Overvoltage and insulation management. Translations of international conference reports of big electrical systems (SIGRE-84)]. Eds. S.D. Lizunov, A.K. Lokhanin. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 420 p.
9. *Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. P. 1. Expertise, Joint Working Group A2/C4.39, Brochure 577A.* Paris, CIGRE, Apr. 2014. 175 p.
10. *Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System. P. 2. Case studies, Joint Working Group A2/C4.39, Brochure 577B.* Paris, CIGRE, Apr. 2014. 123 p.
11. Dommel H.W. *Electromagnetic Transients Program. Reference Manual. (EMTP Theory Book)*. Portland, OR, Bonneville Power Administration, 1986. 700 p.
12. Semlyen A., Dabuleanu A. Fast and accurate switching transient calculations on transmission lines with ground return using re-

- cursive convolutions. *IEEE Trans. Power App. Syst.* NY, Mar./Apr. 1975, vol. PAS-94, no. 2, pt. 1, pp. 561–575.
13. Gustavsen B., Mo O. Interfacing convolution based linear models to an electromagnetic transients program. *Proc. Int. Conf. Power Systems Transients.* Lyon, France, Jun. 4–7, 2007. 6 p.
 14. Kirilenko O.V., Segeda M.S., Butkevich O.F., Mazur T.A. *Matematychni modelyuvannya v elektroenergetytsi: pidruchnyk* [Mathematical modelling in power engineering; textbook]. Lviv, Lviv Polytechnic Press, 2010. 608 p.
 15. Segeda M.S., Cheremnykh E.V., Mazur T.A. Matematychni modelyuvannya vilnykh kolyvan napruhy v obmotkakh transformatoriv z urakhuvannyam vzaemoinduktzii mizh vytkamy pid chas impulsnykh perenaprug [Mathematical modelling of voltage free oscillation in transformer windings taking into consideration mutual induction between turns under the influence of impulse overvoltage]. *Scientific bulletin of Dnepropetrovsk NGU*, 2013, no. 1, pp. 68–76.
 16. Buchkovsky I.R., Molnar M.M., Nikonets A.L., Nikonets L.A., Sabat M.B. *Fizicheskie yavleniya vnutrennego rezonansa v elektrooborudovanii s obmotkami vysokogo napryazheniya* [Physical phenomenon of internal resonance in electrical equipment with high voltage windings]. Ed. by Nikonets L.A. Lviv, Ukrainian technologies Publ., 2012. 167 p.
 17. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki, elektricheskie tsepi* [Theory of electrotechnology, electrical circuits]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1984. 560 p.
 18. Sabat M.B., Nikonets A.L., Venger V.P., Venger V.P. Elektromagnitnye protsessy i usloviya vznikoveniya rezonansnykh perenapryazheniy v obmotkakh transformatora [Electromagnetic processes and conditions of appearance of resonance overvoltage in transformer windings]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 91–102.
 19. Nykonets A.L., Venger V.P., Venger V.P. Metody issledovaniya elektromagnitnykh protsessov v obmotkakh transformatorov pri deystvii na nikh perenapryazheniy so storony seti [Research methods of electromagnetic processes in transformer windings influenced by power system overvoltage]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 3, pp. 86–98.
 20. Nykonets L.A., Nykonets A.L., Venger V.P. Modelirovanie elektromagnitnykh protsessov v obmotkakh transformatorov pri deystvii na nikh perenapryazheniy seti [Modeling of electromagnetic processes in transformer windings influenced by network overvoltage]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 125–137.
 21. Nykonets L.A., Sabat M.B., Buchkovsky I.R., Buchkovsky R.V., Nikonets A.L., Venger V.P., Venger V.P. Raspredeleniye vozdeystviy na transformator napryazheniy vdol obmotki VN [Voltage distribution influencing a transformer along high voltage winding]. *Elektricheskie stantsii*, 2014, no. 2, pp. 51–56.
 22. Nykonets A.L., Venger V.P., Venger V.P. Elektromagnitnye protsessy v obmotkakh transformatora pri deystvii na nego perenapryazheniy [Electromagnetic processes in transformer windings influenced by overvoltage]. *Elektricheskie stantsii*, 2014, no. 12, pp. 18–26.

Received: 07 September 2015.

УДК 662.815.4

НИЗКОСОРТНОЕ ТОПЛИВО ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ: ПЕРСПЕКТИВЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Табакаев Роман Борисович,

инженер каф. парогенераторостроения и парогенераторных установок
Энергетического института Национального исследовательского
Томского политехнического университета, Россия, 634050,
г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: TabakaevRB@tpu.ru

Хаустов Сергей Александрович,

ассистент каф. парогенераторостроения и парогенераторных установок
Энергетического института Национального исследовательского
Томского политехнического университета, Россия, 634050,
г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: khaustovSA@tpu.ru

Черкашина Галина Анатольевна,

инженер каф. парогенераторостроения и парогенераторных установок
Энергетического института Национального исследовательского
Томского политехнического университета, Россия, 634050,
г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: cherkashina@tpu.ru

Казakov Александр Владимирович,

канд. техн. наук, доцент каф. парогенераторостроения и парогенераторных
установок Энергетического института Национального исследовательского
Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: kazakov@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью замещения привозных энергоресурсов в топливно-энергетических балансах регионов местными низкосортными топливами.

Цель работы: определение теплотехнических свойств местных топлив Томской области и оценка целесообразности их энергетического использования.

Методы исследования. Теплотехнические характеристики низкосортного топлива определены по стандартным методикам ГОСТ Р 52911–2008, 11022–95 и 6382–2001. Значения теплоты сгорания и элементный состав установлены при помощи бомбового калориметра АБК-1 и анализатора Vario micro cube. Состав минеральной части золы исследован согласно ГОСТ 10538–87. Для оценки эффективности сжигания синтез-газа, полученного низкотемпературной каталитической конверсией сырья, использовалось математическое моделирование. При этом для математического описания протекания реакций горения в трехмерных спутных потоках синтез-газа и воздуха была принята модель неизотермического несжимаемого многокомпонентного газа. Для численного моделирования протекания химических реакций в условиях турбулентного потока применена апробированная EBU-модель Сполдинга. Пульсационные (турбулентные) характеристики потока рассчитывались с использованием широко распространенной двухпараметрической «k-?» модели. Расчет теплообмена излучением производился методом сферических гармоник в первом приближении.

Результаты. Рассмотренные виды низкосортного топлива Томской области в сыром виде из-за высокой величины влажности и зольности мало пригодны для энергетического использования и не способны на данный момент заместить привозной уголь в топливно-энергетическом балансе региона. Перспективным направлением переработки топлив является низкотемпературная каталитическая конверсия, позволяющая получать из исходного твердого сырья синтез-газ, обогащенный водородом. Полученный синтез-газ может эффективно использоваться в энергетике для получения тепла и электроэнергии без дорогостоящей модернизации газового оборудования.

Ключевые слова:

Теплоэнергетика, низкосортное топливо, топливно-энергетический баланс, теплотехнические характеристики, минеральные составляющие, энергетическое использование, теплотехнологическая переработка.

Введение

Современное состояние энергетики, представленное в «Энергетической стратегии России до 2030 года» [1], показывает, что доля привозных энергоресурсов в региональных топливно-энергетических балансах составляет около 45 %. При этом затраты на транспортировку этих ресурсов за-

кладываются в себестоимость продукции, увеличивая конечную цену топлива для энергетических объектов в несколько раз [2–5], что в результате отражается на величине тарифов тепло- и электро-снабжения.

В связи с этим в [1] особое внимание уделяется использованию местных ресурсов низкосортного

топлива (торфа, биомассы, городских бытовых отходов). Для этого предусмотрена модернизация существующих и ввод новых тепловых электростанций и котельных, работающих на таком виде топлива. Реализация указанных мер должна привести к снижению доли привозного топлива в 1,3–1,5 раза.

Эффективное энергетическое использование местных низкосортных топлив требует подробного изучения их теплотехнических характеристик и минеральной составляющей. Эти данные необходимы для выбора способа сжигания и проектирования энергетического оборудования, реализующего выбранный способ.

Целью работы ставится определение теплотехнических свойств местных топлив Томской области и оценка целесообразности их энергетического использования.

Исследуемое сырье

Томская область богата запасами торфа (29,34 млрд т), бурого угля (75,7 млрд т) и древесины (2,7 млрд м³) [6, 7]. Авторами исследованы следующие месторождения низкосортного топлива: торфяные – Суховское, Аркадьевское и Кандинское (рис. 1), бурого угля – Таловское, а также рассмотрены отходы различных древесных пород лесоперерабатывающего комбината «Партнер-Томск».

Месторождения Суховское и Аркадьевское расположены вблизи крупных по меркам Томской области населенных пунктов: Суховское – в 12 км на северо-восток от села Бакчар, Аркадьевское – в 4 км к северо-западу от села Кожевниково. Эти месторождения образованы низинной залежью торфа в зоне осоково-гипновых болот. В период 1986–1995 гг. на месторождениях велась промышленная разработка, для чего рядом с ними были построены высокомеханизированные торфодобывающие предприятия, прекратившие свое существование в конце 90-х гг. [8]. Кандинское месторождение, находящееся в 19 км от города Томска, также сформировано низинной залежью торфа. В настоящее время на месторождении ведется добыча глины и песчано-гравийной смеси, находящейся под слоем торфа. Торф складывается без практического применения.

Таловское месторождение бурого угля находится в 24–50 км на юго-восток от города Томска. Месторождение оценивают как относительно крупное с прогнозными ресурсами угля марки Б1 около 3,6 млрд т (ежегодно добыча может составить 10–15 млн т) [2].

Учитывая особенности естественного восполнения ресурсов низкосортного топлива, географического расположения залежей (удалены от железнодорожного сообщения и крупных транспортных магистралей) и добычи, разработка рассматриваемых месторождений рациональна лишь для нужд объектов малой энергетики, расположенных в относительной близости. Соответственно оценка це-

лесообразности их энергетического использования может осуществляться применительно к объектам малой энергетики, характеризующимся по большей части наличием топливосжигающего оборудования слоевого типа или жаротрубных газовых котлов.

По стандартным методикам ГОСТ Р 52911–2008, 11022–95 и 6382–2001 определены теплотехнические характеристики рассматриваемого сырья (табл. 1). Значения теплоты сгорания и элементный состав установлены при помощи бомбового калориметра АБК-1 и анализатора Vario micro cube.

Таблица 1. Теплотехнические характеристики низкосортных топлив

Table 1. Thermotechnical characteristics of low-grade fuels

Теплотехническая характеристика Thermotechnical characteristic	Торф/Peat			Таловский уголь Talovsky coal	Древесная щепа Wood chip
	Суховской Sukhovskoy	Аркадьевский Arkadyevsky	Кандинский Kandinsky		
Влажность W_i^t , % Humidity W_i^t , %	59,6	38,2	72,8	51,0	45,0
Зольность на рабочую массу A^r , % Ash content per operating weight A^r , %	16,0	19,5	2,5	12,7	0,3
Зольность на сухую массу A^d , % Ash content per dry weight A^d , %	39,5	31,5	9,1	25,9	0,6
Выход летучих веществ V^{daf} , % Volatile yield V^{daf} , %	69,3	71,0	71,6	63,2	91,8
Низшая теплота сгорания Q_i , МДж/кг Low heating value Q_i , MJ/kg	4,2	7,3	3,1	8,6	9,3
Элементный состав на горючую массу, % Elemental composition per combustible mass, %					
C^{daf}	59,95	51,03	57,52	68,38	50,87
H^{daf}	5,98	6,01	5,61	6,28	6,23
N^{daf}	2,69	4,62	2,17	0,62	0,20
S^{daf}	0,09	0,15	0,15	0,44	следы/ traces
O^{daf}	31,29	38,19	34,55	24,28	42,70

Низкосортные топлива характеризуются высоким значением влажности – от 38 до 73 %. Столь высокое значение позволяет предположить, что сжигание рассматриваемых топлив будет сопровождаться большими затратами, связанными с необходимостью испарения влаги. Стоит отметить, что наличие такого количества влаги существенно ограничивает возможность добычи и транспортировки топлив в зимний период, а в теплое время года способствует его слеживанию и слипанию.

По значению зольности исследуемые пробы можно разбить на 2 группы: высокозольные (суховской и аркадьевский торф, таловский уголь) и

малозольные (кандинский торф и щепа) топлива. Химический состав золы, определенный согласно ГОСТ 10538–87, приведен в табл. 2.

Таблица 2. Состав золы

Table 2. Ash composition

Наименование пробы Sample name	Состав золы на бессульфатную массу, % Ash structure per non-sulfate mass, %					
	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃ + +TiO ₂	Fe ₂ O ₃	прочее other
Аркадьевский торф Arkadyevsky peat	33,29	26,14	1,35	5,96	10,86	22,40
Суховской торф Sukhovskoy peat	2,45	36,20	0,24	6,73	11,85	42,53
Кандинский торф Kandinsky peat	17,18	38,21	3,17	8,82	5,14	27,48
Таловский уголь Talovsky coal	46,90	12,00	1,20	26,50	12,20	1,20
Древесная щепа Wood chip	53,35	16,39	0,90	8,27	2,66	18,43

Содержание оксидов кальция (CaO) более 13 % в совокупности с высокой долей оксида кремния (SiO₂) в таких высокозольных топливах, как аркадьевский и кандинский торф, указывает на склонность к образованию плотных золовых отложений на поверхностях нагрева в процессе сжигания. Состав минеральной части таловского угля также позволяет прогнозировать повышенную шлаковую способность. Древесная щепа, несмотря на высокое содержание CaO и SiO₂, не рассматривается как шлакующее топливо из-за низкого значения зольности.

Высокое содержание оксидов алюминия и титана в таловском угле свидетельствует о потенциально высоком абразивном износе образующейся при сжигании золы. Учитывая это и склонность угля к шлакованию, при конструировании топливосжигающего оборудования возникает непростая задача по выбору скорости дымовых газов в конвективных поверхностях нагрева.

Довольно внушительный выход летучих веществ (63,2–91,9 %) говорит о высокой реакционной способности топлив и низкой температуре воспламенения, а также указывает на отсутствие термической стойкости органической части. Это является предпосылками к термической переработке сырья в газообразное топливо.

Установленные значения содержания углерода ($C^{daf}=50,87-68,38\%$) и водорода ($H^{daf}=5,25-6,28\%$) в топливе обуславливают достаточно высокую теплотворность его горючей массы ($Q^{daf}=18,6-27,1$ МДж/кг). Однако высокие значения влажности и зольности сырья приводят к низкому значению теплоты сгорания при пересчете на рабочее состояние, не превышающему 9,3 МДж/кг.

Незначительное содержание серы ($S^{daf}=0,02-0,44\%$) показывает, что вредное воздействие на окружающую среду выбросами окси-

дов серы при сжигании будет минимальным и не потребует дополнительных затрат на их снижение.

Высокое содержание кислорода ($O^{daf}=24,28-42,70\%$) характеризует топливо как находящееся на ранних стадиях метаморфизма и указывает на возможность протекания экзотермических реакций при термической переработке в кондиционные топлива. Это утверждение подтверждается экспериментальными данными, полученными при низкотемпературном пиролизе топлива: условная теплота разложения органической массы составила от 1,24 до 3,69 МДж на 1 кг высушенного исходного топлива [9].

Обобщая результаты, можно заключить, что все исследованные топлива в сыром виде из-за высоких эксплуатационных затрат малопригодны для сжигания в качестве самостоятельного энергетического топлива. Эти затраты обусловлены высокими значениями влажности и зольности сырья, приводящими к низкой величине теплоты сгорания в пересчете на рабочее состояние и необходимости предварительной сушки. Более того, высокая влажность приводит к проблемам слипаемости и смерзаемости сырья при перевозках в зимний период, требуя дополнительных временных и денежных издержек на обогрев транспортных емкостей. Хрупкость и крошимость сырья являются причиной высокой величины провала при слоевом сжигании.

Теплотехнологическая переработка сырья в кондиционные энергетические продукты

Перечисленные недостатки могут быть устранены посредством теплотехнологической переработки сырья в кондиционные энергетические продукты, такие как твердое композитное [9–14], жидкое [15–18] или газообразное топливо [19–23]. Учитывая преимущества энергетического использования газообразного топлива (возможность автоматизации процесса горения, экологичность, отсутствие абразивного износа поверхностей нагрева и высокая интенсификация теплообмена благодаря более высоким допустимым значениям скоростей потока дымовых газов), авторами рассмотрена переработка низкосортного топлива в газообразное.

В качестве варианта такой переработки принят «Способ получения горючего газа, обогащенного водородом» (патент РФ № 2462503), в котором исходное органическое сырье подвергают низкотемпературной каталитической конверсии (рис. 1), получая при этом водородсодержащее газообразное топливо, называемое синтез-газом. За счёт отсутствия воздушного дутья с введением в зону реагирования перегретого пара и оксидов железа достигается повышенная концентрация водорода при низкой забалластированности газов (табл. 3). Низкие температуры основных процессов (300–500 °C) позволяют менее требовательно подходить к выбору материалов для изготовления энергоустановки.

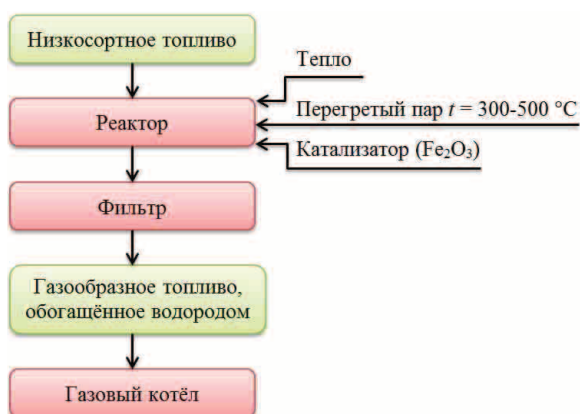


Рис. 1. Схема теплотехнологической переработки низкосортного топлива

Fig. 1. Heat technological processing of low-grade fuel

Таблица 3. Состав синтез-газа, полученного конверсией сукховского торфа при различных температурах [24]

Table 3. Structure of syngas obtained by sukhovskoy peat conversion at different temperatures [24]

Температура конверсии, °C Conversion temperature, °C	Компоненты синтез-газа, % Syngas components, %			
	H ₂	CH ₄	CO	Негорючая часть Mineral matter
300	47,5	13,0	9,0	30,5
350	46,0	20,0	5,0	29,0
400	46,5	25,0	6,5	22,0
450	47,5	27,0	7,5	18,0
500	47,5	27,0	9,0	16,5

Исследование сжигания синтез-газа

Несмотря на то, что в настоящее время синтез-газ имеет высокий потенциал использования в энергетике и промышленности, до сих пор не существует серийно выпускаемого оборудования для его использования. Поэтому при проектировании энергоустановок для сжигания синтез-газа нередко возникают вопросы о применимости существующих единиц газового оборудования, разработанных и широко апробированных для сжигания природного газа. Так, например, актуальной задачей является анализ физико-химических процессов в камерах сгорания при работе на синтез-газе, полученном низкотемпературной каталитической конверсией торфа. В настоящей работе в качестве объекта исследования выбрана типовая цилиндрическая камера горения, укомплектованная современной горелкой Weishaupt WKGL70 исполнения 3LN мощностью 12 МВт [25] (рис. 2).

Меньшая по сравнению с природным газом теплота сгорания синтез-газа (табл. 4) при постоянной мощности горелочного устройства приводит к более высокому расходу топлива через форсунки – 1, тогда как количество воздуха, необходимое для стехиометрического сжигания по причине его забаластированности, значительно ниже (табл. 3), в связи с чем снижается расход через каналы пер-

вичного – 2 и вторичного дутья – 3. Для оценки влияния перечисленных особенностей исследуемого топлива на интенсивность протекания процессов смесеобразования, температуру и габариты факела эффективным инструментом является математическое моделирование.

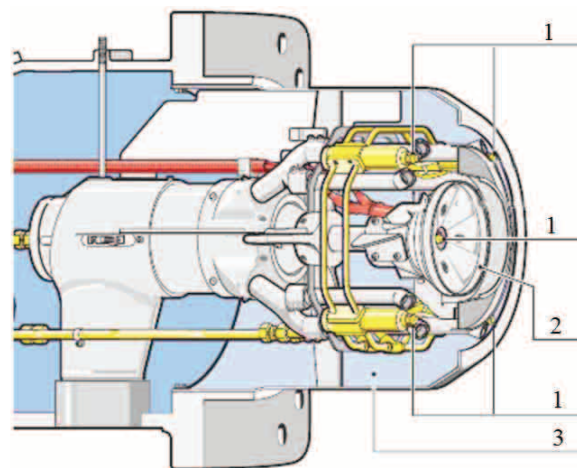


Рис. 2. Конструктивная схема исследуемой горелки [25]: 1 – форсунки подачи синтез-газа; 2 – каналы подачи первичного воздуха; 3 – канал подачи вторичного воздуха

Fig. 2. Structural scheme of the burner [25]: 1 are the nozzles of supplying syngas; 2 are the channels of supplying primary air; 3 is the channel of supplying secondary air

Таблица 4. Сравнительный анализ теплофизических характеристик природного (газопровод Саратов–Москва) и синтез-газов, рассчитанных по [26]

Table 4. Comparative analysis of thermal characteristics of natural (Saratov–Moscow gas pipe line) and syngas, calculated by [26]

Вид топлива Fuel type	Теплота сгорания, МДж/м ³ Combustion heat, MJ/m ³	Объем воздуха для стехиометрического горения, м ³ /м ³ Air volume for stoichiometric combustion, m ³ /m ³	Объем продуктов сгорания на 1 м ³ газа, м ³ /м ³ Combustion products volume per 1 m ³ of gas, m ³ /m ³
Природный газ Natural gas	37,01	9,78	11,29
Синтез-газ syngas	16,00	3,92	4,83

Для математического описания протекания реакций горения в трехмерных спутных потоках синтез-газа и воздуха была принята модель неизотермического несжимаемого многокомпонентного газа. Рассматриваемое течение считалось установившимся, в связи с чем использовались математические модели с уравнениями неразрывности, сохранения массы и энергии, записанные в стационарной постановке. Расчет горения синтез-газа основывался на решении химических уравнений для необратимых реакций между горючими компонентами и кислородом: $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$; $2CO + O_2 = 2CO_2$; $2H_2 + O_2 = 2H_2O$. Для численного моделирования

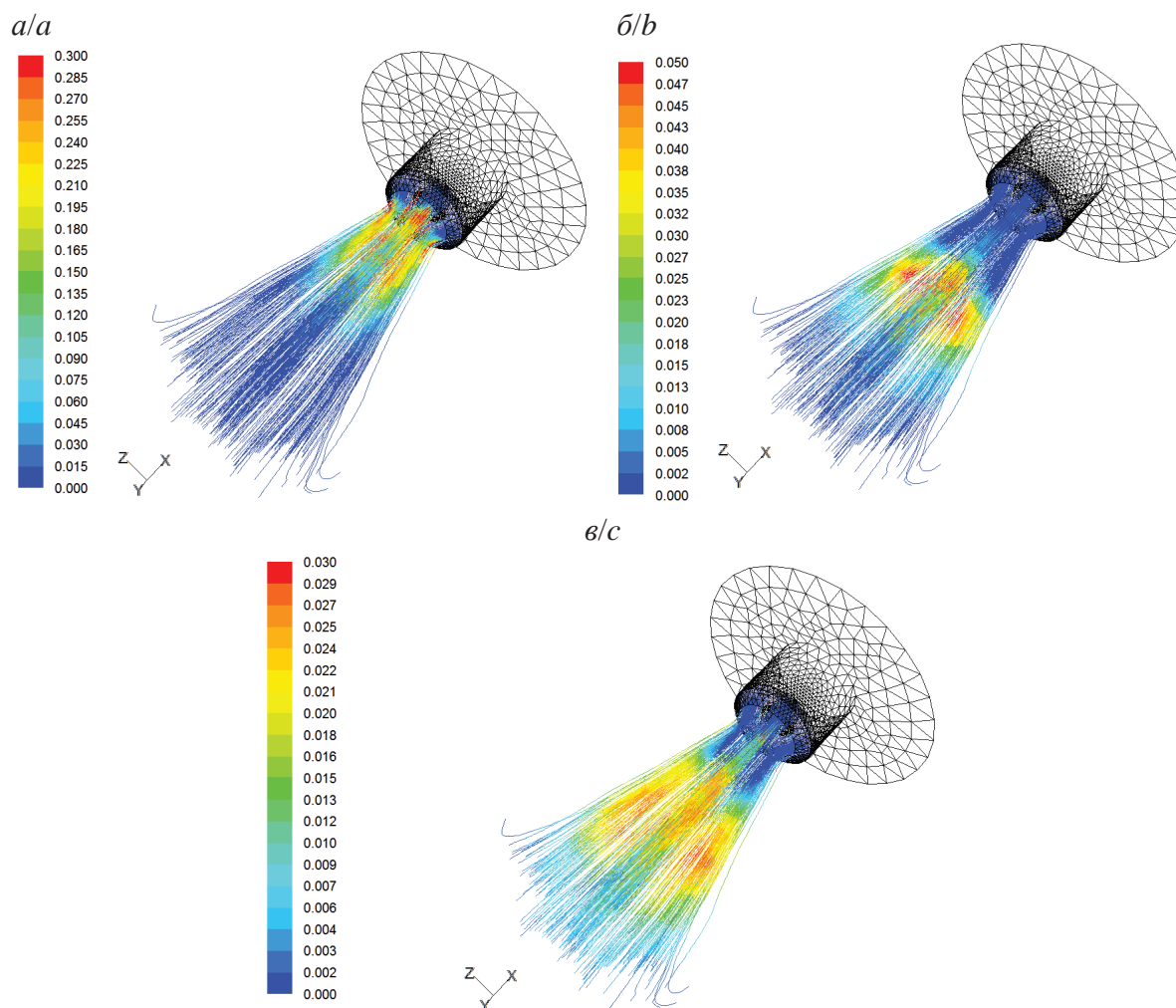


Рис. 3. Линии тока на выходе из горелки (цветовая индексация по скоростям трех одновременно протекающих в газовой смеси реакций): а) цветовая индексация по скорости реакции $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ (кмоль/м³·с); б) цветовая индексация по скорости реакции $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ (кмоль/м³·с); в) цветовая индексация по скорости реакции $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$ (кмоль/м³·с)

Fig. 3. Current lines at the output of the burner (color rate indexing of three simultaneous reactions in gas mixture): а) color reaction rate indexing $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ (kmole/m³·s); б) color reaction rate indexing $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ (kmole/m³·s); в) color reaction rate indexing $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$ (kmole/m³·s)

протекания этих химических реакций в условиях турбулентного потока применялась апробированная ЕВU-модель, предложенная Сполдингом в [27]. Полученные результаты численного эксперимента представлялись в виде усредненных во времени линий тока с цветовой индексацией по тепловыделению, температуре и элементному составу газовой смеси. Пульсационные (турбулентные) характеристики потока рассчитывались с использованием широко распространенной двухпараметрической «*k-ε*» модели. Расчет теплообмена излучением производился методом сферических гармоник в первом приближении.

По результатам численного эксперимента длина факела при сжигании синтез-газа не превышает экспериментальных и расчетных значений, полученных при сжигании природного газа [28]. Выгорание водорода (рис. 3, а) протекает в короткой области в

непосредственной близости от устья горелки, что объясняется низкой энергией активации для реакции его окисления. Так как объемное содержание водорода в синтез-газе составляет около 50 %, то наблюдается более интенсивный рост температуры на выходе из горелки, нежели при сжигании природного газа, где содержание водорода на порядок ниже. Высокие значения температуры газовой смеси (рис. 4) инициируют воспламенение метана (рис. 3, б) и монооксида углерода (рис. 3, в) в непосредственной близости от горелки, но значения скорости протекания реакций их окисления в объеме камеры сгорания ввиду забалластированности горелочной струи в целом ниже аналогичных значений при сжигании природного газа. Следствием описанных факторов является равномерное тепловыделение по всей длине факела, что благоприятно сказывается на надежности работы камеры сгорания.

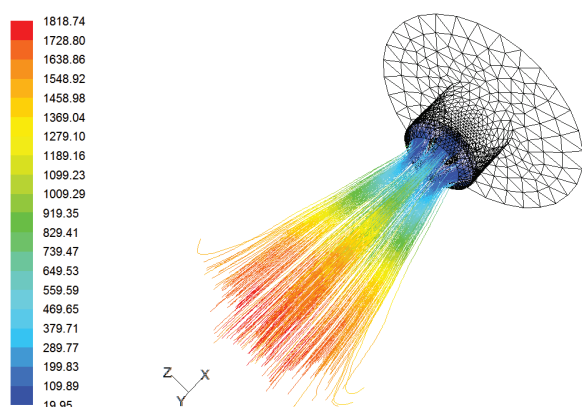


Рис. 4. Линии тока на выходе из горелки с цветовой индексацией по температуре газовой смеси (°C)

Fig. 4. Current lines at the output of the burner with color indexing by the gas mixture temperature (°C)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утв. распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р. – 144 с.
2. Емешев В.Г., Паровинчак М.С. Без привозной энергетики // Нефтегазовая вертикаль. – 2005. – № 17. – С. 63–65.
3. Мяки А.Э. Истинные причины проблем отопления в северных регионах // Топливо-энергетический комплекс. – 2003. – № 2. – С. 95–98.
4. New alternative energy from solid waste plastics / M. Sarker, A.S.M.D. Mohammed, M.M. Rashid, N. Schiralli, A. Zaman, A. Kabir, S. Rahman, K. Islam, M. Molla // ICDRET: Proc. of 1st Intern. Conf. on the Developments in Renewable Energy Technology. – Bangladesh: Dhaka, 2009. – P. 100–103 (Article number 5454177).
5. Lorincz J., Bule I. Renewable energy sources for power supply of base station sites // International Journal of Business Data Communications and Networking. – 2013. – V. 9. – Iss. 3. – P. 53–74.
6. Торфяные ресурсы Томской области и их использование / Л.И. Инишева, В.С. Архипов, С.Г. Маслов, Л.С. Михантьева. – Новосибирск: Изд-во СОРАСХН, 1995. – 88 с.
7. Приложение к Постановлению Государственной Думы Томской области от 28.02.2008 № 1008 «Энергетическая стратегия Томской области на период до 2020 года». URL: <http://lawsrf.ru/region/documents/1547168/> (дата обращения: 07.09.2015).
8. Бернатонис В.К., Бернатонис П.В. Концепция освоения ресурсов торфа в современных экономических условиях (на примере Томской области) // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 1. – С. 161–163.
9. Табакаев Р.Б. Теплотехнология получения твёрдого композитного топлива из низкосортного органического сырья: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2015. – 144 с.
10. Biomass recycling heat technology and energy products / R.B. Tabakaev, P.S. Gergelizhiu, A.V. Kazakov, A.S. Zavorin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – V. 66. – P. 1–4 (012052).
11. Табакаев Р.Б., Казаков А.В., Заворин А.С. Твёрдое композитное топливо из низкосортного сырья (технологический аспект) // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 4. – С. 56–64.
12. Barbara J.W., Tesfayohanes W.Y., Lupita D.M. Evaluation of Solid Fuel Char Briquettes from Human Waste // Environmental

Выводы

- 1) Рассмотренные виды низкосортного топлива Томской области в сыром виде из-за высокой величины влажности и зольности малопригодны для энергетического использования и не способны на данный момент заместить привозной уголь в топливно-энергетическом балансе региона. Перспективным направлением переработки топлив является низкотемпературная каталитическая конверсия, позволяющая получить из исходного твердого сырья синтез-газ, обогащенный водородом.
- 2) Полученный синтез-газ может эффективно использоваться в энергетике для получения тепла и электроэнергии без дорогостоящей модернизации газового оборудования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках госзаданий НИР № 2069 (тема № 2.1322.2014).

- Science and Technology. – 2014. – V. 48. – Iss. 16. – P. 9852–9858.
13. Карманов В.В., Михайлик В.Д., Костюнин Н.Л. Получение топливных гранул, пеллетов, брикетов из отходов растительного сырья // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2011. – Т. 43. – № 4. – С. 128–132.
 14. Топливные брикеты на основе бурого угля с использованием нефтяных шламов в качестве связующего / В.И., Идрисов А.М. Сыроежко, С.В. Дронов, В.М. Страхов, М.О. Гончаров // Кокс и химия. – 2013. – № 12. – С. 34–39.
 15. Aysu T. Catalytic pyrolysis of *Alcea pallida* stems in a fixed-bed reactor for production of liquid bio-fuels // Bioresource Technology. – 2015. – V. 191. – P. 253–262.
 16. High energy density bio-oil via slow pyrolysis of *Jatropha curcas* shells / P. Das, M. Dinda, N. Gosai, S. Maiti // Energy and Fuels. – 2015. – V. 29. – Iss. 7. – P. 4311–4320.
 17. Promdee K., Vitidsant T. Synthesis of char, bio-oil and gases using a screw feeder pyrolysis reactor // Coke and chemistry. – 2013. – V. 56. – Iss. 12. – P. 466–469.
 18. Получение и исследование жидких биотоплив из биомассы дерева методом пиролиза / К.В. Куликов, В.В. Литвинов, В.Н. Пиялкин, С.А. Забелин, В.Н. Башкиров // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – № 13. – С. 197–200.
 19. Low-temperature conversion of low-grade organic raw. P. 1. Technical aspects / A.V. Kazakov, R.B. Tabakaev, P.Y. Novoseltsev, A.V. Astafev // MATEC Web of Conferences. – 2014. – V. 19. – P. 1–4 (article number 01014).
 20. Анализ зависимости выхода и состава газообразных продуктов пиролиза различных видов органического сырья / В.Г. Систер, А.С. Холманский, В.Г. Чирков, Е.Ю. Сорокина, Е.М. Иванникова // Химическая технология. – 2011. – № 4. – С. 222–226.
 21. Тимофеева С.С., Мингалеева Г.Р. Перспективы использования торфа в региональной энергетике // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 4. – С. 46–55.
 22. Experimental and modeling study of pinewood char gasification with CO₂ / I. Sircar, A. Sane, W., Wang J.P. Gore // Fuel. – 2014. – V. 119. – P. 38–46.
 23. Кузнецов Г.В., Кулеш Р.Н., Полсонграм М. Повышение эффективности термической конверсии древесной биомассы // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 22–25.

24. Казаков А.В. Термическая конверсия низкосортных топлив применительно к газогенерирующим установкам: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2002. – 159 с.
25. Weishaupt WKGL70 dual fuel burner Version 3LN <http://www.il.weishaupt.de/local/documentBase/en/2046-GB-12-04.pdf> (дата обращения: 05.09.2015).
26. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
27. Spalding D.B. Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames // Proc. Combust. Inst. – 1971. – V. 13. – P. 649–657.
28. Хаустов С.А., Заворин А.С. Дальнейшая факела в жаровых трубах котлов // Промышленная энергетика. – 2014. – № 10. – С. 16–20.

Поступила 07.09.2015 г.

UDC 662.815.4

LOW-GRADE FUELS OF TOMSK REGION: PROSPECTS FOR ENERGY USE

Roman B. Tabakaev,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: TabakaevRB@tpu.ru

Sergey A. Khaustov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: khaustovSA@tpu.ru

Galina. A. Cherkashina,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: cherkashina@tpu.ru

Alexander V. Kazakov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: kazakov@tpu.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the need to substitute the imported energy resources by local low-grade fuels in the regional fuel-energy balances.

The main aim of the study is to determine thermal properties of local fuels in Tomsk region and evaluate their energy use viability.

The methods used in the study. Thermotechnical characteristics of low-grade fuels were determined by standard methods GOST R 52911–2008, 11022–95 and 6382–2001. Calorific value and elemental composition were studied using a bomb calorimeter ABK-1 and Vario micro cube analyzer. The composition of the mineral ash was investigated in accordance with GOST 10538–87. To study the combustion efficiency of syngas produced by low temperature catalytic raw conversion the authors have applied the mathematical modeling. Three-dimensional cocurrent flows of syngas and air were considered with non-isothermal incompressible multicomponent gas model in order to describe combustion mathematically. For numerical simulation of chemical reactions under turbulent flow conditions the authors applied the proven Spalding's EBU-model. The pulsation (turbulent) flow characteristics were calculated using a widespread two-parameter «k-?» model. Calculation of radiation heat-exchange was produced by spherical harmonics approach in the first approximation.

The results. The discussed low-grade fuels of Tomsk region in untreated form are not able to replace imported coal in regional energy balance, because of the high moisture and ash content values. The promising direction of low-temperature fuel processing is a catalytic conversion, which allows receiving hydrogen-enriched syngas from the initial solid raw. Obtained syngas can be used effectively in the power industry to produce heat and electricity without expensive upgrades of gas equipment.

Key words:

Thermal engineering, low-grade fuel, fuel-energy balance, thermotechnical characteristics, mineral components, energy use, heat-technology recycling.

The research was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within R&D state tasks no. 2069 (topic no. 2.1322.2014).

REFERENCES

1. *Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda. Utv. rasporyazheniem Pravitelstva RF of 13 November 2009 № 1715-r* [Energy strategy of Russia till 2030. Approved by the Government of the Russian Federation from 13 November 2009. No. 1715-r]. 144 p.
2. Emeshev V.G., Parovinchak M.S. Bez privoznoy energetiki [Without imported energy sector]. *Neftegazovaya vertikal*, 2008, no. 17, pp. 63–65.
3. Myaki A.E. Istinnye prichiny problem otopeniya v severnykh regionakh [The true causes of the problems with heating in the northern regions]. *Toplivno-energeticheskiy kompleks*, 2003, no. 2, pp. 95–98.
4. Sarker M., Mohammed A.S.M.D., Rashid M.M., Schiralli N., Zaman A., Kabir A., Rahman S., Islam K., Molla M. New alternative energy from solid waste plastics. *ICDRET: Proc. of 1st Intern. Conf. on the Developments in Renewable Energy Technology*. Bangladesh, Dhaka, 2009. pp. 100–103 (article number 5454177).
5. Lorincz J., Bule I. Renewable energy sources for power supply of base station sites. *International Journal of Business Data Communications and Networking*, 2013, vol. 9, Iss. 3, pp. 53–74.
6. Inisheva L.I., Arkhipov V.S., Maslov S.G., Mikhanteva L.S. *Torfyanye resursy Tomskoy oblasti i ikh ispolzovanie* [Peat Resources of Tomsk region and their usage]. Novosibirsk, SORASKhN Press, 1995. 88 p.
7. *Prilozhenie k Postanovleniyu Gosudarstvennoy Dumy Tomskoy oblasti ot 28.02.2008 no. 1008 «Energeticheskaya strategiya Tomskoy oblasti na period do 2020 goda»* [Appendix to the Decision of the Tomsk State Duma of 28.02.2008 no. 1008 «Energy strategy of Tomsk region till 2020»]. Available at: <http://lawsrf.ru/region/documents/1547168/> (accessed 07.09.2015).
8. Bernatonis V.K., Bernatonis P.V. Kontseptsiya osvoeniya resursov torfa v sovremennykh ekonomicheskikh usloviyakh (na primere Tomskoy oblasti) [The concept of peat resources development with the current economic conditions (for example the Tomsk region)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2003, vol. 316, no. 2, pp. 95–98.
9. Tabakaev R.B. *Teplotekhnologiya polucheniya tverdogo kompozitnogo topliva iz nizkosortnogo organicheskogo syrya*. Dis. Kand. nauk [Heat technology of obtaining composite solid fuel from low-grade organic materials. Cand. Diss.]. Tomsk, 2015. 144 p.
10. Tabakaev R.B., Gergelizhiu P.S., Kazakov A.V., Zavorin A.S. Biomass recycling heat technology and energy products. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66, pp. 1–4 (012052).
11. Tabakaev R.B., Kazakov A.V., Zavorin A.S. Tverdoe kompozitnoe toplivo iz nizkosortnogo syrya (tehnologicheskii aspekt) [Solid composite fuel from low-grade raw materials (technological aspect)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 56–64.
12. Barbara J.W., Tesfayohanes W.Y., Lupita D.M. Evaluation of Solid Fuel Char Briquettes from Human Waste. *Environmental Science and Technology*, 2014, vol. 48, Iss. 16, pp. 9852–9858.
13. Karmanov V.V., Mikhaylik V.D., Kostyunin N.L. Poluchenie toplivnykh granul, pelletov, briketov iz otkhodov rastitelnogo syrya [Production of fuel pellets, wood pellets, briquettes from waste vegetable raw materials]. *Vestnik Khersonskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 13, pp. 197–200.
14. Idrisov V.I., Syroezhko A.M., Dronov S.V., Strakhov V.M., Goncharov M.O. Toplivnye briкеты na osnove burogo uglya s ispolzovaniem neftyanykh shlamov v kachestve svyazuyushchego [Fuel briquettes based on lignite with oil sludge as a binder]. *Coke and Chemistry*, 2013, no. 12, pp. 34–39.
15. Aysu T. Catalytic pyrolysis of *Alcea pallida* stems in a fixed-bed reactor for production of liquid bio-fuels. *Bioresource Technology*, 2015, vol. 191, pp. 253–262.
16. Das P., Dinda M., Gosai N., Maiti S. High energy density bio-oil via slow pyrolysis of *Jatropha curcas* shells. *Energy and Fuels*, 2015, vol. 29, Iss. 7, pp. 4311–4320.
17. Promdee K., Vitidsant T. Synthesis of char, bio-oil and gases using a screw feeder pyrolysis reactor. *Coke and chemistry*, 2013, vol. 56, Iss. 12, pp. 466–469.
18. Kulikov K.V., Litvinov V.V., Piyalkin V.N., Zabelkin S.A., Bashkirov V.N. Poluchenie i issledovanie zhidkikh biotopliv iz biomassy dereva metodom piroliza [Production and research of liquid biofuels from wood biomass by pyrolysis]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2012, vol. 15, no. 13, pp. 197–200.
19. Kazakov A.V., Tabakaev R.B., Novoseltsev P.Y., Astafev A.V. Low-temperature conversion of low-grade organic raw, part 1 (technical aspects). *MATEC Web of Conferences*, 2014, vol. 19, pp. 1–4 (article number 01014).
20. Sister V.G., Kholmanskiy A.S., Chirkov V.G., Sorokina E.Yu., Ivannikova E.M. Analiz zavisimosti vykhoda i sostava gazoobraznykh produktov piroliza razlichnykh vidov organicheskogo syrya [Analysis of the dependence of the yield and composition of the gaseous products of pyrolysis of different types of organic materials]. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2011, no. 4, pp. 222–226.
21. Timofeeva S.S., Mingaleeva G.R. Perspektivy ispolzovaniya torfa v regionalnoy energetike [Perspectives of using peat in regional energy]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 46–55.
22. Sircar I., Sane A., Wang W., Gore J.P. Experimental and modeling study of pinewood char gasification with CO₂. *Fuel*, 2014, vol. 119, pp. 38–46.
23. Kuznetsov G.V., Kulesh R.N., Polsongkram M. Povyshenie effektivnosti termicheskoy konversii drevesnoy biomassy [Improving the efficiency of the thermal conversion of woody biomass]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 4, pp. 22–25.
24. Kazakov A.V. *Termicheskaya konversiya nizkosortnykh topliv primenitelno k gazogeneriruyushchim ustanovkam*. Dis. Kand. nauk [Thermal conversion of low-grade fuels in relation to gas-generating plants. Cand. Diss.]. Tomsk, 2002. 159 p.
25. Weishaupt WKGL70 dual fuel burner Version 3LN. Available at: <http://www.il.weishaupt.de/local/documentBase/en/2046-GB-12-04.pdf> (accessed 05 September 2015).
26. *Teplivoy raschet kotlov (Normativnyy metod)* [Boiler thermal design (Standard approach)]. St-Petersburg, NPO TsKTI Press, 1998. 256 p.
27. Spalding D.B. Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames. *Proc. Combust. Inst.*, 1971, vol. 13, pp. 649–657.
28. Khaustov S.A., Zavorin A.S. Dalnoboynost fakela v zharovykh trubakh kotlov [Flame range in boiler fire tubes]. *Promyshlennaya energetika*, 2014, no. 10, pp. 16–20.

Received: 07 September 2015.

УДК 546.82:546.74:54–19:546.28:66.088:620.193

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НИКЕЛИДА ТИТАНА КРЕМНИЕМ В УСЛОВИЯХ ПЛАЗМЕННО-ИММЕРСИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ЕГО КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ В ХЛОРИДСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ

Коршунов Андрей Владимирович,

д-р хим. наук, профессор кафедры общей и неорганической химии
Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического
университета, Россия, 634050 г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: korshunov@tpu.ru

Лотков Александр Иванович,

д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией материаловедения сплавов с памятью формы,
зам. директора по научной работе Института физики прочности и материаловедения СО РАН,
Россия, 634055 г. Томск, пр. Академический, 2/4. E-mail: lotkov@ispms.tsc.ru

Кашин Олег Александрович,

д-р техн. наук, ведущ. науч. сотр. лаборатории материаловедения сплавов
с памятью формы Института физики прочности и материаловедения СО РАН,
Россия, 634055 г. Томск, пр. Академический, 2/4.
E-mail: okashin@ispms.tsc.ru

Абрамова Полина Владимировна,

ассистент кафедры общей и неорганической химии Института физики высоких технологий
Национального исследовательского Томского политехнического университета,
Россия, 634050 г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: polya.bozhko@yandex.ru

Борисов Дмитрий Петрович,

канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории наноструктурированных поверхностей и покрытий
Национального исследовательского Томского государственного университета,
Россия, 634050 г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: borengin@mail.ru

Актуальность работы определяется необходимостью поиска оптимальных методов повышения коррозионной стойкости сплавов с памятью формы на основе никелида титана в хлоридсодержащих средах. Высокая прочность TiNi в сочетании с пластичностью и коррозионной стойкостью обуславливают перспективы применения сплава в условиях циклических механических и термических воздействий (добыча и переработка минерального сырья, машиностроение, медицина), поэтому процессы окисления и коррозии никелида титана в хлоридсодержащих растворах (морская вода, биологические среды) являются предметом интенсивного изучения в физикохимии современных металлических материалов.

Цель работы: изучить электрохимическое поведение и коррозионную стойкость никелида титана, модифицированного кремнием, в хлоридсодержащих растворах.

Методы исследования: плазменно-иммерсионное ионное модифицирование поверхности сплава ионами кремния, профилометрия, Оже-спектроскопия, оптическая микроскопия, растровая и просвечивающая электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ, рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ, циклическая вольтамперометрия.

Результаты. Установлено, что в результате плазменно-иммерсионной обработки поверхности TiNi ионами кремния формируются кремнийсодержащие слои толщиной до 80 нм с максимальным содержанием Si до 50 ат. % на глубине 5...6 нм, а также кремниевые покрытия толщиной до 300 нм. Обработка сплава в плазме способствует снижению шероховатости поверхности, приводит к формированию устойчивых к воздействию растворов оксидных (TiO₂, SiO₂) плёнок и промежуточного слоя (аморфный Si, твердый раствор Si в TiNi, Ti₂Ni и Ti₃Ni₄) с пониженным, по сравнению с объемом сплава, содержанием Ni. Сплошные однородные кремнийсодержащие слои на поверхности никелида титана устойчивы к коррозионному разрушению при высоких положительных потенциалах в хлоридсодержащих средах (0,9 % NaCl) вследствие формирования защитных пассивирующих слоев. Величина потенциала пробоя сплава с модифицированной поверхностью зависит от характера распределения кремния и никеля в поверхностных слоях и достигает 0,9–1,5 В (нас. х.с.э.) для образцов с кремнийсодержащим поверхностным слоем с пониженным содержанием никеля. Сплошные, однородные по содержанию Si слои устойчивы к коррозионному разрушению; неоднородные по содержанию Si слои не предотвращают питтингообразование при высоких положительных потенциалах вследствие локального селективного выделения никеля из поверхностного слоя сплава в раствор. Показано сходство электрохимического поведения и морфологических особенностей поверхности после анодного окисления при высоких положительных потенциалах для TiNi, модифицированного в условиях плазменно-иммерсионной и ионно-лучевой обработки.

Ключевые слова:

Никелид титана, плазменно-иммерсионное ионное модифицирование, поверхностные кремнийсодержащие слои, искусственные биологические среды, циклическая вольтамперометрия, коррозионная стойкость.

Введение

Использование никелида титана и сплавов на его основе для производства изделий, подвергающихся циклическим механическим и термическим воздействиям (добывающие и перерабатывающие отрасли промышленности, машиностроение, медицина) обусловлено уникальными прочностными и пластическими характеристиками таких материалов, наличием у них эффекта памяти формы [1–4]. Для снижения коррозионного разрушения сплава и селективного выделения никеля из TiNi при контакте с окружающей средой [5–8] поверхность изделий из него обрабатывают с использованием механических, химических, электрохимических, термических, ионно-лучевых и др. методов, сущность которых заключается в снижении содержания никеля в поверхностных слоях материала и формировании коррозионно-устойчивых биосовместимых покрытий [9–15]. Механические методы обработки поверхности не позволяют сформировать устойчивые поверхностные слои: потенциал пробоя (питтингообразования) E_p механически обработанного сплава принимает относительно низкие значения ($E_p \approx -0,1 \dots -0,5$ В, нас. х.с.э.), что свидетельствует о низкой коррозионной стойкости материала [5]. Использование химических и электрохимических методов обработки позволяет получить защитные поверхностные слои и повысить E_p до $0,8 \dots 1,3$ В [9–15]. Вместе с тем такие пассивирующие слои зачастую имеют пониженную устойчивость в условиях циклических термических и механических воздействий и не предотвращают коррозионное разрушение материала [16, 17].

Наиболее перспективными методами защиты TiNi от коррозии в хлоридсодержащих средах являются ионно-лучевые и плазменно-иммерсионные методы обработки поверхности сплава в сочетании с химическим травлением и электрополированием [18–25]. Модифицирование поверхности сплава неметаллами В, С, N, O приводит к формированию тонких (30...70 нм) слоев с повышенной микротвердостью и высокой коррозионной стойкостью ($E_p \approx 1,0 \dots 1,2$ В) [18–22]. Ионно-лучевая обработка TiNi в пучках Si, Ti, Zr, Hf, Mo в сочетании с химическими и электрохимическими методами позволяет не только повысить коррозионную стойкость, но и существенно улучшить биосовместимость сплава [23–25].

Коррозионная стойкость и биосовместимость TiNi при применении его в медицине определяется условиями формирования модифицированных слоев, элементом-модификатором и структурно-фазовыми характеристиками поверхностных слоев. Например, имплантация ионами азота приводит к формированию в поверхностных слоях сплава тонкого слоя нитрида TiN, существенно повышающего микротвердость (в ≈ 2 раза), коррозионную стойкость в искусственной плазме крови ($E_p = 1,1$ В), пролиферацию клеток остеобластов

[19–21]. Плазменно-иммерсионная обработка TiNi ионами кислорода [18] в объемной плазме способствует существенному снижению содержания никеля (до 1,6...7 ат. %) в слоях глубиной до 10 нм, формированию поверхностного слоя TiO₂ толщиной 50...80 нм, улучшает биосовместимость сплава. Напротив, обработка в плазме He в аналогичных условиях [18] (гелий не образует твердых растворов и соединений с металлами) приводит к образованию пористого поверхностного слоя, что понижает механическую прочность и ухудшает гемосовместимость сплава.

Необходимо отметить, что коррозионная устойчивость TiNi с модифицированными поверхностными слоями исследована недостаточно. В связи с этим целью настоящей работы являлось определение электрохимических и коррозионных характеристик никелида титана, модифицированного кремнием, в хлоридсодержащих растворах.

Материалы и методы исследования

В работе использовали образцы технически чистого TiNi (Ti_{49,1}Ni_{50,9}) в виде пластинок 50?10?1 мм. Поверхность образцов обрабатывали при помощи механического шлифования с применением наждачной бумаги с убывающим размером зерна абразива; химического травления в смеси кислот HNO₃ (65 мас. %): HF (50 мас. %) = 3:1 объёмных частей (об.ч.), а затем электролитического полирования в смеси кислот CH₃COOH (97 %): HClO₃ (70 %) = 3:1 об.ч. при $U = 30$ В. Обработанные образцы закрепляли в держателях (рамках) и размещали на рабочем столе вакуумно-плазменного комплекса «СПРУТ», разработанного и изготовленного в Томском государственном университете. Структурная схема установки плазменно-иммерсионной ионной модификации (ПИИМ) представлена на рис. 1. Технологические режимы обработки сплава приведены в таблице.

Установка ПИИМ состоит из вакуумной камеры – 1, в которой размещены два плазмотрона – 3, четыре магнетрона – 6 и два электродуговых испарителя – 7 (рис. 1). Для обработки образцов использовали четыре несбалансированных магнетрона, имеющих катоды из чистого Si, и один плазмотрон, который имеет распределённый термоэмиссионный катод для генерации газоразрядной плазмы аргона высокой чистоты (99,99 %). Величину неоднородности распределения генерируемой газоразрядной плазмы в рабочем объёме вакуумной камеры измеряли с использованием подвижного зонда Лэнгмюра, она составила ± 4 % от среднего значения. На начальной стадии проводили очистку поверхности образцов с использованием аргоновой плазмы. На образцы подавали постоянное или импульсное отрицательное напряжение смещения с частотой до 50 кГц и со ступенчатым возрастанием амплитуды от 50 до 1000 В. Очистка происходила путем бомбардировки поверхности сплава ионами аргона, приводящей к распылению поверхностных слоев.

Таблица. Режимы плазменно-иммерсионной обработки поверхности TiNi

Table. Modes of plasma-immersion treatment of TiNi surface

Условное обозначение образцов Sample symbol	Краткое описание режима обработки образцов Brief description of sample processing conditions	Примечание Note
00	Механическое шлифование Mechanical grinding	МШ (MG)
0	Электролитическое полирование Electropolishing	ЭП (EP)
17	Электрополирование+ обработка в плазме Ar Ar Electropolishing+ processing in Ar plasma	
18		Сплошное Si-покрытие толщиной до 300 нм Continuous Si-coating with thickness up to 300 nm
20	Электрополирование+ обработка в плазме Si Electropolishing+ processing in Si plasma	Однородный по составу кремнийсодержащий поверхностный слой Homogeneous in composition silicon-containing surface layer
21		Неоднородный по составу кремнийсодержащий поверхностный слой Inhomogeneous in composition silicon-containing surface layer

Морфологию, состав и структуру полученных образцов исследовали с применением профилометрии (New-View 5000), Оже-спектрометрии (Шхуна-2), оптической микроскопии (Axiovert 200 MAT), растровой и просвечивающей электронной микроскопии (Philips SEM-150 с EDS-анализатором, ЭМ-125 К), рентгенофазового и рентгеноструктурного анализа (Shimadzu XRD 6000).

Электрохимические характеристики образцов металлов и сплавов исследовали с использованием импульсного потенциостата/гальваностата ПИ-50-1.1 с программатором напряжения ПР-8 и компенсационным двухкоординатным потенциометром НЗ07/1 в приведенных выше растворах при естественной аэрации или деаэрированных путем барботирования азота высокой чистоты. Площадь рабочей поверхности электрода составляла 1–2 см². Электродом сравнения являлся насыщенный хлорсеребряный электрод (нас. х.с.э.), вспомогательным служил графитовый электрод с площадью поверхности ~20 см². Объем электролита в ячейке составлял 80 мл. Поверхность образцов металла/сплава предварительно обрабатывали ацетоном, этиловым спиртом, а затем промывали дистиллированной водой. Электролитами являлись физиологический раствор 0,9 % NaCl, искусственная плазма крови (NaCl – 6,8; NaHCO₃ – 2,2; NaH₂PO₄ – 0,026; Na₂HPO₄ – 0,126; NaH₂PO₄ –

0,026; KCl – 0,4; CaCl₂ – 0,2; MgSO₄ – 0,1 г/л) [26]. Растворы готовили из реагентов «х.ч.» и «ч.д.а.» без дополнительной очистки с использованием дистиллированной воды.

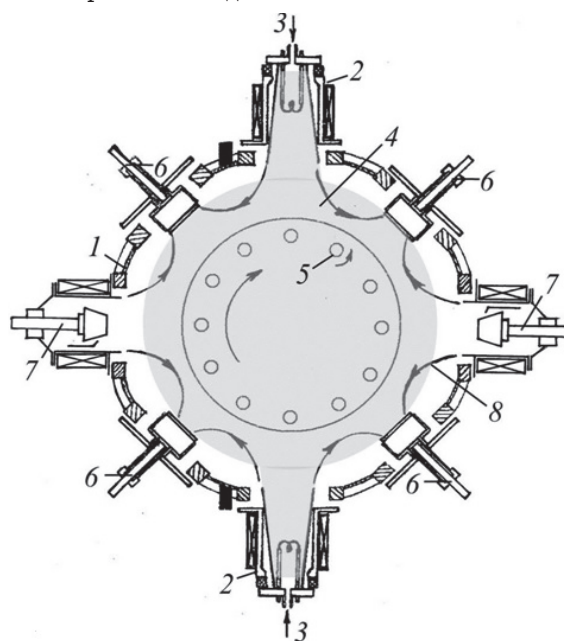


Рис. 1. Структурная схема установки плазменно-иммерсионного ионного модифицирования: 1 – вакуумная камера; 2 – катодные узлы генератора газоразрядной плазмы; 3 – напуск рабочего газа; 4 – объёмная плазма; 5 – обрабатываемые изделия; 6 – магнетронно-распылительные системы; 7 – электродуговые испарители; 8 – линии замкнутого магнитного поля

Fig. 1. Block diagram of the device for plasma-immersion ion implantation: 1 is the vacuum chamber; 2 is the cathode assemblies of gas-discharge plasma generator; 3 is the working gas puffing; 4 is the volume plasma; 5 are the workpieces; 6 are the magnetron-spraying systems; 7 are the arc-jet evaporators; 8 are the lines of closed magnetic field

Определение параметров электродных процессов: стационарный (коррозионный) потенциал $E_{ст}$, потенциал пробоя (питтингообразования) $E_{п}$ и потенциал репассивации $E_{ре}$, а также ток коррозии $I_{кор}$ проводили по стандартным методикам [26]. Сущность методик заключается в графическом определении значений параметров электродных процессов в полулогарифмических координатах $E=f(\lg I)$ по вольтамперограммам, полученным в условиях потенциостатической и потенциодинамической поляризации. Средние величины $E_{кор}$, $E_{п}$ и $E_{ре}$ определяли по результатам коррозионных измерений трех идентично подготовленных образцов каждой партии.

Результаты и их обсуждение

По данным профилометрии морфология поверхности механически шлифованных образцов TiNi (образцы 00, таблица) зависит от нагрузки при шлифовании, параметр шероховатости изменяется в широких пределах. Для электролитически полированных (ЭП) образцов (образцы 0, та-

блица) характерно чередование выпуклых и вогнутых участков при средних расстояниях 5...10 мкм. При этом параметр шероховатости составляет 0,5...0,3. В соответствии с данными рентгенофазового анализа исследуемые образцы TiNi состоят в основном из кубической B2-фазы (тип CsCl) с примесями (менее 10 об. %) фаз Ti₂Ni и Ti₃Ni₄.

Для механически полированных образцов соотношение элементов Ti: Ni в поверхностном слое близко к эквиаtomному, содержание кислорода в оксидном слое определяется условиями обработки и хранения образцов: после шлифования содержание кислорода уменьшается от 50 до 10 ат. % на глубине 8...10 нм. Химическое травление и электрополирование приводят к изменению соотношения элементов в поверхностном слое: содержание титана возрастает на глубине 80...100 нм вследствие селективного удаления Ni. При этом основным компонентом поверхностного оксидного слоя толщиной ≈20 нм является TiO₂.

Обработка поверхности TiNi в плазме аргона (образец 17, таблица) приводит к удалению поверхностного оксидного слоя, сформированного после ЭП. Из анализа результатов Оже-спектроскопии следует, что в этих условиях происходит стравливание поверхностного слоя толщиной ~7 нм. После такой обработки фазовый состав поверхностного слоя образцов практически не изменяется, характерна релаксация остаточных напряжений в поверхностных слоях, сформированных за счет предварительной механической обработки поверхности.

Плазменно-иммерсионная обработка ионами кремния по режиму 18 (таблица) приводит к фор-

мированию кремниевого покрытия толщиной до 300 нм (рис. 2). Между покрытием и основным объемом материала имеется переходный слой толщиной до 100 нм, в котором по глубине уменьшается содержание Si и возрастает содержание Ni и Ti. В поверхностном слое наряду с B2-фазой зафиксирован твердый раствор Si в B2-фазе на глубине до 1 мкм, а также кубическая фаза SiO₂.

При обработке TiNi в плазме Si в условиях режима 20 (таблица) сплошное покрытие из кремния не формируется, распределение элементов в поверхностном слое приведено на рис. 2. Особенность химического состава поверхностного слоя заключается в том, что кремний в основном распределен до глубины 80 нм: на поверхности концентрация составляет около 20 ат. %, максимальная его концентрация (около 50 ат. %) достигается на глубине 5...6 нм (рис. 2). Микроструктура и фазовый состав поверхностного слоя аналогичны образцу 18. В отличие от образца 20, для образца 21 характерно формирование поверхностного кремнийсодержащего слоя толщиной до 80 нм с неравномерным (островковым) распределением Si.

В соответствии с результатами циклической вольтамперометрии (ЦВА), образец 17, поверхность которого подвергали предварительной очистке в плазме аргона, обладает наименьшей коррозионной стойкостью в искусственных биологических средах по сравнению с образцами 18 и 20, на поверхности которых сформирован кремнийсодержащий слой (рис. 3). Область пассивного состояния достаточно узкая и находится в интервале потенциалов -0,4...0,2 В. Начало процесса анодного окисления наблюдается при E=0,2 В.

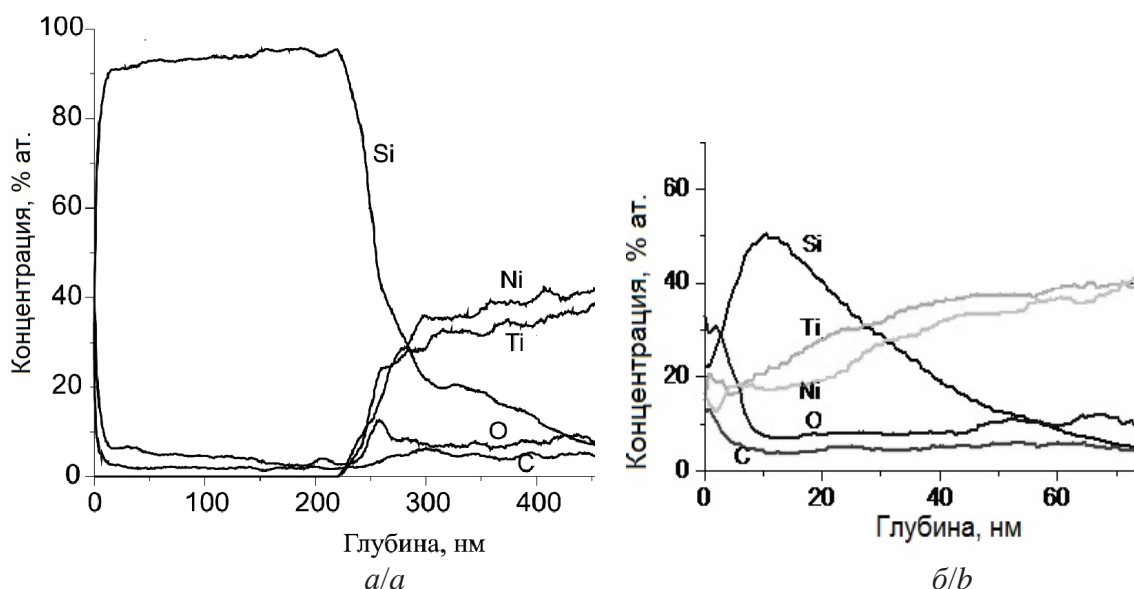


Рис. 2. Концентрационные профили элементов в поверхностном слое образцов TiNi после плазменно-иммерсионной обработки, по данным Оже-спектроскопии: а) формирование Si-покрытия в объемной плазме (образец 18); б) формирование поверхностного кремнийсодержащего слоя в объемной плазме (образец 20)

Fig. 2. Concentration profiles of elements in surface layer of TiNi samples after plasma-immersion treatment, by the data of Auger-spectrometry: а) formation of Si-coating in volume plasma (sample 18); б) formation of surface silicon-containing layer in volume plasma (sample 20)

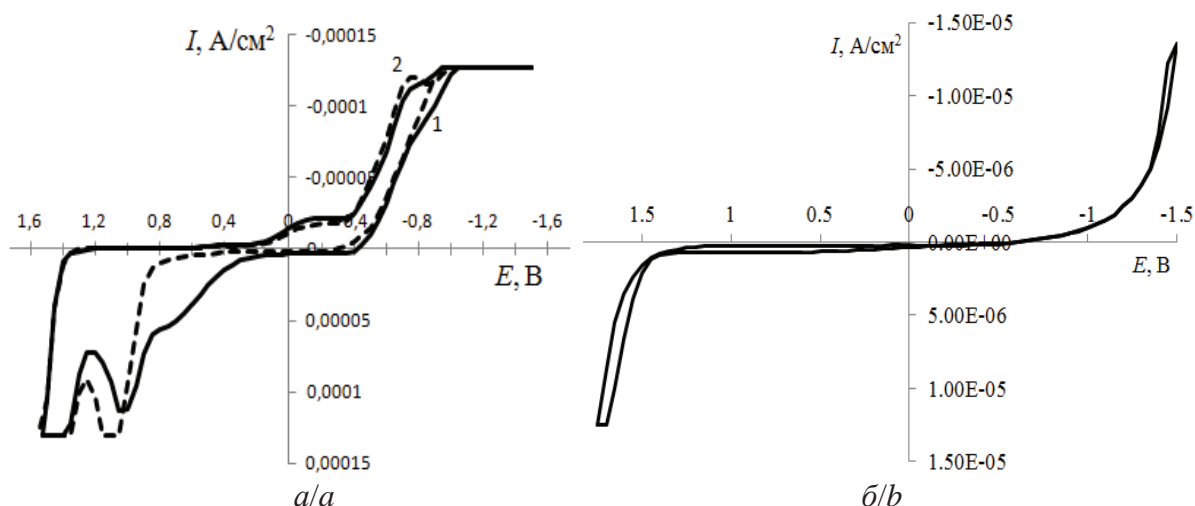


Рис. 3. Вольтамперограммы образцов TiNi 17 (а) и 18 (б) в физрастворе (1, 2 – циклы без обновления поверхности электрода; атмосфера воздуха, $E_{\text{н}} = -1,6 \text{ В}$, $w = 10 \text{ мВ/с}$)

Fig. 3. Volt-ampereograms of TiNi samples 17 (a) and 18 (b) in normal saline (1, 2, are the cycles without electrode surface-renewal; air, $E_{\text{н}} = -1,6 \text{ V}$, $w = 10 \text{ mV/s}$)

При $E = 1,0 \text{ В}$ на вольтамперограммах присутствует максимум анодного тока растворения никеля из поверхностного слоя сплава, а при $E = -0,8 \text{ В}$ – максимум катодного тока восстановления окисленных форм (оксидно-гидроксидных слоев, ионов) никеля. На катодном участке ЦВА в интервале значений E от $0,1$ до $-0,4 \text{ В}$ зафиксирована размытая волна, соответствующая восстановлению кислорода (рис. 3). Полученные электрохимические данные подтверждаются результатами Оже-спектроскопии, в соответствии с которыми обработка ЭП TiNi в плазме Ag приводит к удалению поверхностного оксидного слоя и, как следствие, к значительному увеличению доли никеля в поверхностных слоях, окислительно-восстановительные процессы с участием которого проявляются на ЦВА.

Электрохимические исследования образца 18, на поверхности которого в ходе ПИИМ сформировано кремниевое покрытие толщиной $\approx 300 \text{ нм}$, показали, что электрод обладает наибольшей коррозионной стойкостью в физрастворе по сравнению с образцами, обработанными при других режимах ПИИМ. В соответствии с данными ЦВА (рис. 3), область пассивного состояния образца сохраняется в широком интервале значений E от $-0,5$ до $1,5 \text{ В}$ после многократного циклического наложения потенциалов, что свидетельствует о высокой коррозионной стойкости образца в хлоридсодержащей среде. При $E > 1,5 \text{ В}$ протекают процессы интенсивного окисления с участием компонентов среды раствора. Участие никеля в электродных процессах, как это наблюдалось для образца 17, для образца 18 не зафиксировано (рис. 3).

В соответствии с данными ЦВА для образца 20 интервал потенциалов пассивного состояния более узок по сравнению с образцом 18 и принима-

ет значения $-0,4 \dots 0,7 \text{ В}$ (рис. 4). Вследствие формирования сплошного поверхностного кремнийсодержащего слоя с высоким содержанием Si и низким содержанием Ni (рис. 2) окислительно-восстановительные процессы с участием никеля на ЦВА в анодной и катодной областях не проявляются. Следовательно, даже при отсутствии сплошного кремниевого покрытия на поверхности TiNi кремнийсодержащий слой, сформированный при действии объемной плазмы, позволяет повысить коррозионную стойкость TiNi в хлоридсодержащих средах.

Электрохимические исследования образца 21 с неравномерным островковым распределением Si по поверхности показали, что он менее устойчив в хлоридсодержащих растворах по сравнению с образцами 18 и 20, имеющими сплошной поверхностный кремнийсодержащий слой. Из анализа ЦВА следует, что область пассивного состояния находится в интервале потенциалов $-0,4 \dots 0,8 \text{ В}$ (рис. 4). Процесс анодного окисления никеля протекает при $E_{\text{max}} = 1,0 \text{ В}$. При $E = -0,8 \text{ В}$ зафиксирован максимум тока катодного восстановления окисленных форм никеля, что свидетельствует об относительно высоком содержании Ni в поверхностном слое образца 21. Повторная регистрация ЦВА без обновления поверхности электрода не приводит к увеличению интервала потенциалов области пассивного состояния, при $E = 0,8 \text{ В}$ наблюдается существенное увеличение плотности анодного тока от $2,25 \cdot 10^{-5}$ до $8 \cdot 10^{-5} \text{ А/см}^2$. На катодном участке ЦВА при повторной регистрации при $E = -0,8 \text{ В}$ наблюдается уменьшение плотности катодного тока, что свидетельствует о селективном окислении никеля в ходе анодной поляризации сплава. Результаты, полученные в искусственной плазме крови, аналогичны представленным для физраствора.

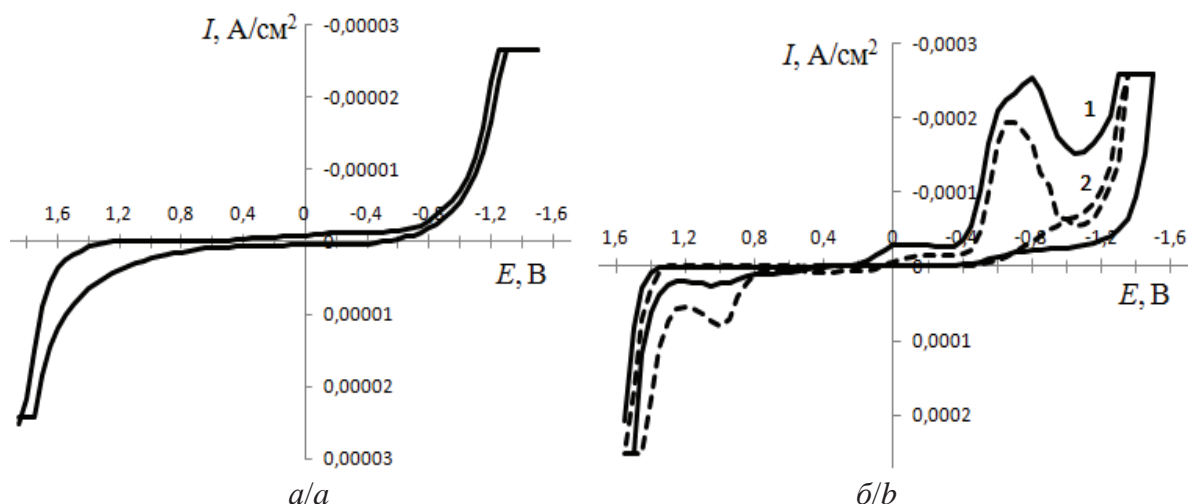


Рис. 4. Вольтамперограммы образцов 20 (а) и 21 (б) в физрастворе (1, 2 – циклы без обновления поверхности электрода; атмосфера воздуха, $E_{\text{н}} = -1,6 \text{ В}$, $w = 10 \text{ мВ/с}$)

Fig. 4. Volt-ampereograms of samples 20 (a) and 21 (b) in normal saline (1, 2, are the cycles without electrode surface-renewal; air, $E_{\text{n}} = -1,6 \text{ V}$, $w = 10 \text{ mV/s}$)

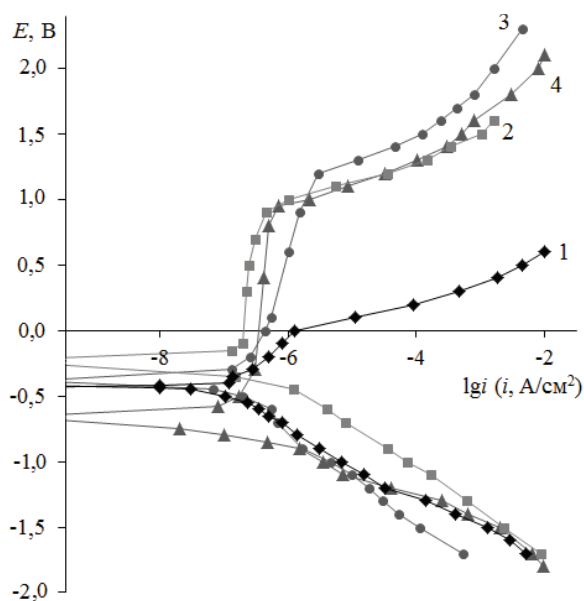


Рис. 5. Потенциостатические поляризационные кривые образцов TiNi (искусственная плазма крови, атмосфера N_2 , $t = 37 \text{ }^\circ\text{C}$): 1) механически шлифованный образец 00; 2) образец 17, обработанный в плазме Ar; 3) образец 20 и 4) 21, обработанные в плазме Si

Fig. 5. Potentiostatic current-voltage curves of TiNi samples (artificial blood plasma, atmosphere N_2 , $t = 37 \text{ }^\circ\text{C}$): 1) mechanically polished sample 00; 2) sample 17 treated in Ar plasma; 3) sample 20 and 4) 21 treated in Si plasma

Таким образом, обработка TiNi в контролируемых условиях ПИИМ позволяет получить на поверхности образцов сплава кремнийсодержащие слои с максимальным содержанием кремния на глубине 5...40 нм, которые в условиях ЦВА проявляют повышенную коррозионную стойкость в хлоридсодержащих растворах по сравнению с ме-

ханически шлифованными и электрополированными образцами. Для уточнения области потенциалов устойчивости поверхностной пассивирующей пленки были проведены исследования при потенциостатических условиях поляризации электродов. На рис. 5 приведены потенциостатические поляризационные кривые для образцов TiNi, поверхность которых была обработана при различных условиях ПИИМ.

Из анализа рис. 5 следует, что потенциал пробоя (питтингообразования) $E_{\text{п}}$ образцов с кремнийсодержащим поверхностным слоем существенно выше, чем для механически шлифованного образца. Образец 00 характеризуется наиболее низким значением $E_{\text{п}} = 0,0 \text{ В}$, коррозионный потенциал для него принимает значение $E_{\text{кор}} = -0,43 \text{ В}$. Снижение содержания Ni в поверхностном слое сплава после ПИИМ приводит к смещению $E_{\text{п}}$ и $E_{\text{кор}}$ в область положительных потенциалов (рис. 5). Неоднородный по составу поверхностный слой образца 21 менее устойчив в среде раствора, что подтверждается смещением $E_{\text{кор}}$ в область отрицательных потенциалов. Из совокупности результатов ЦВА и потенциостатической поляризации следует, что наиболее устойчивыми к коррозионному разрушению в искусственных биологических средах являются образцы 18 и 20.

Изучение морфологии поверхности образцов TiNi, обработанных и модифицированных с использованием различных режимов ПИИМ (таблица) и ионно-лучевой обработки [25], показало, что способ обработки влияет на особенности коррозионного разрушения поверхностных слоев сплава в искусственной плазме крови (рис. 6). На поверхности МШ образцов TiNi в условиях ЦВА защитные пассивирующие слои не формируются, в области потенциалов анодного окисления ($E > 0,0 \text{ В}$)

происходит образование питтинга вследствие интенсивно протекающего коррозионного процесса (рис. 6, 1). В процессе питтингообразования в раствор выделяется значительное количество никеля. Значительное повышение коррозионной стойкости TiNi происходит при использовании электрополировки поверхности, в результате которой никель селективно удаляется из тонких поверхностных слоев сплава, состав пассивирующих слоев приближается к TiO₂ [25]. Обработка электрополированных образцов TiNi с использованием ПИИМ в плазме аргона приводит к «стравливанию» поверхностного пассивирующего оксидного слоя, при этом содержание никеля в поверхностных слоях сплава возрастает и приводит к снижению коррозионной стойкости образцов при анодной по-

ляризации. Коррозионные разрушения развиваются сплошным фронтом по всей поверхности образца (рис. 6, 2).

Формирование сплошного кремниевого покрытия на поверхности TiNi толщиной до 300 нм в условиях ПИИМ способствует существенному повышению коррозионной стойкости сплава (рис. 6, 3), разрушения поверхностных слоев не происходит после длительной выдержки при высоких положительных потенциалах ($E=1,5$ В). Такая устойчивость образцов обусловлена образованием пассивирующих слоев, содержащих TiO₂ и SiO₂. Аналогичную устойчивость к анодному окислению проявляют образцы TiNi после ПИИМ (образец 20) (рис. 6, 4) и после ионно-лучевой обработки (рис. 6, 6) за счет формирования тонкого (до

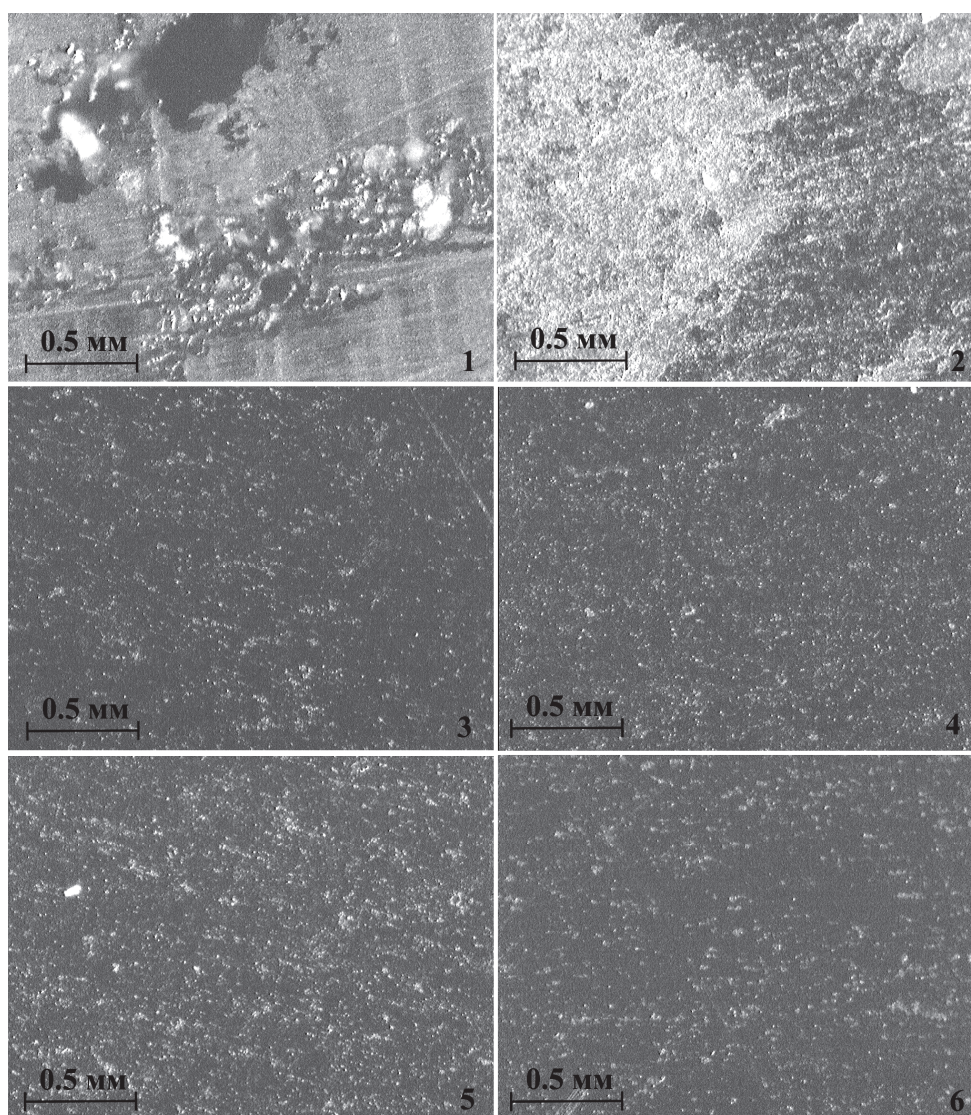


Рис. 6. Микрофотографии поверхности образцов TiNi после наложения двух циклов потенциалов в интервале $-1,5...2,0$ В (нас. х.с.э.) в искусственной плазме крови (маркировка образцов совпадает с данными таблицы): 1) 00; 2) 17; 3) 18; 4) 20; 5) 21; 6) ионно-лучевая обработка в пучках ионов кремния

Fig. 6. Micrographs of TiNi sample surface after superposition of two cycles of potentials in the range of $-1,5...2,0$ V (sat. x.c.e.) in artificial blood plasma (sample designation coincides with the data in the table 1): 1) 00; 2) 17; 3) 18; 4) 20; 5) 21; 6) ion-beam processing in silicon ion beams

80 нм) сплошного кремнийсодержащего поверхностного слоя с низкой концентрацией Ni. Формирование неравномерного кремнийсодержащего слоя в аналогичных условиях ПИИМ (образец 21) приводит к возникновению локальных центров коррозионного разрушения (рис. 6, 5) за счет интенсивного окисления участков поверхности, на которых содержание кремния понижено, а никеля – повышено. Данные микроскопии хорошо согласуются с результатами Оже-спектрометрии и электрохимических измерений.

Выводы

1. Модифицирование поверхности TiNi кремнием в условиях плазменно-иммерсионной обработки позволяет сформировать кремнийсодержащие поверхностные слои толщиной до 80 нм с максимальным содержанием Si до 50 ат. % на глубине 5...6 нм, а также кремниевые покрытия толщиной до 300 нм. Плазменно-иммерсионная обработка способствует снижению шероховатости поверхности сплава; обработка в объемной плазме приводит к концентрационной дифференциации поверхностных слоев сплава по глубине, заключающейся в формировании внешних оксидных TiO₂ и SiO₂ плёнок, промежуточного слоя (имеет сложный фазовый состав: аморфный Si, твердый раствор Si в TiNi, Ti₂Ni и Ti₃Ni₄) с пониженным, по сравнению с объемом сплава, содержанием Ni.

2. Модифицирование поверхности никелида титана кремнием в условиях плазменно-иммерсионной обработки приводит к повышению коррозионной стойкости сплава в хлоридсодержащих средах (по сравнению с механически шлифованным и электрополированным образцами), заключающейся в повышении потенциалов интенсивного анодного окисления до 0,9...1,5 В (нас. х.с.э.). Длительная поляризация модифицированных образцов при высоких положительных потенциалах не приводит к коррозионному разрушению поверхностного слоя и выделению ионов никеля в раствор за счет защитного действия поверхностного сплошного кремнийсодержащего слоя.

3. Вид коррозионного разрушения поверхности модифицированных кремнием образцов TiNi после анодной поляризации при высоких положительных потенциалах определяется характером распределения Si в поверхностном слое: сплошные, однородные по содержанию Si слои устойчивы к коррозионному разрушению; неоднородные по содержанию Si слои не предотвращают питтингообразование при высоких положительных потенциалах вследствие локального селективного выделения никеля из поверхностного слоя сплава в раствор.

Работа выполнена при поддержке ФЦП, проект RFMEFI 60414X0031, соглашение № 14.604.21.0031 от 17.06.2014 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Borden T. Shape-Memory Alloys: Forming a Tight Fit // *Mech. Eng.* – 1991. – V. 113. – № 10. – P. 67–72.
- Duerig T., Pelton A., Stöckel D. An overview of nitinol medical applications // *Mater. Sci. Eng. A.* – 1999. – V. 273–275. – P. 149–160.
- Shape memory alloys for biomedical applications / Ed. T. Yoneyama, S. Miyazaki. – Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, 2008. – 337 p.
- Es-Souni M., Es-Souni M., Fischer-Brandies H. Assessing the biocompatibility of NiTi shape memory alloys used for medical applications // *Anal. Bioanal. Chem.* – 2005. – V. 381. – P. 557–567.
- Saxholm H.J. Effect of Nickel Compounds in cell culture // *Biochemistry of Nickel.* – New York: Plenum Press, 1993. – P. 165–173.
- Sun Z.L., Wataha J.C., Hanks C.T. Effects of metal ions on osteoblast-like cell metabolism and differentiation // *J. Biomed. Mater. Res. B: Appl. Biomater.* – 1997. – V. 34. – № 1. – P. 29–37.
- Nickel and molybdenum contact allergies in patients with coronary in-stent restenosis / R. Koster, M. Sommerauer, J. Kahler et al. // *Lancet.* – 2000. – V. 356. – P. 1895–1897.
- Relating nickel-induced tissue inflammation to nickel release in vivo / J.C. Wataha, N.L. O'Dell, B.B. Singh et al. // *J. Biomed. Mater. Res.* – 2001. – V. 58. – № 5. – P. 537–544.
- Preliminary investigation of the effects of surface treatments on biological response to shape memory NiTi stents / C. Trapanier, T. Leung, M. Tabrizian et al. // *J. Biomed. Mater. Res. B: Appl. Biomater.* – 1999. – V. 48. – № 2. – P. 165–171.
- Comparative corrosion performance of black oxide, sandblasted, and fine-drawn nitinol wires in potentiodynamic and potentiostatic tests: effects of chemical etching and electropolishing / S. Shabalovskaya, G. Rondelli, J. Anderegg et al. // *J. Biomed. Mater. Res. B: Appl. Biomater.* – 2004. – V. 69B. – № 2. – P. 223–231.
- Michiardi A., Aparicio C., Planell J., Gil F. New oxidation treatment of NiTi shape memory alloys to obtain Ni-free surfaces and to improve biocompatibility // *J. Biomed. Mater. Res. B: Appl. Biomater.* – 2006. – V. 77B. – № 2. – P. 249–256.
- Enhanced corrosion resistance and cellular behavior of ultrafine-grained biomedical NiTi alloy with a novel SrO–SiO₂–TiO₂ sol–gel coating / C.Y. Zheng, F.L. Niea, Y.F. Zheng et al. // *Appl. Surf. Sci.* – 2011. – V. 257. – № 13. – P. 5913–5918.
- Haider W., Munroe N. Assessment of Corrosion Resistance and Metal Ion Leaching of Nitinol Alloys // *J. Mat. Eng. Perform.* – 2011. – V. 20. – P. 4–5.
- Milosev I., Kapun B. The corrosion resistance of Nitinol alloy in simulated physiological solutions: Part 1: The effect of surface preparation // *Mater. Sci. Eng.* – 2012. – V. 32. – № 5. – P. 1087–1096.
- Surface modification of Ni–Ti alloys for stent application after magnetoelectropolishing / P. Gill, V. Musaramthota, N. Munroe et al. // *Mat. Sci. Eng. C.* – 2015. – V. 50. – P. 37–44.
- Shabalovskaya S., Anderegg J., Van Humbeeck J. Critical overview of Nitinol surfaces and their modifications for medical applications // *Acta Biomaterialia.* – 2008. – V. 4. – № 3. – P. 447–467.
- The electrochemical characteristics of native Nitinol surfaces / S. Shabalovskaya, G. Rondelli, A. Undisz et al. // *Biomaterials.* – 2009. – V. 30. – № 22. – P. 3662–3671.
- Maitz M., Shevchenko N. Plasma-immersion ion-implanted nitinol surface with depressed nickel concentration for implants in blood // *J. Biomed. Mater. Res. A.* – 2006. – V. 76A. – № 2. – P. 356–365.

19. Surface mechanical properties, corrosion resistance, and cytocompatibility of nitrogen plasma-implanted nickel–titanium alloys: A comparative study with commonly used medical grade materials / K.W.K. Yeung, R.W.Y. Poon, P.K. Chu et al. // *J. Biomed. Mat. Res. A.* – 2007. – V. 82A. – № 2. – P. 403–414.
20. Effect of nitrogen ion implantation on in vitro corrosion behaviour of NiTi / R. Barcos, A. Conde, J. de Damborenea, J. Puertolas // *Revista De Metalurgia.* – 2008. – V. 44. – № 4. – P. 326–334.
21. Sun T., Wang L.-P., Wang M. (Ti, O)/Ti and (Ti, O, N)/Ti composite coatings fabricated via PIII for the medical application of NiTi shape memory alloy // *J. Biomed. Mater. Res. B: Appl. Biomater.* – 2011. – V. 96B. – № 2. – P. 249–260.
22. Effect of Silicon, Titanium, Zirconium Ion Implantation on NiTi Biocompatibility / L.L. Meisner, A.I. Lotkov, V.A. Matveeva et al. // *Adv. Mater. Sci. Eng.* – 2012. – V. 2012. – P. 1–16.
23. Ni ion release, osteoblast–material interactions, and hemocompatibility of hafnium-implanted NiTi alloy / T. Zhao, Y. Li, X. Zhao et al. // *J. Biomed. Mater. Res. B: Appl. Biomater.* – 2012. – V. 100 B. – № 3. – P. 646–659.
24. Surface morphology and plastic deformation of the ion implanted TiNi alloy / L.L. Meisner, V.P. Sivokha, A.I. Lotkov, L.S. Derevyagina // *Physica B.* – 2001. – V. 307. – № 1–4. – P. 251–257.
25. Corrosion resistance of silicon-modified nitinol in artificial physiological solutions / A.I. Lotkov, S.G. Psakhie, L.L. Meisner et al. // *Advanced Biomaterials and Devices in Medicine.* – 2014. – V. 1. – № 1. – P. 46–52.
26. ГОСТ Р ИСО 10993–15–2009 Изделия медицинские. Оценка биологического действия медицинских изделий. Ч. 15. Идентификация и количественное определение продуктов деградации изделий из металлов и сплавов. – М.: Стандартинформ, 2010. – 16 с.

Поступила 31.08.2015 г.

UDC 546.82:546.74:54–19:546.28:66.088:620.193

INFLUENCE OF SURFACE MODIFICATION OF NITINOL WITH SILICON USING PLASMA-IMMERSION ION IMPLANTATION ON THE ALLOY CORROSION RESISTANCE IN CHLORIDE-CONTAINING SOLUTIONS

Andrey V. Korshunov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: korshunov@tpu.ru

Alexander I. Lotkov,

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, 2/4, Akademicheskii
avenue, Tomsk, 634055, Russia. E-mail: lotkov@ispms.tsc.ru

Oleg A. Kashin,

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, 2/4, Akademicheskii
avenue, Tomsk, 634055, Russia. E-mail: okashin@ispms.tsc.ru

Polina V. Abramova,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: polya.bozhko@yandex.ru

Dmitri P. Borisov,

National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050,
Russia. E-mail: borengin@mail.ru

The relevance of the research is caused by the need to find a way to increase corrosion resistance of nitinol in chloride-containing solutions. High strength of NiTi combined with ductility and corrosion resistance determine the prospects of application of the alloy under cyclic mechanical and thermal impacts (mining and processing of mineral raw materials, engineering, medicine), so nitinol oxidation and corrosion in chloride solutions (sea water, biological environment) are the subject of intensive study in modern physical chemistry of metallic materials.

The aim of the work was to study the electrochemical behavior and corrosion resistance of nitinol modified with silicon in artificial physiological solutions (0,9 % NaCl, artificial blood plasma).

The methods used in the study: plasma-immersion Si-ion implantation of nitinol surface, profilometry, Auger-spectrometry, optical microscopy, scanning and transmission electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, X-ray diffraction, cyclic voltammetry.

The results. It was found out that at the surface of nitinol after plasma-immersion ion implantation with silicon the modified Si-containing surface layers up to 80 nm thick are formed, which contain Si up to 50 at. % at 5..6 nm depth, and also Si-coatings of 300 nm thick can be obtained. Treatment of the alloy in plasma allows decreasing roughness of the surface, and leads to formation of outer oxide films (TiO₂, SiO₂) which are resistant to chloride-containing solutions. Between the oxide film and the volume of the alloy there is an intermediate layer (amorphous Si, solid solution of Si in TiNi, Ti₂Ni and Ti₃Ni₄) with decreased Ni concentration regarding to the alloy volume. Continuous, and also homogeneous in composition, thin Si-containing layers are resistant to corrosion damage at high positive potentials in chloride solutions (0,9 % NaCl) due to formation of stable passive films. The value of breakdown potential of Si-modified Ni-

Ti depends on the character of silicon and Ni distribution at the alloy surface, its value amounted to 0,9–1,5 V (Ag/AgCl/KCl sat.) for the alloy samples with continuous Si-containing surface layers and with decreased Ni surface concentration. Continuous and homogeneous by Si-contant surface layers are resistant to corrosion damage; non-homogeneous layers do not prevent pitting formation at high positive potentials because of local selective Ni emission from the alloy surface to solution. The paper demonstrates the definite similarity in electrochemical behavior and in morphological changes during anodic oxidation at high positive potentials for NiTi samples, modified with Si under conditions of plasma-immersion and of ion-beam treatment.

Key words:

Nitinol, plasma-immersion ion implantation, surface silicon-containing layers, artificial physiological solutions, cyclic voltammetry, corrosion resistance.

The research was supported by FTP, project RFMEFI 60414X0031, agreement no. 14.604.21.0031, 17.06.2014.

REFERENCES

- Borden T. Shape-Memory Alloys: Forming a Tight Fit. *Mech. Eng.*, 1991, vol. 113, no. 10, pp. 67–72.
- Duerig T., Pelton A., Stöckel D. An overview of nitinol medical applications. *Mater. Sci. Eng. A*, 1999, vol. 273–275, pp. 149–160.
- Shape memory alloys for biomedical applications*. Eds. T. Yoneyama, S. Miyazaki. Cambridge, England, Woodhead Publishing Limited, 2008. 337 p.
- Es-Souni M., Es-Souni M., Fischer-Brandies H. Assessing the biocompatibility of NiTi shape memory alloys used for medical applications. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2005, vol. 381, pp. 557–567.
- Saxholm H.J. Effect of Nickel Compounds in cell culture. *Biochemistry of Nickel*. New York, Plenum Press, 1993. pp. 165–173.
- Sun Z.L., Wataha J.C., Hanks C.T. Effects of metal ions on osteoblast-like cell metabolism and differentiation. *J. Biomed. Mater. Res. B: Appl. Biomater.*, 1997, vol. 34, no. 1, pp. 29–37.
- Koster R., Sommerauer M., Kahler J. Nickel and molybdenum contact allergies in patients with coronary in-stent restenosis. *Lancet*, 2000, vol. 356, pp. 1895–1897.
- Wataha J.C., O'Dell N.L., Singh B.B. Relating nickel-induced tissue inflammation to nickel release in vivo. *J. Biomed. Mater. Res.*, 2001, vol. 58, no. 5, pp. 537–544.
- Tr'panier C., Leung T., Tabrizian M. Preliminary investigation of the effects of surface treatments on biological response to shape memory NiTi stents. *J. Biomed. Mater. Res. B: Appl. Biomater.*, 1999, vol. 48, no. 2, pp. 165–171.
- Shabalovskaya S., Rondelli G., Anderegg J. Comparative corrosion performance of black oxide, sandblasted, and fine-drawn nitinol wires in potentiodynamic and potentiostatic tests: effects of chemical etching and electropolishing. *J. Biomed. Mater. Res. B: Appl. Biomater.*, 2004, vol. 69B, no. 2, pp. 223–231.
- Michiardi A., Aparicio C., Planell J., Gil F. New oxidation treatment of NiTi shape memory alloys to obtain Ni-free surfaces and to improve biocompatibility. *J. Biomed. Mater. Res. B: Appl. Biomater.*, 2006, vol. 77B, no. 2, pp. 249–256.
- Zheng C.Y., Niea F.L., Zheng Y.F. Enhanced corrosion resistance and cellular behavior of ultrafine-grained biomedical NiTi alloy with a novel SrO–SiO₂–TiO₂ sol–gel coating. *Appl. Surf. Sci.*, 2011, vol. 257, no. 13, pp. 5913–5918.
- Haider W., Munroe N. Assessment of Corrosion Resistance and Metal Ion Leaching of Nitinol Alloys. *J. Mat. Eng. Perform.*, 2011, vol. 20, pp. 4–5.
- Milosev I., Kapun B. The corrosion resistance of Nitinol alloy in simulated physiological solutions: Part 1: The effect of surface preparation. *Mater. Sci. Eng.*, 2012, vol. 32, no. 5, pp. 1087–1096.
- Gill P., Musaramthota V., Munroe N. Surface modification of Ni–Ti alloys for stent application after magnetoelectropolishing. *Mat. Sci. Eng. C*, 2015, vol. 50, pp. 37–44.
- Shabalovskaya S., Anderegg J., Van Humbeek J. Critical overview of Nitinol surfaces and their modifications for medical applications. *Acta Biomaterialia*, 2008, vol. 4, no. 3, pp. 447–467.
- Shabalovskaya S., Rondelli G., Undisz A. The electrochemical characteristics of native Nitinol surfaces. *Biomaterials*, 2009, vol. 30, no. 22, pp. 3662–3671.
- Maitz M., Shevchenko N. Plasma-immersion ion-implanted nitinol surface with depressed nickel concentration for implants in blood. *J. Biomed. Mater. Res. A*, 2006, vol. 76A, no. 2, pp. 356–365.
- Yeung K.W.K., Poon R.W.Y., Chu P.K. Surface mechanical properties, corrosion resistance, and cytocompatibility of nitrogen plasma-implanted nickel–titanium alloys: A comparative study with commonly used medical grade materials. *J. Biomed. Mat. Res. A*, 2007, vol. 82A, no. 2, pp. 403–414.
- Barcos R., Conde A., de Damborenea J., Puertolas J. Effect of nitrogen ion implantation on in vitro corrosion behaviour of NiTi. *Revista De Metalurgia*, 2008, vol. 44, no. 4, pp. 326–334.
- Sun T., Wang L.-P., Wang M. (Ti, O)/Ti and (Ti, O, N)/Ti composite coatings fabricated via PIIID for the medical application of NiTi shape memory alloy. *J. Biomed. Mater. Res. B: Appl. Biomater.*, 2011, vol. 96B, no. 2, pp. 249–260.
- Meisner L.L., Lotkov A.I., Matveeva V.A. Effect of Silicon, Titanium, Zirconium Ion Implantation on NiTi Biocompatibility. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2012, vol. 2012, pp. 1–16.
- Zhao T., Li Y., Zhao X. Ni ion release, osteoblast–material interactions, and hemocompatibility of hafnium-implanted NiTi alloy. *J. Biomed. Mater. Res. B: Appl. Biomater.*, 2012, vol. 100 B, no. 3, pp. 646–659.
- Meisner L.L., Sivokha V.P., Lotkov A.I., Derevyagina L.S. Surface morphology and plastic deformation of the ion implanted TiNi alloy. *Physica B*, 2001, vol. 307, no. 1–4, pp. 251–257.
- Lotkov A.I. Psakhie S.G., Meisner L.L. Corrosion resistance of silicon-modified nitinol in artificial physiological solutions. *Advanced Biomaterials and Devices in Medicine*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 46–52.
- GOST R ISO 10993–15–2009 *Izdeliya meditsinskiye. Otsenka biologicheskogo deystviya meditsinskikh izdeliy. Ch. 15. Identifikatsiya i kolichestvennoe opredelenie produktov degradatsii izdeliy iz metallov i splavov* [State Standard 10993–15–2009. Medical devices. Evaluation of biological effect of medical devices. P. 15. Identification and quantitative determination of degradation products of devices of metals and alloys]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 16 p.

Received: 31 August 2015.

УДК 551.510.532; 551.501.816

ЛИДАРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ОЗОНА В ВЕРХНЕЙ ТРОПОСФЕРЕ – НИЖНЕЙ СТРАТОСФЕРЕ: МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Бурлаков Владимир Дмитриевич,

канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Центра лазерного зондирования атмосферы
ФГБНУ «Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук»,
Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1. E-mail: burlakov@iao.ru

Долгий Сергей Иванович,

канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Центра лазерного зондирования атмосферы
Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1. E-mail: dolgii@iao.ru

Невзоров Алексей Алексеевич,

программист научно-образовательного центра ФГБНУ «Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева
Сибирского отделения Российской академии наук», Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1;
аспирант каф. управления инновациями факультета инновационных технологий
Национального исследовательского Томского государственного университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36. E-mail: naa@iao.ru

Невзоров Алексей Викторович,

канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Центра лазерного зондирования атмосферы
Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1. E-mail: nevzorov@iao.ru

Романовский Олег Анатольевич,

д-р физ.-мат. наук, зав. научно-образовательным центром Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева
Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1;
профессор каф. управления инновациями факультета инновационных технологий
Национального исследовательского Томского государственного университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36. E-mail: roa@iao.ru

Харченко Ольга Викторовна,

канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Центра лазерного зондирования атмосферы
Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1. E-mail: olya@iao.ru

Прогнозирование состояния озонового слоя атмосферы нашей планеты, представляющего собой ценный и незаменимый георесурс, в настоящее время является важной научной и технической проблемой. Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки лазерных дистанционных методов зондирования озона для решения проблем контроля состояния окружающей среды и климатологии.

Цель исследования: разработка методики лазерного дистанционного зондирования озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере методом дифференциального поглощения с учетом температурной и аэрозольной коррекции и анализ результатов измерений.

Методы исследования: метод дифференциального поглощения, основанный на эффекте резонансного поглощения лазерного излучения в пределах селективной линии поглощения исследуемой газовой компоненты.

Результаты. Представлена методика восстановления профилей вертикального распределения озона с учетом температурной и аэрозольной коррекции при лидарном зондировании атмосферы методом дифференциального поглощения. Определены длины волн, перспективные для измерения профилей озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере. Для оперативного получения результатов работы методики разработан программный продукт на основе метода дифференциального поглощения с удобным и понятным интерфейсом на языке программирования C# для операционных систем Windows 7, использующий результаты лидарных измерений и позволяющий вести расчет восстановления профилей вертикального распределения озона с учетом аэрозольной и температурной коррекции. Восстановленные профили озона, полученные в результате работы программы, сравнили со спутниковыми данными IASI и моделью Крюгера. Результаты применения разработанной методики восстановления профилей вертикального распределения озона с учетом температурной и аэрозольной коррекции в диапазоне высот 6–18 км при лидарном зондировании атмосферы методом дифференциального поглощения подтверждают перспективность использования выбранных длин волн зондирования озона 299 и 341 нм в озоновом лидаре.

Ключевые слова:

Лидар, озон, атмосфера, дифференциальное поглощение, программа.

В настоящее время представляется актуальным рассмотрение вопросов техники и технологии прогнозирования состояния озонового слоя атмосферы, представляющего собой ценный георесурс, незаменимый для обеспечения комфортного состояния окружающей среды и решения проблем климатологии планеты.

Для исследования атмосферы и контроля ее состояния широко применяются методы дистанционного лазерного зондирования с использованием лидарной техники – лидара или лазерного локатора (lidar – аббревиатура от light detection and ranging). Наиболее чувствительным из методов, используемых для определения пространственного распределения концентрации какого-либо газа атмосферы, является метод дифференциального поглощения (МДП). В настоящее время лидарное зондирование малых газовых составляющих (МГС) атмосферы, в том числе и озона, по МДП принципиально реализовано [1–3].

Начиная со второй половины 80-х гг. прошлого века лазерное зондирование озоносферы приобрело регулярный характер на ряде обсерваторий [4–7]. Оно дает информацию о вертикальном распределении озона (ВРО), удачно дополняя подобную информацию, получаемую контактными методами с помощью озонзондов и ракет, а также спутников (TOMS, SAGE-II, TERRA, и др). Многолетние лидарные наблюдения стратосферного озона позволяют получить информацию о климатологии озоносферы, особенно выше 30 км, где данные озонзондов становятся нерепрезентативными.

Лазерное зондирование вертикального распределения стратосферного озона осуществляется на Сибирской лидарной станции Института оптики атмосферы СО РАН (г. Томск: 56,5° с.ш.; 85,0° в.д.) с 1989 г. [8]. Длительный период лидарных наблюдений за стратосферным озоном показал, что наиболее значимая часть для исследований озоносферы расположена в нижней стратосфере, где озон подвержен влиянию динамического фактора. Лидарные измерения профилей ВРО по МДП в различных высотных диапазонах атмосферы с разным содержанием озона осуществляются на различных комбинациях длин волн [4–8].

Целью данной работы является выбор длин волн зондирования ВРО, разработка алгоритма и программы восстановления озоновых профилей с учетом температурной и аэрозольной коррекции и анализ результатов измерений.

Лидарные измерения ВРО осуществляются на основе метода дифференциального поглощения рассеянной назад энергии лазерного излучения в УФ диапазоне спектра 200–370 нм (полоса Хартли–Хаггинса) [9]. На практике в озоновых лидарах с помощью различных лазеров имеется возможность реализации нескольких вариантов пар длин волн зондирования. В табл. 1 представлены характеристики некоторых лидаров, применяемых для исследования озона и работающих на разных комбинациях длин волн.

Более 85 % всего озона находится в стратосфере. При этом для измерений малых концентраций озона в тропосфере, с целью увеличения концентрационной чувствительности метода, при выборе длин волн зондирования необходимо смещаться ближе к центру полосы поглощения озона в более коротковолновую часть. В этой части спектра его сечение поглощения σ в разы выше, чем для длин волн, используемых при стратосферных измерениях (например, для длины волны $\lambda_{on}=299$ нм – $\sigma_{299}=4,4 \cdot 10^{-19}$ см², а для $\lambda_{on}=308$ нм – $\sigma_{308}=1,4 \cdot 10^{-19}$ см²).

Для тропосферных измерений озона обычно используется излучение эксимерного KrF-лазера (248 нм) или 4-я гармоника Nd: YAG-лазера (266 нм) в сочетании с техникой, основанной на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в H₂, D₂, CO₂ и других газах [4, 5, 7, 10–15]. Наиболее распространенными являются водород и дейтерий. Возможный набор длин волн, соответствующих 1, 2, 3 стоксовым (С) частотам ВКР преобразования в H₂, D₂ и CO₂, представлен в табл. 2.

Таблица 1. Характеристики лидаров, применяемых для исследования стратосферного озона

Table 1. Features of the lidars applied for studying stratospheric ozone

Страна (пункт наблюдения) Country (observation point)	Начало измерения (г.) Start of measuring (year)	Источник излучения: длина волны, нм/энергия импульса, мДж/ частота следования импульсов, Гц Radiation source: wavelength, nm/pulse energy, mJ/pulse repetition frequency, Hz	Приемное зеркало (диаметр), м Receiving mirror (diameter), m	Ссылка Reference
США, Калифорния USA, California (34° с.ш., 118° в.д.)	1986	XeCl+ВКР (H ₂) 308–353	0,9	[10]
Франция, Верхний Прованс France, Upper Provence (44° с.ш., 6° в.д.)	1986	XeCl+Nd: YAG 308/250/50; 355/150/50	4 зеркала (mirrors) по 0,53	[11]
Россия, Томск Russia, Tomsk (56,5° с.ш., 85° в.д.)	1989	XeCl+ВКР (H ₂) 308/100/100; 353/50/100	2,2 0,5 0,3	[8]
Германия, Хоенпайсенберг Germany, Hoehn-paisenberg (48° с.ш., 11° в.д.)	1987	XeCl+ВКР (H ₂) 308/300/20; 353/150/20	0,6	[12]
Франция, Италия, Антарктика France, Italy, Antarctic (66° ю.ш., 140° в.д.)	1991	XeCl+Nd: YAG 308/180/80; 355/180/10	0,8	[13]
Аргентина, Буэнос-Айрес Argentina, Buenos Aires (35° ю.ш., 59° з.д.)	1999	XeCl+Nd: YAG 308/300/100; 355/255/10	0,5	[14]

Note: с.ш. – N; в.д. – E; ю.ш. – S; з.д. – W.

В различных высотных диапазонах тропосферы и нижней стратосферы на практике используются различные комбинации длин волн. Так, пары длин волн 289/316 и 287/299 нм позволяют получать профиль вертикального распределения озона до высот ~10 км [4, 5]; пара 292/319 нм – до высот 14–16 км [4]; пары 277/313 и 292/313 нм – до высот 8–12 и 15 км, соответственно [7].

Таблица 2. Набор длин волн, соответствующих стоксовым (С) частотам ВКР преобразования в H₂, D₂ и CO₂

Table 2. Set of wavelengths corresponding to Stokes (C) frequencies of simulated Raman scattering into H₂, D₂ and CO₂

Излучение накачки (нм) Pumping radiation (nm)	Длины волн (нм), соответствующие стоксовым частотам (С) ВКР преобразования в Wavelengths (nm) corresponding to Stokes (C) frequencies of simulated Raman scattering into		
	H ₂ C ₁ C ₂	D ₂ C ₁ C ₂ C ₃	CO ₂ C ₂ C ₃
Nd: YAG, 266	299 341	289 316	287 299
KrF, 248	277 313	268 291 319	

Нами проведены численные оценки возможностей зондирования профилей ВРО в верхней тропосфере – нижней стратосфере на паре длин волн 299/341 нм. При расчетах закладывались реальные параметры лидара: энергия излучения на обеих длинах волн 20 мДж; частота повторения лазерных импульсов 15 Гц; диаметр приемного зеркала 0,5 м; время накопления сигнала 1,5 ч. Для определения эффективности приемопередатчика использовались реальные значения пропускания оптических элементов спектральной селекции и эффективности фотоэлектронных умножителей, шумы брались из реальных измерений. Расчеты показали, что при применении этих длин волн максимальная высота потолка зондирования составляет ~22 км (озоновый максимум в Томске расположен в высотном интервале 19–21 км), но при этом появилась возможность измерений озона в тропосфере. Ошибка определения концентрации озона находится в пределах 4–10 % до высот ~20 км.

Максимальная высота зондирования определяется, прежде всего, дальностью регистрации сигнала на λ_{on} , которая всегда меньше, чем дальность регистрации сигнала на λ_{off} , вследствие большего поглощения озоном. С этой стороны $\lambda_{on}=299$ нм предпочтительнее, чем 277 или 292 нм. Кроме того, длины волн 299 и 341 реализуются в одном пучке зондирования (от одного лазерного источника в одной DRH ячейке), в отличие, например, от пары 292/313 нм (табл. 2). При этом система на основе ВКР ячейки с водородом дешевле, чем на дейтерии.

Таким образом, пара длин волн 299/341 нм является наиболее информативной для проведения измерений профилей ВРО в тропосфере – нижней стратосфере (диапазон высот 5–22 км).

Выбранные длины волн зондирования 299/341 нм были задействованы в разработанном озоновом лидаре. На рис. 1 приведена блок-схема разработанного лидара. В качестве источника лазерного излучения используется 4-я гармоника (266 нм) основной частоты излучения Nd: YAG лазера (модель LS-2134UT фирмы LOTIS ТП, Минск) с последующим ее ВКР-преобразованием в водороде в первую (299 нм) и вторую (341 нм) стоксовы компоненты.

Приемный телескоп разработан по схеме Ньютона на основе главного зеркала диаметром 0,5 м с фокусным расстоянием 1,5 м. Регистрирующий тракт лидара укомплектован фотоумножителями (R7207-01) и усилителями-дискриминаторами (С3866) фирмы «Hamamatsu». Регистрация лидарных сигналов ведется в режиме счета импульсов фототока. Для обеспечения линейных режимов работы ФЭУ используется механический обтюратор, который отсекает мощный оптический сигнал от ближней зоны зондирования. Автоматизированный юстировочный узел выходного поворотного зеркала разработан на основе шаговых двигателей с управлением от компьютера.

ВКР-ячейка изготовлена из трубы (нержавеющая сталь) с внутренним диаметром 3 см и длиной 1 м. Входное и выходное окна изготовлены из кварца КУ. Энергия импульса накачки на длине волны 266 нм составляет 60 мДж. Необходимая для получения эффекта ВКР преобразования плотность мощности накачки обеспечивается линзой – Л1 с фокусным расстоянием 1 м, которая устанавливается перед ВКР-ячейкой и фокусирует излучение на ее центр. После ячейки конфокально с фокусирующей линзой устанавливается коллимирующая линза – Л2.

Основные технические характеристики лазерных источников и приемных оптических элементов озонового лидара:

Передатчик	
Длина волны зондирования, λ нм	299 341
Энергия импульса, мДж (соотв. λ)	25 20
Частота следования, Гц (соотв. λ)	15
Расходимость, мрад	0,1–0,3
Приемник	
Диаметр зеркала, м	0,5
Фокусное расстояние, м	1,5

Была определена эффективность ВКР преобразования в зависимости от давления водорода в ячейке. Давление водорода в ячейке изменялось от 1 до 9 атм. Полученная на выходе из ВКР-ячейки зависимость относительных интенсивностей излучения накачки (266 нм), первой (299 нм) и второй (341 нм) стоксовых компонент ВКР преобразования от давления водорода представлена на рис. 2.

При давлении водорода 2 атм интенсивности линий 299 и 341 нм сравниваются, что дает возможность зондирования озона при равных энергетиках излучения на этих длинах волн. Однако для увеличения потолка зондирования более эффективно использовать давление 1 атм, т. к. при этом энергетика перераспределяется в пользу линии

299 нм, которая сильнее поглощается озоном, чем линия 341 нм.

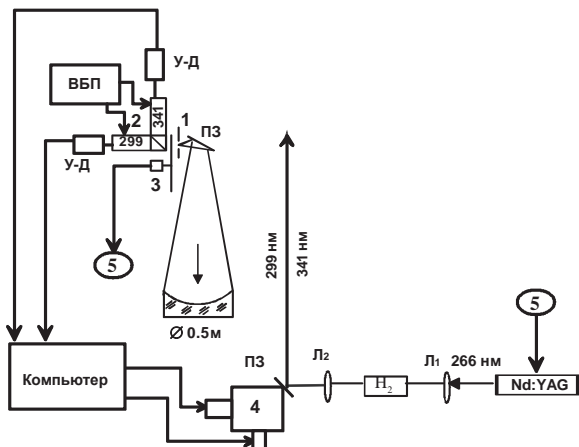


Рис. 1. Блок-схема озонового лидара: 1 – полявая диафрагма; 2 – кювета спектральной селекции с ФЭУ; 3 – механический обтюратор; ПЗ – поворотные зеркала; 4 – автоматизированный юстировочный узел выходного поворотного зеркала; Nd:YAG – твердотельный лазер; Н₂ – ячейка ВКР преобразования с водородом; УД – усилители-дискриминаторы; ВБП – высоковольтные блоки питания; Л₁, Л₂ – линзы; 5 – система синхронизации времени срабатывания обтюратора и посылки лазерных импульсов

Fig. 1. Block diagram of the ozone lidar: 1 is the field diaphragm; 2 is the cuvette of spectral selection with PMT; 3 is the mechanical obturator; ПЗ (FM) is the folding mirror; 4 is the automated alignment node of the output folding mirror; Nd:YAG is the solid-state laser; Н₂ (Н₂) is the cell of Raman conversion with hydrogen; УД is the amplifier-discriminator; ВБП are the high voltage power supplies; Л₁, Л₂ are the lenses; 5 is the system of time synchronization of the obturator response and parcel of laser pulses

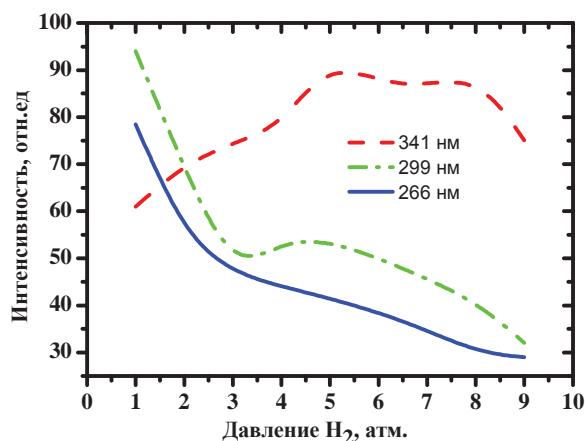


Рис. 2. Зависимость относительных интенсивностей излучения накачки (266 нм), первой (299 нм) и второй (341 нм) стоксовых компонент ВКР преобразования от давления водорода

Fig. 2. Dependence of relative intensities of pump radiation (266 nm), the first (299 nm) and the second (341 nm) Stokes components of stimulated Raman conversion on hydrogen pressure

В основу разработанной методики восстановления профилей вертикального распределения озона с учетом температурной и аэрозольной коррекции легли следующие исходные выражения для определения концентрации озона при лидарном зондировании атмосферы методом дифференциального поглощения [16]:

$$N_{on}(H) = c[\beta_{on}^a(H) + \beta_{on}^m(H)] \times \exp\left[-2 \int_0^H \alpha_{on}^a(H) + \alpha_{on}^m + k_{on}n(H)\right],$$

$$N_{off}(H) = c[\beta_{off}^a(H) + \beta_{off}^m(H)] \times \exp\left[-2 \int_0^H \alpha_{off}^a(H) + \alpha_{off}^m + k_{off}n(H)\right],$$

где на соответствующих длинах волн (на линии поглощения – on и вне линии поглощения – off) $N(H)$ – зарегистрированный эхо-сигнал; C – аппаратная постоянная; α^a – коэффициент ослабления аэрозольного рассеяния; β^a – коэффициент обратного аэрозольного рассеяния; k – коэффициент поглощения; $n(H)$ – концентрация озона. Путем математических преобразований получаем окончательное выражение для расчета концентрации озона:

$$n(H) = \frac{1}{\underbrace{k_{on}(H) - k_{off}(H)}_A} \times \left\{ \underbrace{\frac{d}{dH} \ln \left[\frac{N_{off}(H)}{N_{on}(H)} \right]}_B - \underbrace{\frac{d}{dH} \ln \left[\frac{\beta_{off}^a(H) + \beta_{off}^m(H)}{\beta_{on}^a(H) + \beta_{on}^m(H)} \right]}_C - \left\{ \underbrace{-2[\alpha_{off}^a(H) - \alpha_{on}^a(H)]}_D - \underbrace{-2[\alpha_{off}^m(H) - \alpha_{on}^m(H)]}_F \right\} \right\}, \quad (1)$$

Реальные изменения температуры в атмосфере могут вызвать существенные изменения коэффициента поглощения озона, что приводит к систематическим ошибкам восстановления профилей ВРО. Поэтому в алгоритме восстановления ВРО целесообразно проводить коррекцию на температурную зависимость $k_{on}(H, T)$, $k_{off}(H, T)$. В методике использована модель поведения сечения поглощения озона по температуре, приведенная в табл. 3, основанная на данных из работ [17, 18].

Таблица 3. Сечения поглощения озона (см²) для диапазона 218–295 К на длинах волн зондирования озона [17, 18]

Table 3. Sections of ozone absorption (cm²) for ranges 218–295 K on the wavelength of ozone sounding

Длина волны, нм Wavelength, nm	Температура, К/ Temperature, K				
	218	228	243	273	295
On line					
299	4,1·10 ⁻¹⁹	4,1·10 ⁻¹⁹	4,25·10 ⁻¹⁹	4,3·10 ⁻¹⁹	4,6·10 ⁻¹⁹
Off line					
341	6·10 ⁻²²	6·10 ⁻²²	6·10 ⁻²²	6·10 ⁻²²	1,2·10 ⁻²¹

Преобразуя данные табл. 3 в полином, получаем выражения для расчета части А в (1):

$$K_{299}(H,T) - K_{341}(H,T) = 5,8815E-16 - 1,1538E-17 \cdot (T(H) - 273) + 9,0281E-20 \cdot (T(H) - 273)^2 - 3,5194E-22 \cdot (T(H) - 273)^3 + 6,8356E-25 \cdot (T(H) - 273)^4 - 5,2918E-8 \cdot (T(H) - 273)^5$$

При больших значениях аэрозольного наполнения атмосферы обратное аэрозольное рассеяние в несколько раз превышает молекулярное, что при неучтенных рассеивающих и ослабляющих свойствах атмосферы на зондирующих длинах волн дает существенные искажения восстановленного озонного профиля [19]. В рассматриваемом алгоритме расчета ВРО аэрозольная коррекция учитывается в выражениях С и D введением реального распределения отношения рассеяния $R_{off}(H)$, в то время как в обычной «невозмущенной» атмосфере расчет ВРО можно проводить при значениях $R_{off}(H) = 1$. Математически преобразованные выражения [16] С, D и F:

$$C = \frac{d}{dH} \left\{ \ln \left[\left(\frac{\lambda_{off}}{\lambda_{on}} \right)^x \left[1 - \frac{1}{R_{off}(H)} \right] + \frac{1}{R_{off}(H)} \left(\frac{\lambda_{off}}{\lambda_{on}} \right)^4 \right] \right\},$$

$$D = 2 \cdot 0,04 \left\{ \beta_{off}^m(H) \left[1 - \left(\frac{\lambda_{off}}{\lambda_{on}} \right)^x \right] \right\} =$$

$$= 2 \cdot 0,04 \left\{ [R_{off}(H) - 1] \beta_{off}^m(H) \left[1 - \left(\frac{\lambda_{off}}{\lambda_{on}} \right)^x \right] \right\},$$

$$F = 2 \cdot 0,119 \beta_{off}^m(H) \left[1 - \left(\frac{\lambda_{off}}{\lambda_{on}} \right)^4 \right],$$

где на соответствующих длинах волн λ (на линии поглощения – λ_{on} и вне линии поглощения – λ_{off}); $R_{off}(H)$ – реальное распределение отношения рассеяния; x – параметр характеризует размер частиц; $\beta_{off}^a(H)$ – коэффициент обратного аэрозольного рассеяния; $\beta_{off}^m(H)$ – коэффициент обратного молекулярного рассеяния.

Известно, что задача дифференцирования эмпирических функций относится к классу некорректно поставленных задач. Некорректность проявляется в нарушении устойчивости решения, а именно, небольшие погрешности в исходных данных могут приводить к большим ошибкам решений, а в ряде случаев в появлении отрицательных значений концентрации газа. В данной методике решения некорректной задачи не приводят к «разбалтываемости» решения восстановленного профиля озона за счет хорошо настроенной лидарной системы и высокой точности проведенных экспериментов, таким образом ошибка каждого элемента исходных данных минимальна, что существенно для решения подобных задач.

Разработанная на основе описанной выше методики программа [20] на языке программирования С# для операционных системе Windows 7 представляет собой загрузочный exe файл с пакетом служебных файлов и дает возможности восстановления высотных профилей озона из данных лазерного зондирования атмосферы, структурная схема которой приведена на рис. 3, а также позволяет:

- считывать лидарные данные;
- записывать результаты восстановления в формате ASCII;
- проводить сглаживание скользящим средним лидарных сигналов;



Рис. 3. Структурная схема программы для восстановления высотных профилей озона из данных лазерного зондирования атмосферы

Fig. 3. Block diagram of the program for retrieval of ozone vertical profiles from the data of laser sensing of the atmosphere

- осуществлять температурную и аэрозольную коррекцию;
- проводить сглаживание результатов восстановления ВРО.

На рис. 4 представлен интерфейс программы для восстановления высотных профилей озона из данных лазерного зондирования атмосферы.

Для уменьшения ошибок восстановления в программе введена температурная коррекция коэффициентов поглощения озона. При восстановлении лидарных сигналов на длинах волн зондирования 272/289 и 299/341 нм необходимо учитывать

большую концентрацию аэрозоля в диапазоне высот 0–20 км, поэтому в данной программе учитывается коррекция на аэрозоль. Для расчетов в программе введены среднеширотные сезонные модельные значения высотного распределения температуры и коэффициента обратного молекулярного рассеяния для зимы и лета.

В разработанной программе применяется линейное сглаживание как для входных лидарных данных, так и для результатов восстановления. Линейное сглаживание (сглаживание скользящим средним) является хорошо известной процедурой и

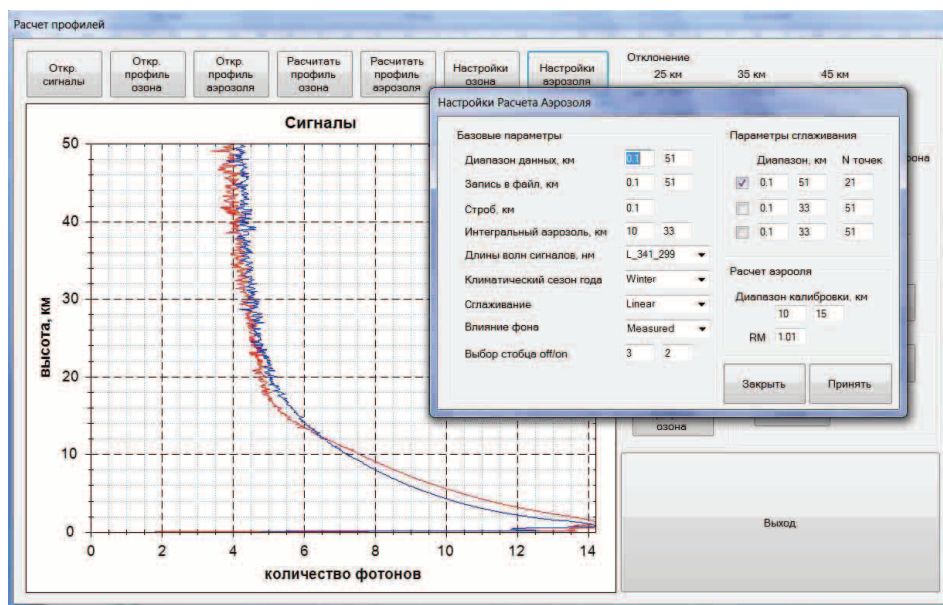


Рис. 4. Интерфейс программы для восстановления высотных профилей озона из данных лазерного зондирования атмосферы

Fig. 4. Program interface for retrieval of ozone vertical profiles from the data of laser sensing of the atmosphere

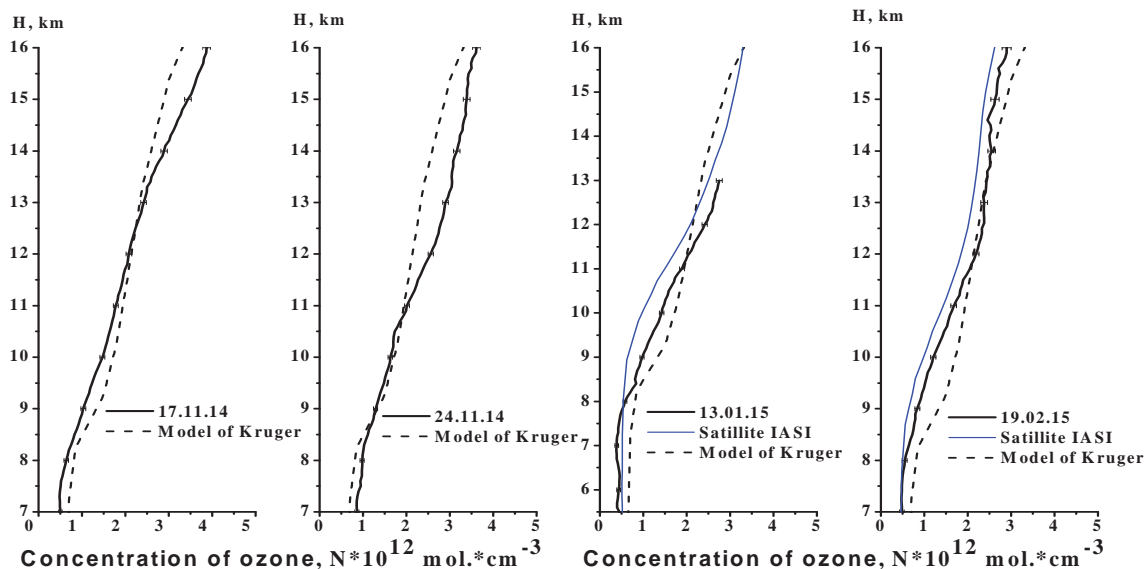


Рис. 5. Восстановленные профили вертикального распределения озона в сравнении с моделью Крюгера и спутниковыми данными IASI за 2014 и 2015 гг.

Fig. 5. Reconstructed profiles of ozone vertical distribution in comparison with the model of Krueger and IASI satellite data for 2014 and 2015

широко применяется при обработке данных эксперимента в различных областях естествознания. Линейное сглаживание является частным случаем числовой фильтрации обладающего случайной ошибкой сигнала фильтром с прямоугольным окном и весовыми коэффициентами, равными единице.

Разработанные методика и программа были использованы при восстановлении профилей ВРО в верхней тропосфере – нижней стратосфере на длинах волн зондирования 299/341 нм. Примеры восстановленных профилей озона с температурной и аэрозольной коррекцией за 2014 и 2015 гг. в сравнении с моделью Крюгера [21] и спутниковыми данными IASI представлены на рис. 5.

Результаты лидарных измерений на длинах волн 299 и 341 нм согласуются с модельными оценками, которые указывают на приемлемые точности зондирования озона в диапазоне высот около 6–18 км. Стоит отметить, что восстановленные профили высотного распределения концентрации озона больше тяготеют к профилям спутниковых данных, чем к модели Крюгера.

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Выбранная пара длин волн 299/341 нм является наиболее информативной для проведения измерений профилей ВРО в тропосфере – нижней стратосфере. Лидар, работающий на этих дли-

нах волн, является единственным в России. При этом излучение на двух длинах волн реализуется в одном лазерном пучке от одного лазерного источника, что значительно упрощает процесс юстировки лидара и работу с ним по сравнению с лидарами, использующими два различных лазерных источника.

2. Разработанная методика и программа восстановления профилей вертикального распределения озона с учетом температурной и аэрозольной коррекции позволяет получать профили ВРО в диапазоне высот 6–18 км при лидарном зондировании атмосферы методом дифференциального поглощения.
3. Результаты лидарных измерений на длинах волн 299 и 341 нм согласуются с модельными оценками и спутниковыми данными, которые указывают на приемлемые точности зондирования озона в тропосфере – нижней стратосфере.

Работа выполнена при поддержке Российского научно-го фонда (Соглашение № 14-27-00022 в части разработки методики восстановления профилей вертикального распределения озона и Соглашение № 15-17-10001 в части проведения лидарных измерений озона) и гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-4714.2014.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лидарное зондирование малых газовых составляющих атмосферы методом дифференциального поглощения: Результаты моделирования и экспериментов / Д.А. Бочковский, О.А. Романовский, О.В. Харченко, С.В. Яковлев // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 2. – С. 127–136.
2. Romanovskii O.A. Airborne DIAL Lidar Gas Analysis of the Atmosphere by Middle IR Gas Lasers: Numerical Modeling // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2008. – V. 17. – № 2. – P. 131–137.
3. Bochkovskii D.A., Matvienko G.G., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V. Laser Remote Measurements of Atmospheric Gas Components by DIAL: Modeling and Experiments // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2014. – V. 23. – № 3. – P. 156–163.
4. Observations of stratosphere-to-troposphere transport events over the eastern Mediterranean using a ground-based lidar system / E. Galani, D. Balis, P. Zanis, C. Zerefos, A. Papayannis, H. Wernli, E. Gerasopoulos // J. Geophys. Res. – 2003. – V. 108. – № D12. – P. STA12-1-STA12-10.
5. Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide / Masahisa Nakazato, Tomohiro Nagai, Tetsu Sakai, Yasuo Hirose // Appl. Opt. – 2007. – V. 46. – № 12. – P. 2269–2279.
6. Лидарная система для зондирования стратосферного и тропосферного озона на основе эксимерных лазеров / В.С. Букреев, С.К. Вартапетов, И.А. Веселовский, А.С. Галустов, Ю.М. Ковалев, А.М. Прохоров, Е.С. Светогоров, С.С. Хмелевцов, Ч.Х. Ли // Квантовая электроника. – 1994. – Т. 21. – № 6. – С. 591–596.
7. High resolution lidar measurements of stratosphere–troposphere exchange / H. Eisele, H.E. Scheel, R. Sladkovic, T. Trickl // J. Atmos. Sci. – 1999. – V. 56. – № 3. – P. 319–330.
8. Первые результаты лидарных наблюдений стратосферного озона над Западной Сибирью / А.В. Ельников, В.В. Зуев, В.Н. Маричев, С.И. Царегородцев // Оптика атмосферы и океана. – 1989. – Т. 2. – № 09. – С. 995–996.
9. Molina L.T., Molina M.T. Absolute absorption cross section of ozone in the 185-nm to 350-nm wavelength range // J. Geophys. Res. – 1988. – V. 91. – № D13. – P. 14.501–14.508.
10. Optical systems design for a stratospheric lidar system / I.S. McDermid, T.D. Walsh, A. Deslis, M.L. White // Appl. Opt. – 1995. – V. 34. – № 27. – P. 6201–6210.
11. Godin S., David C., Lakoste A.M. Systematic ozone and aerosol lidar measurements at OHP (44° N, 6° E) and Dumont // Abstr. of Papers of the 17-th ILRC. – Sendai, Japan, 1994. – P. 409–412.
12. DIAL ozone measurements at the Met. Obs. Hohenpeißenberg: Climatology and trends / H. Claude, F. Scönnenborn, W. Streinbrecht, W. Vandersee // Proc. 17-th ILRC Abst. of papers. – Sendai, Japan, 1994. – P. 413–415.
13. The Antarctic ozone LIDAR system / L. Stefanutti, F. Castagnoli, M. Del Guasta, M. Morandi, V.M. Sacco, L. Zuccagnoli, S. Godin, G. Megie, J. Porteneuve // Appl. Phys. – 1992. – V. B55. – P. 3–12.
14. DIAL system for measurements of stratospheric ozone at Buenos Aires / A.F. Pazmino, M.B. Lavorato, G.J. Fochesatto et al. // In: Advances in Laser Remote Sensing. Selected Papers presented at the 20-th ILRC. – France, Vichy, 2000. – P. 373–376.
15. Измерение концентрации озона в нижней тропосфере лидаром дифференциального поглощения / В.С. Букреев, С.К. Вартапетов, И.А. Веселовский, Ю.С. Шаблин // Квантовая электроника. – 1996. – Т. 23. – № 4. – С. 363–367.
16. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. – М.: Мир, 1987. – 552 с.
17. Ozone UV spectroscopy. II. Absorption cross-sections and temperature dependence / J. Malicet, D. Daumont, J. Charbonnier, C. Parisse, A. Chakir, J. Brion // Journal of Atmospheric Chemistry. – 1995. – V. 21. – Iss. 3. – P. 263–273.

18. The Huggins band of ozone: Assignment of hot bands / H. Zhu, Z.W. Qu, S.Y. Grebenshchikov, R. Schinke, J. Malicet, J. Brion, D. Daumont // *Journal of Chemical Physics*. – 2005. – V. 122. – Iss. 2. – Article Number 024310.
19. Ельников А.В., Зувев В.В. Двухчастотное лазерное зондирование озона стратосферы в условиях ее сильного аэрозольного наполнения // *Оптика атмосферы и океана*. – 1992. – Т. 5. – № 10. – С. 1050–1054.
20. Программа для восстановления высотных профилей озона из данных лазерного зондирования атмосферы: пат. Рос. Федерации № 2014661049; заявл. 04.09.14; опубл. 22.10.14. – 1 с.
21. Krueger A.J., Minzner R.A. Mid-latitude ozone model for the 1976 U.S. Standard Atmosphere // *J. Geophys. Res.* – 1976. – V. 81. – № D24. – P. 4477–4481.

Поступила 17.06.2015 г.

UDC 551.510.532; 551.501.816

LIDAR SENSING OF OZONE IN THE UPPER TROPOSPHERE – LOWER STRATOSPHERE: TECHNIQUE AND RESULTS OF MEASUREMENTS

Vladimir D. Burlakov,

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: moto@iao.ru

Sergey I. Dolgii,

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: dolgii@iao.ru

Alexey A. Nevzorov,

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: naa@iao.ru

Alexey V. Nevzorov,

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: nevzorov@iao.ru

Oleg A. Romanovskii,

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634021, Russia; National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: roa@iao.ru

Olga V. Kharchenko,

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev square, Tomsk, 634021, Russia. E-mail: olya@iao.ru

Prediction of atmospheric ozone layer, which is the valuable and irreplaceable geo asset, is currently the important scientific and engineering problem. The relevance of the research is caused by the necessity to develop laser remote methods for sensing ozone to solve the problems of controlling the environment and climatology.

The main aim of the research is to develop the technique for laser remote ozone sensing in the upper troposphere – lower stratosphere by differential absorption method for temperature and aerosol correction and analysis of measurement results.

Research methods: the method of differential absorption based on the effect of resonant absorption of laser radiation within a selective absorption lines of the investigated gas components.

Results. The paper introduces the technique of recovering profiles of ozone vertical distribution considering temperature and aerosol correction in atmosphere lidar sounding by differential absorption method. The authors have determined wavelengths, promising to measure ozone profiles in the upper troposphere – lower stratosphere. To obtain promptly the results of the methodology the authors developed the software based on the method of differential absorption with user-friendly interface in the programming language C# for the Windows 7 operating system using the lidar measurements. The software allows calculating the recovery profiles of the vertical ozone distribution based on aerosol and temperature correction. The recovered ozone profiles, resulting from the program operation, were compared with IASI satellite data and Kruger model. The results of applying the developed technique to recover the profiles of ozone vertical distribution considering temperature and aerosol correction in the altitude range of 6–18 km in lidar atmosphere sounding by differential absorption method confirm the prospects of using the selected wavelengths of ozone sensing 341 and 299 nm in the ozone lidar.

Key words:

Lidar, ozone, atmosphere, differential absorption, program.

The research was supported by the Russian Science Foundation (Agreement № 14–27–00022 in regards to the development of sensing techniques and Agreement № 15–17–10001 in parts of the ozone lidar and measurements), grant of the President of the RF on support of leading scientific schools SS-4714.2014.5.

REFERENCES

- Bochkovskii D.A., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V. Lidarnoye zondirovanie malyykh gasovykh sostavlyayushchikh atmosfery metodom differentsialnogo pogloshcheniya: Resultaty modelirovaniya i experimentov [Lidar sounding of small gas components of the atmosphere by method of differential absorption: Results of modeling and experiments]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 2, pp. 127–136.
- Romanovskii O.A. Airborne DIAL Lidar Gas Analysis of the Atmosphere by Middle IR Gas Lasers: Numerical Modeling. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2008, vol. 17, no. 2, pp. 131–137.
- Bochkovskii D.A., Matvienko G.G., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V. Laser Remote Measurements of Atmospheric Gas Components by DIAL: Modeling and Experiments. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2014, vol. 23, no. 3, pp. 156–163.
- Galani E., Balis D., Zanis P., Zerefos, C., Papayannis A., Wernli H., Gerasopoulos E. Observations of stratosphere-to-troposphere transport events over the eastern Mediterranean using a ground-based lidar system. *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, no. D12, pp. STA12–1–STA12–10.
- Masahisa Nakazato, Tomohiro Nagai, Tetsu Sakai, Yasuo Hirose. Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide. *Appl. Opt.*, 2007, vol. 46, no. 12, pp. 2269–2279.
- Bukreev V.S., Vartapetov S.K., Veselovskii I.A., Galustov A.S., Kovalev Yu.M., Prokhorov A.M., Svetogorov E.S., Khmelevtsov S.S., Lee Ch.H. Lidarnaya sistema dlya zondirovaniya stratosfernogo i troposfernogo ozona na osnove eksimernykh lazerov [Excimer-laser-based lidar system for stratospheric and tropospheric ozone measurements]. *Quantum Electron*, 1994, vol. 24, no. 6, pp. 546–551.
- Eisele H., Scheel H.E., Sladkovic R., Trickl T. High resolution lidar measurements of stratosphere – troposphere exchange. *J. Atmos. Sci.*, 1999, vol. 56, no. 3, pp. 319–330.
- Elnikov A.V., Zuev V.V., Marichev V.N., Tsaregorodtsev S.I. Pervye rezultaty lidarnykh izmereniy stratosfernogo ozona nad zapadnoy Sibiriyu [First results of lidar observations of stratospheric ozone above Western Siberia]. *Atmospheric and oceanic optics*, 1989, vol. 2, no. 09, pp. 841–842.
- Molina L.T., Molina M.T. Absolute absorption cross section of ozone in the 185-nm to 350-nm wavelength range. *J. Geophys. Res.*, 1988, vol. 91, no. D13, pp. 14.501–14.508.
- McDermid I.S., Walsh T.D., Deslis A., White M.L. Optical systems design for a stratospheric lidar system. *Appl. Opt.*, 1995, vol. 34, no. 27, pp. 6201–6210.
- Godin S., David C., Lakoste A.M. Systematic ozone and aerosol lidar measurements at OHP (44° N, 6° E) and Dumont. *Abstr. of Papers of the 17-th ILRC*. Sendai, Japan, 1994, pp. 409–412.
- Claude H., Scönenborn F., Streinbrecht W., Vanderee W. DIAL ozone measurements at the Met. Obs. Hohenpeißenberg: Climatology and trends. *Proc. 17-th ILRC Abst. of papers*. Sendai, Japan, 1994, pp. 413–415.
- Stefanutti L., Castagnoli F., Del Guasta M. Morandi M., Sacco V.M., Zuccagnoli L., Godin S., Megie G., Porteneuve J. The Antarctic ozone LIDAR system. *Appl. Phys.*, 1992, vol. B55, pp. 3–12.
- Pazmino A.F., Lavorato M.B., Fochesatto G.J. DIAL system for measurements of stratospheric ozone at Buenos Aires. *Advances in Laser Remote Sensing. Selected Papers presented at the 20-th ILRC*. France, Vichy, 2000, pp. 373–376.
- Bukreev V.S., Vartapetov S.K., Veselovskiy I.A., Shablin Yu.S. Izmereniya ozonovoy kontsentratsii v nizhey troposphere lidarnom differentsialnogo pogloshcheniya [Measurement of ozone concentration in the lower troposphere by a differential absorption lidar system]. *Quantum Electron*, 1996, vol. 26, no. 4, pp. 355–359.
- Mezheris R. Lasernoe distansionoe zondirovanie. Moscow, 1987. 552 p.
- Malicet J., Daumont D., Charbonnier J., Parisse C., Chakir A., Brion J. Ozone UV spectroscopy. II. Absorption cross-sections and temperature dependence. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1995, vol. 21, Iss. 3, pp. 263–273.
- Zhu H., Qu Z.W., Grebenshchikov S.Y., Schinke R., Malicet J., Brion J., Daumont D. The Huggins band of ozone: Assignment of hot bands. *Journal of Chemical Physics*, 2005, vol. 122, Iss. 2, Article Number 024310.
- Elnikov A.V., Zuev V.V. Dvukhchastotnoe lazernoe zondirovanie ozona stratosfery v usloviyakh ee silnogo aerolnogo napolneniya [Bifrequency laser sounding of stratospheric ozone under conditions of high degree of aerosol loading]. *Atmospheric and oceanic optics*, 1992, vol. 5, no. 10, pp. 681–683.
- Nevzorov A.V., Nevzorov A.A., Romanovskii O.A. Programma dlya ustanovleniya vysotnykh profiley ozona iz dannykh lazernogo zondirovaniya atmosfery [Program for restoration of high-rise profiles of ozone from data of laser sounding of the atmosphere]. *Patent RF no. 2014661049*, 2014.
- Krueger A.J., Minzner R.A. Mid-latitude ozone model for the 1976 U.S. Standard Atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1976, vol. 81, no. D24, pp. 4477–4481.

Received: 17 June 2015.

УДК 556.06:551.482.212

О МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОНОВЫХ И АНОМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Савичев Олег Геннадьевич,

д-р географ. наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: OSavichev@mail.ru

Нгуен Ван Луен,

аспирант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: Luyennv@yahoo.com

Актуальность исследования определяется необходимостью объективного определения фоновых и аномальных гидрогеохимических показателей как при проведении геохимических поисков полезных ископаемых, так и при оценке геоэкологического состояния водных объектов и их водосборов. Применяемые на практике методики основаны на использовании методов математической статистики и теории вероятностей, но недостаточно обоснованы с точки зрения физического смысла исследуемых процессов. Вследствие этого в ряде случаев возрастает объём и стоимость полевых и лабораторных работ без адекватного увеличения эффективности исследований.

Цель исследования: разработка и обоснование методики определения фоновых и аномальных значений гидрогеохимических показателей на основе анализа взаимосвязей между водным стоком и химическим составом вод.

Методы исследования: географо-гидрологический и статистические методы, методы химической термодинамики.

Результаты и выводы. Выполнен анализ взаимосвязей между гидрогеохимическими и гидрологическими показателями. На основе результатов разработана имитационно-статистическая модель формирования химического состава поверхностных и подземных вод и предложена методика определения фоновых и аномальных значений гидрогеохимических показателей. Проведена её апробация по данным гидрологическим и гидрогеохимическим наблюдений в водосборных бассейнах средних рек Сибири (Российская Федерация) с привлечением гидрогеохимических материалов, полученных в северной части Вьетнама. Показано, что: 1) гидрогеохимические показатели в общем случае подчиняются логнормальному распределению вероятностей; 2) математическое ожидание концентрации вещества, аппроксимируемое средним геометрическим, может рассматриваться как «фоновое» значение, которое отражает условно равновесное состояние системы «вода–порода» в статистически однородных условиях; 3) стандартное отклонение концентрации вещества является линейной функцией произведения соответствующего среднего геометрического значения и коэффициента вариации расходов воды. Практическое определение фоновых концентраций растворённых веществ сводится к определению доверительного интервала для среднего геометрического, а аномальных концентраций – по «правилу двух сигм» для логнормального распределения вероятностей. При этом: 1) среднее геометрическое тем больше, чем меньше среднесуточный модуль водного стока; 2) границы интервала расширяются при увеличении вариации водного стока (суммарного или подземного).

Ключевые слова:

Фоновые концентрации, аномальные концентрации, гидрогеохимические показатели, водный сток, имитационно-статистическая модель химического состава вод.

Введение

Объективное определение фоновых и аномальных значений гидрохимических показателей – одна из важнейших задач гидрохимии, геохимических поисков полезных ископаемых и геоэкологии. Разработке соответствующих методов и их теоретическому обоснованию посвящено большое количество работ, среди последних из которых следует отметить [1–7]. На практике в последние десятилетия обычно применяется подход, в соответствии с которым: 1) по результатам статистического анализа или априори принимается гипотеза о нормальном или логнормальном законе; 2) для участков без явного антропогенного влияния рассчитывается среднее арифметическое C_a или среднее геометрическое C_g соответственно; 3) выполняется оценка заданного доверительного интервала

для C_a или C_g ; 4) в качестве фонового значения C_b принимается C_a или C_g , либо верхняя граница доверительного интервала; 5) аномальными считаются значения, выходящие за пределы доверительного интервала; 6) проводится комплексная оценка превышения концентраций веществ в иных водных объектах относительно установленного фона [8–11].

При всей простоте и логичности этой схемы не вполне очевиден её физический смысл, отражающий взаимосвязи между компонентами окружающей среды, гидрологическими и геохимическими процессами. Как следствие, объём гидрогеохимических работ может быть существенно завышен при том, что полученные материалы далеко не всегда убедительны и однозначны. В связи с этим авторами в рамках расширения ранее выполнен-

ных исследований [12–15] был проведён анализ взаимосвязей между гидрологическими и гидрохимическими показателями, на основе которого предложена методика определения фоновых и аномальных значений гидрогеохимических показателей. Апробация этой методики проведена по материалам гидрогеохимических и гидрологических наблюдений в Сибири (Российская Федерация) и Северном Вьетнаме.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим систему «вода–порода», сформированную под влиянием природных и антропогенных факторов в течение статистически однородного периода. Состояние этой системы в целом неравновесно, но отдельные её компоненты квазиравновесны. Время изменения термодинамических параметров таких компонентов больше времени релаксации в них, но существенно меньше времени, за которое устанавливается равновесие во всей системе [3, 16]. При этом в отдельном компоненте (или комплексе компонентов) протекает N_s химических реакций, которые можно объединить в одну суммарную реакцию в соответствии с выражением:

$$\Delta G_T = RT \left(\sum_{i=1}^{N_s} \ln \Pi_i - \ln K_T^0 \right), \quad (1)$$

где ΔG_T и K_T^0 – общее изменение свободной энергии системы и суммарная константа равновесия при заданной температуре T ; Π_i – суммарное произведение активностей компонентов, участвующих в каждой из реакций (общее количество веществ – N_s+1). При использовании уравнения Дебая–Хюккеля для описания связей между активностью иона и его концентрацией уравнение (1) для концентрации искомого вещества C_p может быть упрощено и приведено к виду [12]:

$$\ln C_p \approx b_0 - \sum_j^{N_s} b_j \ln C_j, \quad (2)$$

где b_0, b_j – константы. Концентрация C_x может рассматриваться как случайная величина, причём параметр N_s в общем случае принимает достаточно большие значения. С учётом этого можно предположить, что имеет место нормальное распределение вероятностей $\ln C$ с математическим ожиданием $E(\ln C)$ и дисперсией $\sigma^2(\ln C)$, причём $E(\ln C)$ рассчитывается как среднее арифметическое для выборки из N_p значений $\ln C$ (N_p – количество фактически учитываемых веществ; как правило, $N_p < N_s$). Соответственно, распределение вероятностей концентраций C в изолированной системе «вода–порода» ориентировочно можно рассматривать как логнормальное с дисперсией $\sigma^2(c)$ и математическим ожиданием, равным среднему геометрическому C_g и связанным со средним арифметическим C_a соотношением [17]:

$$E(\ln C) = \ln(C_a) - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\sigma^2(C)}{C_a^2} + 1 \right). \quad (3)$$

Для подтверждения этой гипотезы была выполнена проверка согласия эмпирической и теоретических кривых распределения вероятностей суммы главных ионов Σ_{mi} ($\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Na}^+, \text{K}^+, \text{HCO}_3^-, \text{SO}_4^{2-}, \text{Cl}^-$) в водах средних рек Сибири (реки с площадью водосбора 2000–50000 км², отражающие зональные условия формирования стока), подтверждающая возможность использования подобного подхода [14]. Проверка проводилась согласно [18] с использованием критерия Колмогорова–Смирнова mKS и $n\omega^2$ при уровне значимости 5 %.

$$n\omega^2 = \sum_{i=1}^N (P_{e,i} - P_{t,i})^2, \quad (4)$$

$$mKS = \max_{i=1, \dots, N} |P_{e,i} - P_{t,i}| \sqrt{N}, \quad (5)$$

где $P_{e,i}$ и $P_{t,i}$ – эмпирическая и теоретическая вероятности; N – объём выборки. В результате наилучшее соответствие (минимальные фактические значения mKS и $n\omega^2$ меньше критических значений) было установлено именно для логнормального распределения, что согласуется с известными выводами ряда авторов [9] о логнормальном распределении многих химических элементов в горных породах (табл. 1).

Таблица 1. Результаты проверки согласия эмпирической и теоретических кривых распределения вероятностей суммы главных ионов в водах средних рек Сибири [14]

Table 1. Results of consent check of the empirical and theoretical curves of probabilities distribution of the sum of the main ions in river waters of Siberia [14]

Природная зона Natural zone	Среднее геометрическое (объём выборки) Geometrical mean (sample volume)	Критерий согласия (4, 5) Fitting criterion (4, 5)	Значения критериев, полученных для закона распределения вероятностей Values of the criteria obtained for the probability distribution law			
			нормальный normal	логнормальный lognormal	гамма gamma	экспоненциальный exponential
тундра tundra	24,9 (27)	$n\omega^2$	1,06	0,26	2,50	0,47
		mKS	1,63	1,09	3,10	1,33
лесотундра forest tundra	122,5 (22)	$m\omega^2$	0,90	0,46	1,31	0,59
		mKS	1,93	1,48	2,12	1,43
тайга taiga	187,3 (1370)	$n\omega^2$	5,28	0,36	33,83	0,83
		mKS	3,99	1,39	9,13	1,78
лесостепь forest steppe	429,5 (212)	$n\omega^2$	0,44	0,17	1,62	4,32
		mKS	1,06	0,89	1,92	3,74
степь steppe	697,2 (63)	$n\omega^2$	0,16	0,07	7,77	0,93
		mKS	0,80	0,59	4,17	1,70
горные районы mountainous regions	97,8 (690)	$n\omega^2$	3,84	0,32	0,82	5,36
		mKS	0,76	0,29	0,29	0,84

Для описания изменений концентрации вещества во времени t относительно условно устойчивого состояния (с математическим ожиданием, равным C_g) в гидрохимических исследованиях достаточно часто используется однородное дифференциальное уравнение (6), а в гидрологии для изменений расхода воды Q – уравнение (7). Используя так называемое «цепное правило» дифференцирования сложной функции, это позволяет записать уравнение (8):

$$\frac{dC}{dt} = k_c C, \quad (6)$$

$$\frac{dQ}{dt} = k_Q Q, \quad (7)$$

$$\frac{dC}{dQ} = \frac{k_c}{k_Q} \frac{C}{Q}, \quad (8)$$

где k_c и k_Q – значения удельной скорости изменения концентрации вещества и расхода воды соответственно. Величина k_c обычно рассматривается как экспоненциальная или степенная функция температуры воды и/или скорости течения [10, 19, 20]. Величина k_Q в общем случае является нелинейной функцией расхода воды, хотя часто принимается как константа [6, 17]. С учётом этого представим отношение k_c и k_Q в виде нелинейной функции от расхода воды (9), что позволяет в результате интегрирования (8) получить уравнение (10).

$$\frac{k_c}{k_Q} = k_0 + k_1 \left(\frac{Q}{Q_0} \right)^{k_2}, \quad (9)$$

$$Y = X^{k_0} \exp \left(\frac{k_1}{k_2} (X^{k_2} - 1) \right), \quad (10)$$

где k_0, k_1, k_2 – эмпирические коэффициенты; $Y=C/C_0$ и $X=Q/Q_0$ – модульные коэффициенты концентрации и расхода воды; C_0 и Q_0 – математическое ожидание концентрации вещества и расхода воды; математическое ожидание величин Y и X равно 1; стандартное отклонение X представляет собой коэффициент вариации расхода воды $Cv(Q)$.

Используя разложение в ряд Тейлора (до второй производной Y'' с учётом рекомендаций [21]) и принимая математическое ожидание для расхода воды равным его среднему арифметическому, получим выражение для среднего арифметического C_a и стандартного отклонения $\sigma(C)$ в виде:

$$\frac{\tilde{N}_a}{C_0} \approx 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{k_0(k_0 - 1) + k_0 k_1 + k_1^2}{+k_1(k_0 + k_2 - 1) + k_1^2} \right) Cv^2(Q), \quad (11)$$

$$\sigma(C) \approx |k_0 + k_1| C_0 Cv(Q). \quad (12)$$

Очевидно, что (с учётом (3, 11) и приближения $\sqrt{1+x} \approx 1+x/2$) величина C_0 в общем случае лучше аппроксимируется не средним арифметическим, а, как и в случае длительного контакта воды и породы в отсутствие выраженного течения, средним геометрическим (то есть $C_0 \approx C_g$).

Апробация модели (10) проведена по данным совместных гидрологических и гидрохимических наблюдений на реках бассейна реки Обь (р. Андарма – с. Панычево; р. Бакчар – с. Гореловка; р. Большой Юган – с. Угут; р. Вах – с. Лобчинское; р. Верхняя Терсь – с. Осиновое Плёсо; р. Икса – с. Плотниково; р. Иня (нижняя) – с. Кайлы; р. Ишим – г. Петропавловск; р. Кенга – п. Центральный; р. Кеть – п. Максимкин Яр; р. Кия – г. Мариинск; р. Кондома – с. Кузедеево; р. Мрас-Су – г. Мыски; р. Обь – г. Калачинск; р. Пайдугина – с. Берёзовка; р. Парабель – с. Новиково; р. Песчаная – с. Точилюно; р. Тайдон – п. Медвежка; р. Тара – с. Муромцево; р. Тобол – г. Кустанай; р. Тым – с. Напас; р. Уса – г. Междуреченск; р. Четь – с. Конторка; р. Чузик – с. Осипово; р. Шегарка – с. Бабарькино; р. Яя – пгт. Яя), а также р. Турухан – п. Янов Стан (левый приток реки Енисей, лесотундра). Количество использованных при расчётах проб совместных гидрологических и гидрохимических наблюдений – 983. Оценка параметров выполнена методом наименьших квадратов по линеаризованным рядам с предварительным выбором значения k_2 . В результате было получены следующие результаты: квадрат корреляционного отношения между фактическими и вычисленными значениями $R^2=0,63$ (критическое значение $R_k^2=0,36$ [22, 23]; $R^2 > R_k^2$); $k_0=-0,376 \pm 0,011$; $k_1/k_2=-0,010 \pm 0,002$. Параметр k_2 принят в размере (-1,1) при условии достижения максимума R^2 . Фрагмент кривой связи Y и X представлен на рис. 1.

Таким образом, модель (10) может использоваться для объяснения материалов наблюдений, включая случаи, когда сумма главных ионов возрастает сначала одновременно с увеличением модулей водного стока M_Q (от истока реки до какого-либо створа), а затем (вплоть до устья) – обратно пропорционально M_Q . Например, подобное распределение отмечено для ряда малых горных рек, в частности, реки Актру в Российской Федерации (элемент речной системы «Актру–Чуя–Катунь–Обь») и малых водотоков в бассейне р. Хонгха во Вьетнаме [15, 24]. Однако чаще всего измерения и гидрохимические расчёты проводятся при значениях Y и X , соответствующих обратной степенной зависимости (рис. 1), когда экспоненциальной компонентой уравнения (10) можно пренебречь (рис. 2), что позволяет упростить выражение (12) для оценки стандартного отклонения концентраций веществ при отсутствии или недостаточности наблюдений.

В частности, для значений коэффициента вариации расходов воды изученных рек, полученных одновременно с измерением концентраций главных ионов (но при использовании среднемультилетнего стока именно этих водотоков), может быть использовано выражение $\sigma(C)=(0,348 \pm 0,009) C_g Cv(Q)$ при $R^2=0,59$. При этом отметим, что на практике обычно рассчитываются значения коэффициентов вариации характерных расходов воды (средних,

максимальных, минимальных заданной обеспеченности). В связи с этим уравнение (12) было приведено к виду (13) с учётом эмпирической формулы С.Н. Кривцова и М.Ф. Менкеля (по [25]), связывающей коэффициент вариации среднегодовых расходов воды со среднемноголетним модулем водного стока $M_{Q,a}$ и площадью водосбора F . В результате расчётная формула для определения стандартного отклонения суммы главных ионов в водах средних рек в бассейне Оби приобрела вид:

$$\sigma(C) \approx \frac{k_3 C_g}{F^{0,06} M_{Q,a}^{0,27}} \quad (13)$$

где k_3 – эмпирический коэффициент; для средних рек бассейна Оби $k_3=1,18470,106$ при $R^2=0,51$; F – в км², а $M_{Q,a}$ – в л/(с·км²).

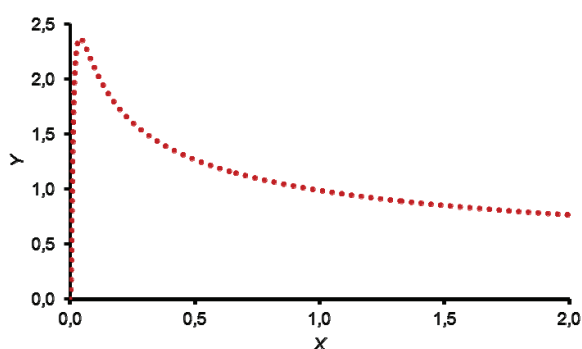


Рис. 1. Фрагмент кривой связи величин Y и X для средних рек в бассейне Оби; $Y=C/C_g$; $X=Q/Q_a$

Fig. 1. Fragment of curve of relation between the parameters Y and X for the average rivers in the Ob river basin; $Y=C/C_g$; $X=Q/Q_a$

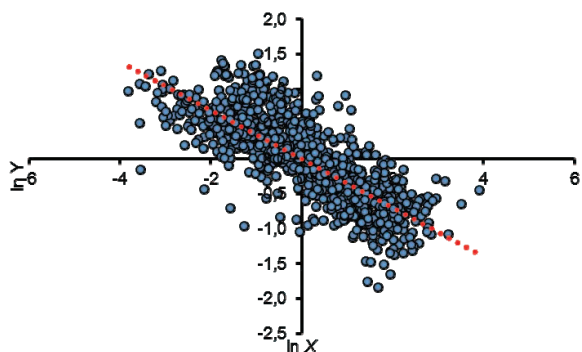


Рис. 2. Зависимость между модульными коэффициентами Y и X для средних рек в бассейне Оби; $\ln Y=(-0,34870,009)$ и $\ln X$; $Y=C/C_g$; $X=Q/Q_a$

Fig. 2. Dependence between the parameters Y and X for the average rivers in the Ob river; $\ln Y=(-0,34870,009)$ и $\ln X$; $Y=C/C_g$; $X=Q/Q_a$

Анализ структуры модели (10) и результатов её апробации показал, что наиболее значительные изменения химического состава вод (свыше 0,5 % по сравнению с предыдущим значением) приурочены к диапазону колебаний модулей водного стока до 0,5–1,0 л/(с·км²) с учётом специфики природных зон [13]. Так, изменения более 5 % наблюдаются при модулях водного стока менее:

0,03 л/(с·км²) – в лесостепи; 0,05 л/(с·км²) – в тайге; 0,04 – в горных районах. Это позволяет предположить, что базовые химические реакции и физико-химические процессы, определяющие основные особенности химического состава вод в соответствии с (1, 2), устанавливаются на стадии формирования склонового, подповерхностного и подземного стока. На стадии руслового стока перечень этих реакций, видимо, меняется в зависимости от скорости движения водных масс (например, в течение года), но уже не так значительно. Причём скорость течения, в свою очередь, зависит от шероховатости и уклонов поверхности (с учётом характерных значений этих параметров для разных природных зон). Вследствие этого при фиксированном модуле водного стока (в [13] было принято значение 1 л/(с·км²)) в зоне тайги время добегания и, соответственно, комплекс реакций и содержание растворённых солей в речных водах будут больше соответствующих показателей для горно-таёжных районов (за счёт меньших уклонов) и меньше, чем для лесотундры и тундры (из-за меньшей шероховатости водосборной поверхности).

Следующая важная задача – обоснование способа определения среднего геометрического значения при отсутствии гидрогеохимических наблюдений, необходимого при проведении гидрохимических расчётов и гидрогеохимических поисков полезных ископаемых. По мнению ряда авторов [5, 20, 26] и результатам анализа гидрогеохимических наблюдений в разных регионах Азии [12, 14], величины C_g и C_s , как и концентрации вещества в момент t , связаны с водным стоком, точнее – с его среднемноголетним значением. Характер этой зависимости может быть раскрыт следующим образом. Предположим, что, во-первых, работа, выполняемая геосистемой (под которой понимается обобщение социально-экономических, природных и природно-антропогенных экологических систем), пропорциональна геостоку (суммарному стоку воды, растворённых, коллоидных и взвешенных веществ, влекомых наносов, тепла, «живого» вещества), значительная часть которого представлена гидрохимическим стоком $G=CQ$. Во-вторых, при отсутствии изменений притока в геосистему вещества и энергии математическое ожидание геостока и его составляющей – гидрохимического стока G_0 с единицы площади водосбора F , не должны существенно меняться, то есть:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{G_0}{F} \right) = 0, \quad (14)$$

или

$$\tilde{N}_g \approx C_s \frac{M_{Q,s}}{M_{Q,a}}, \quad (15)$$

где $M_{Q,a}$ и $M_{Q,s}$ – среднее арифметическое модуля водного стока в настоящее время и в начале функционирования исследуемой геосистемы как единого целого; C_g и C_s – среднее геометрическое концентрации вещества, соответствующее $M_{Q,a}$ и $M_{Q,s}$.

В-третьих, предположим, что $M_{Q,s} = M_{Q,a}^z$, где z – эмпирический коэффициент. Следовательно, решение (14) можно записать:

$$\tilde{N}_g \approx C_s \cdot M_{Q,a}^{z-1}. \quad (16)$$

Применительно к распределению суммы главных ионов в водах изученных 28 рек получено: $R^2=0,55$; $z-1=-0,579 \pm 0,081$; $C_s=383,0$ мг/дм³ (в диапазоне от 324,3 до 452,4 мг/дм³). Выражение (15) по смыслу сопоставимо с коэффициентами водной миграции в интерпретации А.И. Перельмана [9], но имеет более строгое обоснование и может использоваться при сравнении гидрохимических условий в различных водосборных бассейнах (как поверхностных, так и подземных).

Математическое ожидание концентрации вещества, отражающее условно равновесное состояние системы «вода–порода», которое сформировалось под влиянием преимущественно природных факторов, может рассматриваться как «природный фон», а под влиянием природно-антропогенных факторов – как «природно-антропогенный фон». Допустимость этого определения подтверждается при сопоставлении средних геометрических значений суммы главных ионов в водах 28 средних рек Сибири и результатов термодинамического моделирования, направленного на определение активности компонентов раствора, при которых достигается минимум энергии Гиббса. Моделирование выполнено с помощью программного комплекса Solution [27]. В качестве исходного состава вод приняты средние арифметические значения рН, температуры воды, бихроматной окисляемости (БО) (по данным статистического анализа при $R^2 > 0,36$ концентрация фульвокислот принята в размере 31,2 % от величины БО, концентрация гуминовых кислот – 8,3 %), концентраций Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Si , Fe (для суммы главных ионов характерно соотношение $C_g \leq 0,861 \leq C_a$), а получены значения, составляющие в среднем 84 % от среднего геометрического (рис. 3).

С учётом указанного выше определения расчёт фоновой концентрации C_b сводится к: 1) дифференциации веществ по генезису посредством расчёта соотношения суммарного поступления вещества по сосредоточенным (S_c) и распределённым по водосбору источникам загрязнения (S_d) к гидрохимическому стоку G ; к категории «природных» целесообразно отнести вещества, для которых величина $(S_c + S_d)/G$ меньше 5 %, к «преимущественно природным» – при $5 \% \leq (S_c + S_d)/G \leq 20 \%$ [13]; к «природно-антропогенным» – в прочих случаях (границные значения 5 и 20 % выбраны, исходя из допустимых невязок балансовых расчётов [19]); 2) оцениванию доверительного интервала для среднего геометрического:

$$\left[C_g \exp(-\beta) \frac{\sigma(\ln C)}{\sqrt{N}}; C_g \exp(\beta) \frac{\sigma(\ln C)}{\sqrt{N}} \right], \quad (17)$$

где N – объём выборки при наличии гидрохимических наблюдений, а при их отсутствии – объём вы-

борки, использованной для расчёта $M_{Q,a}$ исследуемой реки или реки-аналога; β – квантиль нормального распределения с вероятностью $\alpha/2$; α – уровень значимости. При допущении, что уровень значимости пропорционален минимальной погрешности измерения расходов воды (как важного фактора, определяющего изменчивость концентраций), принимается $\alpha=5\%$, а $\beta=1,96$. С учётом этого нижняя граница определения среднего геометрического суммы главных ионов в исследуемых речных водах в целом составляет 80 % от величины C_g , что примерно и соответствует условно равновесному состоянию (в среднем – 94,4 % от C_{eq}).

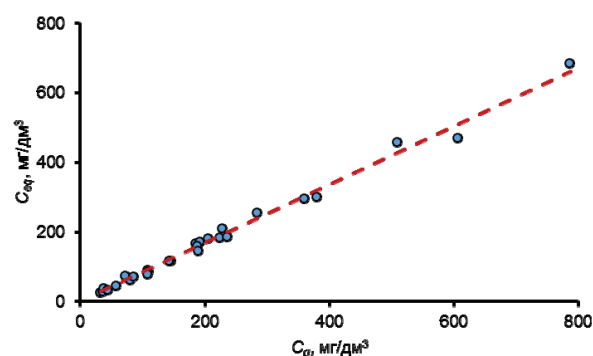


Рис. 3. Соотношение средних геометрических значений C_g и результатов термодинамического моделирования C_{eq} ; исходный состав: средние арифметические значения; результат моделирования: сумма главных ионов близка к среднему геометрическому значению при уравнении связи $C_{eq} = (0,840 \pm 0,010) C_g$; $R^2 = 0,91$

Fig. 3. Ratio of average geometrical values C_g and results of thermodynamic modelling C_{eq} ; initial structure: average arithmetic values; result of modelling: the sum of the main ions is close to average geometrical value at the constraint equation $C_{eq} = (0,840 \pm 0,010) C_g$; $R^2 = 0,91$

Указанная выше процедура является итерационной и предполагает возможность повторного определения среднего геометрического и его доверительного интервала после исключения аномальных значений, под которыми, с учётом логнормального распределения C , понимаются концентрации веществ, выходящие за пределы интервала:

$$[C_g \exp(-\beta\sigma)(\ln C); C_g \exp(\beta\sigma)(\ln C)]. \quad (18)$$

Проверка этого подхода по данным рек Сибири показала, что нижняя граница диапазона (18) составляет примерно на 7 % меньше соответствующих минимальных значений суммы главных ионов, а верхняя граница – в среднем на 26 % выше максимальных значений.

Охарактеризованная выше имитационно-статистическая модель (10, 12, 13, 16–18) позволяет в общих чертах охарактеризовать временные изменения химического состава природных вод, связанные с соответствующими колебаниями водного стока. Дополнительная информация о распределении средних концентраций по длине водотока или территории водосбора может быть получена в результате решения упрощённого уравнения распро-

странения вещества преимущественно за счёт адвективного переноса:

$$\frac{1}{Q_0} \frac{\partial(C_0 Q_0)}{\partial x} = -k_c C_0 \frac{w_0}{Q_0}, \quad (19)$$

где x – пространственная координата; w_0 – математическое ожидание площади сечения потока. Если предположить, что водосбор реки площадью F можно представить как часть кругового кольца внутри сектора с центральным углом γ и радиусом L , а движением водных масс происходит от дуги сектора по направлению к центру условной окружности, то решение уравнения (19) принимает вид:

$$C_0 = C_{0,u} \frac{Y_{0,u}}{Y_0} \left(\frac{F_u}{F} \right)^{1+\eta}, \quad (20)$$

где C_0 и Y_0 – математическое ожидание концентрации вещества и слоя водного стока с водосбора площадью F ; F_u – площадь участка водосбора в истоках реки без выраженного русла; $C_{0,u}$ и $Y_{0,u}$ – математическое ожидание концентрации вещества и слоя водного стока в истоках реки без выраженного русла; $1+\eta$ – коэффициент, отражающий комплекс гидрогеохимических и геоморфологических условий водосбора и соответствующий либо подъёму, либо спаду на кривой связи модульных коэф-

фициентов Y и X (рис. 1); $\eta = \frac{k_y k_c T}{a}$; k_y – коэффи-

циент перехода от слоя стока к условной средней глубине потока; a – коэффициент размерности; T – расчётный период (вывод (20) приведён в [28]).

Физический смысл уравнения (20), являющегося, по сути, уточнением формулы (16), заключается в том, что средние концентрации веществ в воде и донных отложениях при уменьшении дренарованности водосбора и прочих равных гидрологических условиях возрастают при положительных значениях k_c и снижаются при отрицательных. При этом важную роль в формировании химического состава вод играет ещё один важный фактор, учитываемый в (20) лишь косвенно, – сопряжённость в пределах водосбора речной сети и тектонических нарушений. Этот показатель может быть оценён по разности $P(rf) - P(r)P(f)$, где: $P(r)$ – густота речной сети (как вероятность руслового движения поверхностных вод); $P(f)$ – плотность распространения тектонических нарушений в пределах водосбора; $P(rf)$ – вероятность совместного проявления речной сети и тектонических нарушений. Анализ гидрогеохимических условий в Северном Вьетнаме показал следующее: 1) чем больше величина $P(rf) - P(r)P(f)$, тем теснее связь между размещением речной сети и тектонических нарушений ($P(rf) = P(r)f = P(f)r = P(r)P(f)$) и, как правило, больше уровень содержания веществ в поверхностных и подземных водах; 2) указанный эффект усиливается при увеличении соотношения F_u/F [15].

Необходимо отметить, что имитационно-статистическая модель (10, 12, 13, 16–18) с дополни-

ем (20) описывает процессы формирования химического состава не только поверхностных, но и подземных вод. В качестве примера можно привести результаты расчёта средних геометрических значений суммы главных ионов в подземной составляющей стока левых таёжных притоков Оби – рек Чая, Парабель и Васюган. Их анализ свидетельствует о том, что вычисленные средние геометрические значения суммы главных ионов в подземной составляющей речного стока (с учётом уменьшения среднего содержания растворённых солей в подземных водах в весенне-летний период) в целом соответствуют данным о химическом составе подземных вод, участвующих в формировании общего стока (табл. 2).

Выводы

Концентрация растворённого вещества в водной среде определяется сочетанием разных факторов, причём они по отдельности и как единый комплекс являются в целом случайными величинами. Соответственно, случайной величиной является и концентрация вещества. Это позволяет применять при проведении гидрохимических исследований аппарат теории вероятностей и математической статистики с учётом природы геохимических процессов, определяющей в общем случае логнормальное распределение вероятностей концентраций веществ в поверхностных и подземных водах. При этом математическое ожидание концентрации вещества аппроксимируется средним геометрическим и рассматривается как «фоновое» значение, отражающее условно равновесное состояние системы «вода–порода» в статистически однородных условиях.

Один из ключевых факторов формирования химического состава природных и природно-антропогенных вод – интенсивность водообмена, регулирующая время и условия взаимодействий в системе «вода–порода» [3–5]. Наиболее важными характеристиками интенсивности водообмена (с точки зрения его влияния на химический состав вод) являются модуль водного стока (сток воды в единицу времени с единичной площади) и модульные коэффициенты расходов воды (отношение расходов воды в конкретный момент времени или в среднем за какой-либо период к математическому ожиданию). Зависимость между модульными коэффициентами расходов воды и концентрациями вещества в водной среде по виду близка к функции гамма-распределения, но большая часть наблюдений, как правило, соответствует кривой спада, имеющей вид обратной степенной зависимости. Аналогичная зависимость характерна и для средних геометрических значений гидрохимических показателей, но уже с нормой модуля водного стока.

Наиболее значительные изменения химического состава природных вод происходят на стадии формирования склонового, подповерхностного и подземного стока, когда в зависимости от скорости

Таблица 2. Характеристика подземной составляющей водного и гидрохимического стока притоков реки Обь
Table 2. Characteristic of a ground component of water and hydrochemical runoff of tributaries of the Ob river

Показатель Index	Река – пункт River – point		
	р. Чай – с. Подгорное Chaia – Podgornoe	р. Парабель – с. Новиково Parabel – Novikovo	р. Васюган – с. Средний Васюган Vasyugan – Sredny Vasyugan
Период расчёта водного стока Period of calculation of water runoff	1980– 2005	1958– 2005	1980– 2005
Средний модуль подземного стока $M_{Og,a}$ [29], л/с·км ² Average module of groundwater runoff $M_{Og,a}$ [29], l/s·km ²	1,07	1,27	1,58
Коэффициент вариации подземного стока $Cv(Q_g)$ [29] Variation factor of groundwater runoff $Cv(Q_g)$ [29]	0,17	0,17	0,45
Расчётное значение среднего геометрического C_g суммы главных ионов подземном стоке по формуле (16), мг/дм ³ Rating value of geometrical average C_g of the sum of the main ions Σ_{mi} in groundwater runoff by the formula (16), mg/dm ³	368,3	333,5	293,9
Среднее геометрическое C_g^* для Σ_{mi} ($C_g^*=0,861C_g^*$), мг/дм ³ Geometrical average C_g^* for Σ_{mi} ($C_g^*=0,861C_g^*$), mg/dm ³	474,8	360,1	330,2
Среднее арифметическое C_a^* для Σ_{mi} речных вод по данным измерений в декабре–марте [30], мг/дм ³ Arithmetic average C_a^* for Σ_{mi} of river waters by the data of measurements in December–March [30], mg/dm ³	551,5	418,2	383,5
Среднее арифметическое для Σ_{mi} подземных вод отложений неоген-четвертичного возраста [30], мг/дм ³ Arithmetic average for Σ_{mi} of underground waters of Neogene-Quaternary age sediments [30], mg/dm ³	335,6	229,0	122,4
Среднее арифметическое для Σ_{mi} подземных вод отложений палеогенового возраста [30], мг/дм ³ Arithmetic average for Σ_{mi} of underground waters of Paleogene age sediments [30], mg/dm ³	610,5	430,6	412,0
Доля подземных вод в речном стоке [30], % Part of underground waters in river runoff [30], %	29,7	42,7	25,6
Доля притока из отложений неоген-четвертичного возраста в общем подземном стоке [30], % Part of inflow from Neogene-Quaternary age sediments in total ground runoff [30], %	21	6	10
Доля притока из отложений палеогенового возраста в общем подземном стоке [30], % Part of inflow from Paleogene age sediments in total ground runoff [30], %	79	94	90

движения воды формируется комплекс базовых химических реакций и физико-химических процессов, определяющих гидрогеохимический «фон». На стадии руслового стока этот комплекс может меняться, но уже не так значительно. Причём стандартное отклонение гидрохимических показателей прямо пропорционально соответствующему среднему геометрическому и коэффициенту вариации расходов воды. Последняя величина обратно пропорциональна площади водосбора. Соответственно, можно сделать вывод о том, что изменчивость концентраций растворённых веществ несколько уменьшается для больших водных объектов (как поверхностных, так и подземных) по сравнению с меньшими по размеру.

Ещё один аспект влияния водного стока на химический состав вод заключается в увеличении уровней содержания веществ при: 1) усилении сопряжённости речной сети и тектонических нару-

шений; 2) уменьшении отношения общей площади водосбора (в числителе) к его части в истоках реки без выраженной русловой сети (в знаменателе). Обе особенности характеризуют условия взаимодействия воды с горной породой (с первичными алюмосиликатными минералами и продуктами химических реакций).

Практическое определение фоновых концентраций растворённых веществ сводится к определению доверительного интервала для среднего геометрического, а аномальных концентраций – по «правилу двух сигм» для логнормального распределения вероятностей. При этом: 1) среднее геометрическое тем больше, чем меньше среднегого-летнего модуль водного стока (суммарного или подземного); 2) границы интервала расширяются при увеличении вариации водного стока (суммарного или подземного).

Указанные зависимости между интенсивно-

стью водообмена и химическим составом поверхностных и подземных вод необходимо учитывать при оценке качества последних и проведении гидрогеохимических поисков полезных ископаемых в различных природных зонах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы гидрогеохимических поисков рудных месторождений / Б.А. Колотов, С.Р. Крайнов, В.З. Рубейкин, Б.Г. Самсонов. – М.: Недра, 1983. – 199 с.
2. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод: теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
3. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода. В 5 т. Т. 1. Система вода–порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование / отв. ред. С.Л. Шварцев. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 244 с.
4. Shvartsev S.L. Geochemistry of Fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth // *Geochemistry International*. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
5. Зверев В.П. Подземная гидросфера. Проблемы фундаментальной гидрогеологии. – М.: Научный мир, 2011. – 260 с.
6. Loucks D.P., Van Beek E. Water resources systems planning and management. An Introduction to Methods, Models and Applications. – Turin: UNESCO Publishing, printed by Ages Arti Grafiche, 2005. – 679 p.
7. Копылова Ю.Г., Гусева Н.В. Гидрогеохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2014. – 184 с.
8. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. – М.: Недра, 1965. – 228 с.
9. Перельман А.И. Геохимия. – М.: Высшая школа, 1979. – 423 с.
10. Методические указания. Проведение расчётов фоновых концентраций химических веществ в воде водотоков: РД 52.24.622–2001. – М.: Росгидрометслужба, 2001. – 68 с.
11. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1: 200000. – М.: ИМГРЭ, 2002. – 92 с.
12. Савичев О.Г. Фоновые концентрации веществ в речных водах таёжной зоны Западной Сибири // *Вестник Томского государственного университета*. – 2010. – № 334. – С. 169–175.
13. Савичев О.Г. Методология оценки фактического и допустимого влияния хозяйственной деятельности на химический состав и качество пресных природных вод // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 8 (3). – С. 704–708.
14. Савичев О.Г. Региональные особенности химического состава речных вод Сибири и их учёт при нормировании сбросов сточных вод // *Вода: химия и экология*. – 2014. – № 1 (66). – С. 41–46.
15. Савичев О.Г., Нгуен В.Л. Гидроэкологическое состояние междуречья рек Гам и Кау (Северный Вьетнам) // *Известия Томского политехнического университета*. – 2015. – Т. 326. – № 7. – С. 96–103.
16. Grenthe I., Puigdomenech I. Symbols, standards and conventions // *Modelling in aquatic chemistry* / Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. – Paris: Nuclear energy agency, 1997. – P. 35–68.
17. Виссмен У. мл., Харбаф Т.И., Кнэпп Д.У. Введение в гидрологию. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 470 с.
18. Рождественский А.В., Чеботарёв А.И. Статистические методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 424 с.
19. Мелиорация и водное хозяйство: В 5 т. Т. 5. Водное хозяйство / под ред. И.И. Бородавченко. – М.: Агропромиздат, 1988. – 399 с.
20. Справочник по гидрохимии / под ред. А.М. Никанорова. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 391 с.
21. Справочник по прикладной статистике. В 2-х т. Т. 1 / под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 510 с.
22. Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles // *Journal of Hydrology*. – 1970. – № 10 (3). – P. 282–290.
23. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами. – М.: Наука, 1982. – 271 с.
24. Савичев О.Г., Паромов В.В. Химический состав талых ледниковых и речных вод бассейна реки Актру (Горный Алтай) // *География и природные ресурсы*. – 2013. – № 4. – С. 94–100.
25. Чеботарёв Н.П. Учение о стоке. – М.: Изд-во МГУ, 1962. – 406 с.
26. Алёкин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 444 с.
27. Савичев О.Г., Колоколова О.В., Жуковская Е.А. Состав и равновесие донных отложений р. Томь с речными водами // *Геоэкология*. – 2003. – № 2. – С. 108–119.
28. Савичев О.Г., Домаренко В.А. Закономерности изменения химического состава речных отложений и их использование в поисках полезных ископаемых // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 6 (3). – С. 520–525.
29. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections. Ch. 4 / A.I. Shiklomanov, R.B. Lamers, D.P. Lettenmaier, Yu.M. Polischuk, O.G. Savichev, L.G. Smith // *Environmental Changes in Siberia: Regional Changes and their Global Consequences* / Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. – Dordrecht: Springer, 2013. – P. 111–154.
30. Савичев О.Г. Подземная составляющая стока рек бассейна Средней Оби // *Мелиорация и водное хозяйство*. – 2010. – № 1. – С. 36–39.

Поступила 10.09.2015 г.

UDC 556.06:551.482.212

THE TECHNIQUE OF DETERMINING BACKGROUND AND EXTREME VALUES OF HYDROGEOCHEMICAL PARAMETERS

Oleg G. Savichev,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: OSavichev@mail.ru

Nguen Van Luen,

Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: Luyennv@yahoo.com

The relevance of the research is caused by the necessity of objective definition of background and extreme hydrogeochemical parameters both at geochemical searches of minerals, and at estimation of a geoecological condition of water objects and their basins. The techniques, which are applied, are based on use of methods of mathematical statistics and probability theory, but they are insufficiently proved from the point of view of physical sense of researched processes. Therefore, in some cases the volume and cost of field and laboratory works grow without adequate increase in efficiency of researches.

The aim of the research is to develop and substantiate a technique of determining the background and extreme values of hydrogeochemical parameters on the basis of the analysis of interrelations between a water runoff and chemical composition of waters.

Methods of the research: geography-hydrological and statistical methods, methods of chemical thermodynamics.

Results and conclusions. The authors have analyzed the interrelations between hydrogeochemical and hydrological parameters. On the basis of the results the physical-statistical model of formation of chemical composition of surface and ground waters is developed and the technique for defining background and extreme values of hydrogeochemical parameters is offered. It was approved by the data of hydrological and hydrogeochemical observations in basins of the average rivers of Siberia (Russian Federation) and the hydrogeochemical data obtained in northern part of Vietnam. It was shown that: 1) hydrogeochemical parameters generally submit to log-normal distribution; 2) the expected value of substance concentration approximated by average geometrical, can be considered as «background» value which reflects conditionally the equilibrium condition of the system «water-rock» in statistically homogeneous conditions; 3) the standard deviation of substance concentration is the linear function of corresponding average geometrical value and the coefficient of water runoff variation. Practical definition of background concentration of the dissolved substances is reduced to definition of a confidence interval for average geometrical, and extreme concentration is reduced to definition by «the rule of two standard deviation» for log-normal distribution. Thus: 1) the average geometrical is more than less annual water runoff; 2) borders of the interval extend at increase in water runoff (total or ground) variation.

Key words:

Background concentration, extreme concentration, hydrogeochemical parameters, water runoff, physical-statistical model of a chemical composition of waters.

The research was financially supported by the Government of the Russian Federation (project no. 14.Z50.31.0012), Tomsk Polytechnic University (project VIU_VAF_144_2014) and Russian Foundation for Basic Research (grant RFBR 13-05-98045_p_cubup_a).

REFERENCES

- Kolotov B.A., Krainov S.R., Rubeikin V.Z., Samsonov B.G. *Osnovy gidrokhemicheskikh poiskov rudnykh mestorozhdeniy* [Bases of hydrogeochemical searches of ore deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 199 p.
- Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod: teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of ground waters: theoretical, applied and environmental Aspects]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 677 p.
- Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda-poroda. T. 1. Sistema voda-poroda v zemnoy kore: vzaimodeystvie, kinetika, ravnovesie, modelirovanie* [Geological evolution and self-organizing of water-rock system. Vol. 1. Water-rock system in earth crust: interaction, kinetic, equilibrium, modelling]. Ed. by S.L. Shvartsev. Novosibirsk, SB RAS Press, 2005. 244 p.
- Shvartsev S.L. Geochemistry of Fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
- Zverev V.P. *Podzemnaya gidrosfera. Problemy fundamentalnoy gidrogeologii* [Ground hydrosphere. Problems of fundamental hydrogeology]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2011. 260 p.
- Loucks D.P., Van Beek E. *Water resources systems planning and management. An Introduction to Methods, Models and Applications*. Turin, UNESCO Publishing, printed by Ages Arti Grafiche, 2005. 679 p.
- Kopylova Yu.G., Guseva N.V. *Gidrogeokhimicheskie metody poiskov mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Hydrogeochemical methods of searching ore deposits]. Tomsk, Tomsk Polytechnic university Publ. house, 2014. 184 p.
- Instruktsiya po geokhimicheskim metodam poiskov rudnykh mestorozhdeniy* [The instruction on geochemical methods of searching ore deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1965. 228 p.
- Perelman A.I. *Geokhimiya* [Geochemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1979. 423 p.
- Metodicheskie ukazaniya. Provedenie raschetov fonovykh kontsentratsiy khimicheskikh veshchestv v vode vodotokov* [Methodical instructions. Carrying out the calculations of background concentration of chemical substances in river waters]. RD 52.24.622–2001. Moscow, Rosgidromet publ., 2001. 68 p.
- Trebovaniya k proizvodstvu i rezultatam mnogotselevogo geokhimicheskogo kartirovaniya masshtaba 1:200000* [Requirements to multi-purpose geochemical mapping of scale 1:200000 and its results]. Moscow, IMGRE Press, 2002. 92 p.
- Savichev O.G. Fonovye kontsentratsii veshchestv v rechnykh vodakh taezhnoy zony Zapadnoy Sibiri [Background concentration of substances in river waters of taiga zone of Western Siberia].

- Vestnik Tomskogo universiteta – Bulletin of Tomsk state university*, 2010, no. 334, pp. 169–175.
13. Savichev O.G. Metodologiya otsenki fakticheskogo i dopustimogo vliyaniya khozaystvennoy deyatel'nosti na khimicheskiy sostav i kachestvo presnykh prirodnykh vod [The methodology of estimation of actual and allowable influence of economic activities on chemical composition and quality of fresh natural waters]. *Fundamentalnye issledovaniya – Fundamental research*, 2013, no. 8 (3), pp. 704–708.
 14. Savichev O.G. Regionalnye osobennosti khimicheskogo sostava rechnykh vod Sibiri i ikh ucheta pri normirovani sbrosov stochnykh vod [Regional features of chemical composition of river waters in Siberia and their account at normalization of dumps of sewage]. *Voda: khimia i ekologiya – Water: chemistry and ecology*, 2014, no. 1 (66), pp. 41–46.
 15. Savichev O.G., Nguen V.L. Gidroekologicheskoe sostoyanie mezhdurechya rek Gam i Kau (Severnyy Vyetnam) [Hydroecological condition of Gam and Kau rivers interfluvium (Northern Vietnam)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 7, pp. 96–103.
 16. Grenthe I., Puigdomenech I. Symbols, standards and conventions. *Modelling in aquatic chemistry*. Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. Paris, Nuclear energy agency, 1997. pp. 35–68.
 17. Viessman W., Jr, Harbaugh T.E., Knapp J.W. *Vvedenie v gidrologiyu* [Introduction to hydrology]. Leningrad, Gidrometizdat Publ., 1979. 470 p.
 18. Rozhdestvenskiy A.V., Chebotarev A.I. *Statisticheskie metody v gidrologii* [Statistical methods in a hydrology]. Leningrad, Gidrometizdat Publ., 1974. 424 p.
 19. *Melioratsia i vodnoe khozaystvo*. T. 5. Vodnoe khozaystvo [Land improvement and water management. Vol. 5. Water management]. Ed. by I.I. Borodavchenko. Moscow, Agropromizdat Publ., 1988. 399 p.
 20. *Spravochnik po gidrokhimii* [Handbook in hydrochemistry]. Ed. by A.M. Nikanorov. Leningrad, Gidrometizdat Publ., 1989. 391 p.
 21. *Spravochnik po prikladnoy statistike* [Handbook in applicable mathematics]. Eds. W. Lederman, E. Lloyd. Moscow, Finansy i statistika, 1989. Vol. 1, 510 p.
 22. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, no. 10 (3), pp. 282–290.
 23. Kritsky S.N., Menkel M.F. *Gidrologicheskie osnovy upravleniya vodokhozaystvennymi sistemami* [Hydrological bases of management of water-economic systems]. Moscow, Nauka, 1982. 271 p.
 24. Savichev O.G., Paromov V.V. Khimicheskiy sostav talykh lednikovyykh i rechnykh vod basseyna reki Aktru (Gornyy Altay) [Chemical composition of thawed glacial and river waters of the Aktru river basin (Mountain Altai)]. *Geographia i prirodnye resursy – Geography and natural resources*, 2013, no. 4, pp. 94–100.
 25. Chebotarev N.P. *Uchenie o stoke* [The doctrine about a runoff]. Moscow, Moscow university Press, 1962. 406 p.
 26. Alyokin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Bases of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p.
 27. Savichev O.G., Kolokolova O.V., Zhukovskaya E.A. Sostav i ravnovesie donnykh otlozheniy r. Tom s rechnymi vodami [Composition and balance of river sediments of the Tom river with river waters]. *Geoekologiya – Geoecology*, 2003, no. 2, pp. 108–119.
 28. Savichev O.G., Domarenko V.A. Zakonomernosti izmeneniya khimicheskogo sostava rechnykh otlozheniy i ikh ispolzovanie v poiskakh poleznykh iskopaemykh [Laws of change in chemical composition of river sediments and their use in searches of minerals]. *Fundamentalnye issledovaniya – Fundamental research*, 2014, no. 6 (3), pp. 520–525.
 29. Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettenmaier D.P., Polischuk Yu.M., Savichev O.G., Smith L.G. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections. *Environmental Changes in Siberia: Regional Changes and their Global Consequences*. Eds. P.Ya. Groisman, G. Gutman. Dordrecht, Springer, 2013. pp. 111–154.
 30. Savichev O.G. Podzemnaya sostavlyayushchaya stoka rek basseyna Sredney obi [Ground composition of river runoff of the Middle Ob river basin]. *Melioratsia i vodnoe khozaystvo – Land improvement and water management*, 2010, no. 1, pp. 36–39.

Received: 10 September 2015.

УДК 621.311

РЕКОНФИГУРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ И МУЛЬТИАГЕНТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Фишов Александр Георгиевич,

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: fishov@ngs.ru

Мукатов Бекжан Батырович,

главный диспетчер филиала АО «Казахстанская компания по управлению электрическими сетями» Национального диспетчерского центра Системного оператора, Республика Казахстан, 010000, г. Астана, ул. Тауельсиздик, 59. E-mail: mukatov@kegoc.kz

Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения функциональности энергосистем при неизбежном массовом вводе распределенных источников генерации в распределительных сетях, как правило, без централизованного диспетчерского управления, что в целом повышает энергоэффективность производства и распределения энергии, а также приводит к экономии георесурсов.

Цель исследования: разработка метода реконфигурации электроэнергетической системы при мультиагентном управлении для снижения перегрузки электросетевого оборудования, а также для обеспечения живучести энергосистем путем разделения и восстановления электрической сети.

Методы исследования: системный и объектно-ориентированный подходы, математическое моделирование режимов электрических сетей с мультиагентной реконфигурацией.

Результаты. Разработан метод мультиагентной реконфигурации электрической сети, цифровая модель энергосистемы с мультиагентным управлением. Определены принципы построения мультиагентной системы, а также этапы ее работы при реконфигурации сети. Сформулированы общие и частные правила для агентов децентрализованной мультиагентной системы, знание которых, а также режимных параметров только прилегающей к агентам сети достаточно для принятия решения о варианте деления сети. Проведено моделирование реконфигурации сети с распределенной генерацией при мультиагентном управлении на тестовой схеме. Представлены результаты, подтверждающие работоспособность и эффективность метода.

Выводы. Управление в распределительной сети должно быть децентрализованным, на основе мультиагентных технологий, так как в условиях отсутствия наблюдаемости режимов данный подход наиболее эффективен. Проведенные исследования по реконфигурации электроэнергетической системы свидетельствуют о перспективности и работоспособности мультиагентного подхода. Мультиагентный подход позволяет эффективно решить задачу обеспечения функциональности электроэнергетической системы. Предложенная мультиагентная система обладает высокой надежностью и при потере любого из агентов способна адекватно функционировать.

Ключевые слова:

Распределенная генерация, функциональность электроэнергетической системы, живучесть энергосистемы, реконфигурация сети, мультиагентная система, агент, общие и частные правила.

Введение

Рост тарифов на электроэнергию, высокая стоимость технологического присоединения малой генерации к существующим, часто перегруженным, электрическим сетям (ЭС) и большие сроки его реализации, необходимость развития теплоснабжения на обширной территории, а также проблема экономии георесурсов являются предпосылками активного ввода распределенной генерации (РГ) с включением ее на параллельную работу с энергосистемой.

Неизбежность массового развития РГ в распределительных сетях, как правило, не имеющих централизованного диспетчерского управления, обуславливает необходимость создания на их основе качественно новых энергосистем, так называемых Smart Grid.

Концепция Smart Grid подразумевает наличие у электроэнергетических систем (ЭЭС) таких качеств, как высокая способность эффективно проти-

востоять возмущениям, адаптироваться к условиям работ за счет развития современных систем управления [1–4], что, наряду с возможностью участия в регулировании режима и наличием у каждого из субъектов ЭЭС собственных целей, ставит задачу перехода к мультиагентному управлению режимом, в том числе и реконфигурации электрических сетей с распределенной генерацией.

Задачи реконфигурации электроэнергетических систем

ЭЭС являются многофункциональными системами. Качество их работы обобщенно можно характеризовать полнотой выполнения основных функций (функциональностью) (рис. 1).

В ЭЭС с распределенной генерацией ее функциональность во многом определяется способностью системы к сбалансированному разделению и восстановлению целостности системы [5, 6].

Для обеспечения функциональности энергосистемы в зависимости от характера ее снижения реконфигурация сети может решать следующие задачи:

- недопущение и снятие перегрузки элементов сети за счет принудительного потокораспределения;
- обеспечение живучести ЭЭС за счет дезинтеграции и интеграции подсистем;
- обеспечение надежности энергоснабжения как за счет принудительного потокораспределения, так и за счет дезинтеграции и интеграции подсистем.



Рис. 1. Триада основных функций управления ЭЭС

Fig. 1. The triad of basic grid management functions

Реконфигурация ЭЭС с пониженной функциональностью способна восстановить функциональность в полном объеме или повысить ее уровень.

В основной сети ЭЭС реконфигурация может осуществляться централизованно (диспетчерским центром или централизованной противоаварийной автоматикой) в условиях достаточной наблюдаемости сети.

Управление в распределительной сети (РС) должно быть децентрализованным, на основе мультиагентных технологий, так как в РС централизованная реконфигурация невозможна в силу отсутствия (в том числе по причине экономической нецелесообразности) наблюдаемости режимов.

На рис. 2 показаны примеры успешной и возможной неуспешной реконфигурации, в результате которых возможны следующие варианты схемы ЭЭС:

- I – с разделением ЭС на подсистемы, для повышения функциональности ЭЭС по сравнению с исходным значением;
- II – с сохранением целостности ЭС, с принудительным потокораспределением для повышения функциональности ЭЭС;
- III – с разделением ЭС на подсистемы, при снижении функциональности ЭЭС по сравнению с исходным значением (погашение района сети);

- IV – с сохранением целостности ЭС, при снижении функциональности ЭЭС по сравнению с исходным значением (возникновение перегрузки элемента сети), где Φ_0 , Φ – уровни функциональности в исходном режиме и режиме после реконфигурации.

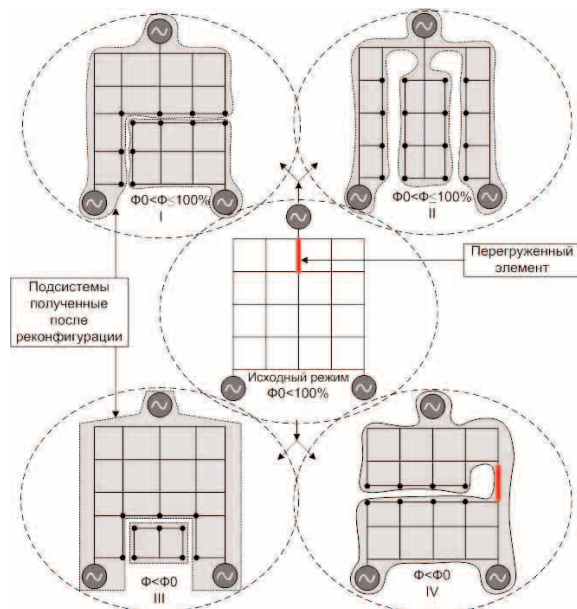


Рис. 2. Возможные варианты реконфигурации ЭЭС с перегруженным элементом

Fig. 2. Possible options for reconfiguration of a grid with an overloaded element

Мультиагентная реконфигурация электроэнергетических систем

Предпосылки. В ряде выполненных работ в данном направлении [7–18] предлагается мультиагентный подход, с использованием агентов, связанных с энергетическими объектами. Необходимо отметить в указанных подходах наличие центрального агента (решатель, сборщик данных, симулятор), выход из строя которого делает неработоспособной всю систему. Это актуализирует разработку МАС без наличия какого-либо координирующего элемента.

Ключевая идея настоящей работы заключается в построении децентрализованной мультиагентной системы, в которой стандартным агентам достаточно знания режимных параметров только прилегающей к ним сети и общих правил для решения мультиагентной системы задачи восстановления функциональности ЭЭС за счет эффективного использования внутренних резервов ЭЭС, возникающих при ее реконфигурации. К этим резервам следует отнести:

- использование регулирующего эффекта нагрузки по частоте и напряжению [19];
- увеличение допустимых перетоков мощности, соответствующих нормативным запасам по устойчивости, которое может быть достигнуто за счет уменьшения нерегулярных колебаний,

путем снижения (вплоть до полного исключения) суммарного потребления в одной из связанных сечением подсистем [20];

- принудительное потокораспределение для снятия перегруза по ЛЭП, за счет загрузки других незагруженных элементов.

Реконфигурация ЭЭС может быть также использована для перекоммутации схемы таким образом, чтобы повышалась живучесть системы при тяжелых системных условиях (например, глубоком снижении частоты в регионе), а также в режимах повышенного риска, когда не выполняется критерий $n-1$.

Терминология мультиагентной системы для последующего описания

Агент – интеллектуальная сущность, представляющая интересы активного узла ЭЭС.

Соседний агент – агент, с узлом которого имеется прямая электрическая связь.

Контролируемый район – зона контроля агентом режима прилегающего района сети по местным параметрам (перетоки по примыкающим к узлу агента линиям электропередачи (ЛЭП) и напряжение в узле).

Инициатор – агент, в контролируемом районе которого произошло снижение функциональности, инициирующий начало работы МАС.

Участник – агент, готовый к действиям (изменению/перераспределению по шинам генерации или потребления) в своем узле, способный повысить функциональность в контролируемом инициатором районе.

Величина нечувствительности – изменение saldo мощности контролируемого района, при котором прекращается дальнейший анализ на наличие снижения функциональности в контролируемом районе.

Действия агента – изменение схемы распределительного устройства (РУ), режима выработки или потребления в узле, прием или передача сообщений.

Запрос – сообщение, направляемое агентом, содержащее информацию о планируемых или реализованных действиях.

Разрешение – сообщение, направляемое агентом в ответ на запрос, содержащее информацию о подтверждении готовности к изменениям.

Отказ – сообщение, направляемое агентом в ответ на запрос, содержащее информацию о недопустимости намечаемых/выполненных действий.

Зона принятия решения – множество агентов, задействованных в процессе мультиагентного управления в соответствии с едиными правилами поведения агентов.

Принципы и правила предлагаемой мультиагентной системы

В основу мультиагентной реконфигурации электрической сети положены контроль режима прилегающего района сети и общие (единые) принципы и базы правил.

Принципы построения мультиагентной системы:

- 1) минимальный обмен информацией между агентами;
- 2) локальность обмена информацией (агенты обмениваются сообщениями только с соседними агентами);
- 3) локальность контроля режима (агент располагает параметрами режима только в контролируемом районе);
- 4) неухудшение функциональности при принятии решения каждым агентом (решение может осуществляться по принципу обратной связи по реакции изменяемой мощности на элементе (ах), приведшем к снижению функциональности у инициатора на действие участника).

Общие и частные правила для агентов

Общие правила:

- Агент, планирующий выполнить действие в контролируемом им районе, сообщает об этом соседним агентам, на связях с которыми произойдут изменения перетоков мощности более величины нечувствительности, или направляет им сообщение о произошедших изменениях.
- Агент выполняет действия после получения от соседних агентов сообщений – «разрешений» на их осуществление, или сохраняет результат уже выполненных действий при отсутствии сообщений – «отказов» от агентов.

Частные правила работы МАС для принудительного потокораспределения:

- При исчерпании возможностей по изменению собственной схемы РУ или режима генерации/потребления в узле инициатор поочередно «просит» помощи у соседних агентов.
- После каждого воздействия работа МАС повторяется (так как меняется потокораспределение в сети).

Частные правила работы МАС при дезинтеграции и интеграции подсистем:

- Отклонение частоты или возникновение перегрузки элементов контролируемого района выявляется всеми агентами данных районов.
- Деление выполняется агентами синхронно.

Взаимодействие агентов для снятия перегрузки. Этапы работы МАС при принудительном потокораспределении:

1. Идентификация снижения функциональности – появление инициатора.
2. Поиск участника и выбор им действия из набора доступных (параллельно по всем направлениям от инициатора).
3. Направление участником соседним агентам запросов для получения разрешения на выполнение намечаемых действий в контролируемом районе или отправка им сообщений о произошедших изменениях.
4. Проверка соседними агентами отсутствия снижения функциональности при намеченных/выполненных действиях. Соседние аген-

- ты информируют своих «соседей» в случае изменения режима в контролируемых ими районах больше величины нечувствительности.
5. Передача сообщения соседними агентами участнику о разрешении изменений или ретрансляция сообщений о выполненных изменениях соседним агентам.
 6. 1) При разрешении всеми соседними агентами – направление участником инициатору сообщения о возможном снижении перетока на перегруженном элементе и выбор инициатором участника, а также направление ему команды на выполнение действия.
2) Ожидание участником сообщений-запретов от соседних агентов после выполненных воздействий. При наличии запрета – возврат к п. 2, с переводом проверенного действия в набор недоступных.
 7. Реализация реконфигурации сети и проверка инициатором достаточности выполненного действия. В случае недостаточности возврат к п. 2.

Взаимодействие агентов при разделении

1. Идентификация снижения функциональности – появление инициатора (ов).
2. Поиск сечения деления.
3. Направление участником соседним агентам запроса для получения разрешения на выполнение намечаемых/выполненных действий в контролируемом районе. Соседние агенты информируют своих «соседей» в случае изменения режима в контролируемых ими районах больше величины нечувствительности.
4. Направление соседними агентами участникам сообщений-разрешений или отправка сообще-

- ний с данными о выполненных изменениях агентам, находящимся в зоне принятия решений.
5. При разрешении агентами или отсутствии отказов синхронизация всех участников и назначение времени для действий или сохранение изменений. При наличии отказа – корректировка сечения и возврат к п. 3.
 6. Реализация реконфигурации сети.

В процессе реконфигурации агенты могут выполнять действия самостоятельно (без получения разрешений на эти действия от соседних агентов) в случаях, когда производимые ими операции не приводят к изменению режима в контролируемом районе. Например, в схеме распределительного устройства (РУ) высокого напряжения (ВН), показанной на рис. 3, а, изменение состояний выключателей в РУ низкого напряжения (НН) не приводит к изменению потокораспределения мощности в контролируемом районе. В случае перегрузки одного из трансформаторов и при наличии резерва на другом возможна разгрузка трансформатора за счет перераспределения нагрузки по шинам на стороне НН (рис. 3, б).

Деление по шинам в РУ ВН в общем случае меняет распределение мощности по примыкающим к ПС ветвям.

Пример моделирования мультиагентной реконфигурации электроэнергетических систем для снижения перегрузки элемента сети

Для единообразия будем представлять трансформатор, связывающий распределительную сеть с ЕЭС (рис. 4, а), в виде источника генерации с рабочей мощностью, равной значению номинальной

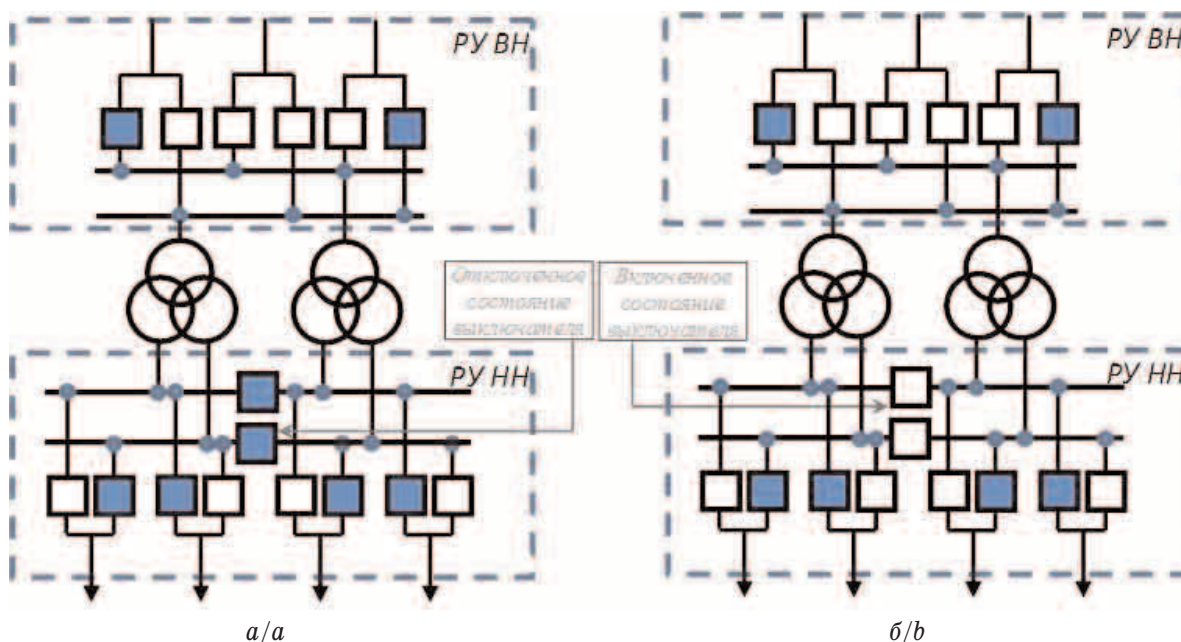


Рис. 3. Пример перекоммутации в РУ с выравниванием нагрузки трансформаторов без изменения потокораспределения в прилегающей сети

Fig. 3. Example of substation scheme reconfiguration with transformers load balancing without changing power flow in the adjacent network

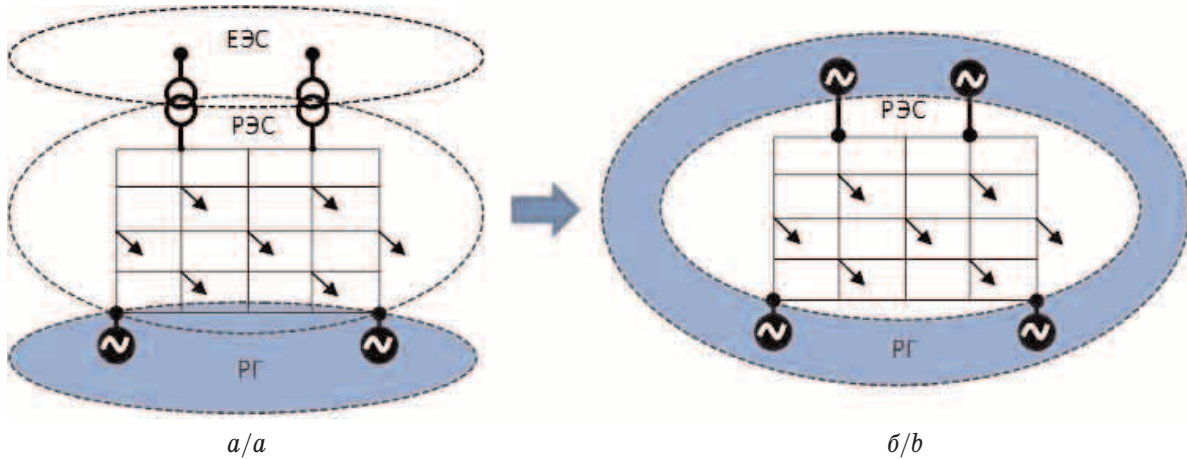


Рис. 4. Основные составляющие ЭЭС

Fig. 4. The main components of the grid

мощности трансформатора (рис. 4, б), где основными элементами являются: ЛЭП, узлы нагрузки и генерации.

Для демонстрации выполнимости мульти-агентной реконфигурации электрической сети смоделируем этот процесс на тестовой схеме с перегруженной ВЛ в цифровой модели (ЦМ), поведение агентов в которой запрограммировано в соответствии с приведенными выше правилами работы МАС при принудительном потокораспределении.

ЦМ МАС разработана в среде Visual Studio с использованием объектно-ориентированного языка программирования C Sharp и расширяемого языка разметки ХАМЛ. В качестве СУБД в ЦМ применена свободная объектно-реляционная система PostgreSQL.

Исходная тестовая схема (электрические сети Атырауской и Мангистауской областей Республики Казахстан номинального напряжения 220/110 кВ) приведена на рис. 5, где представлены значения

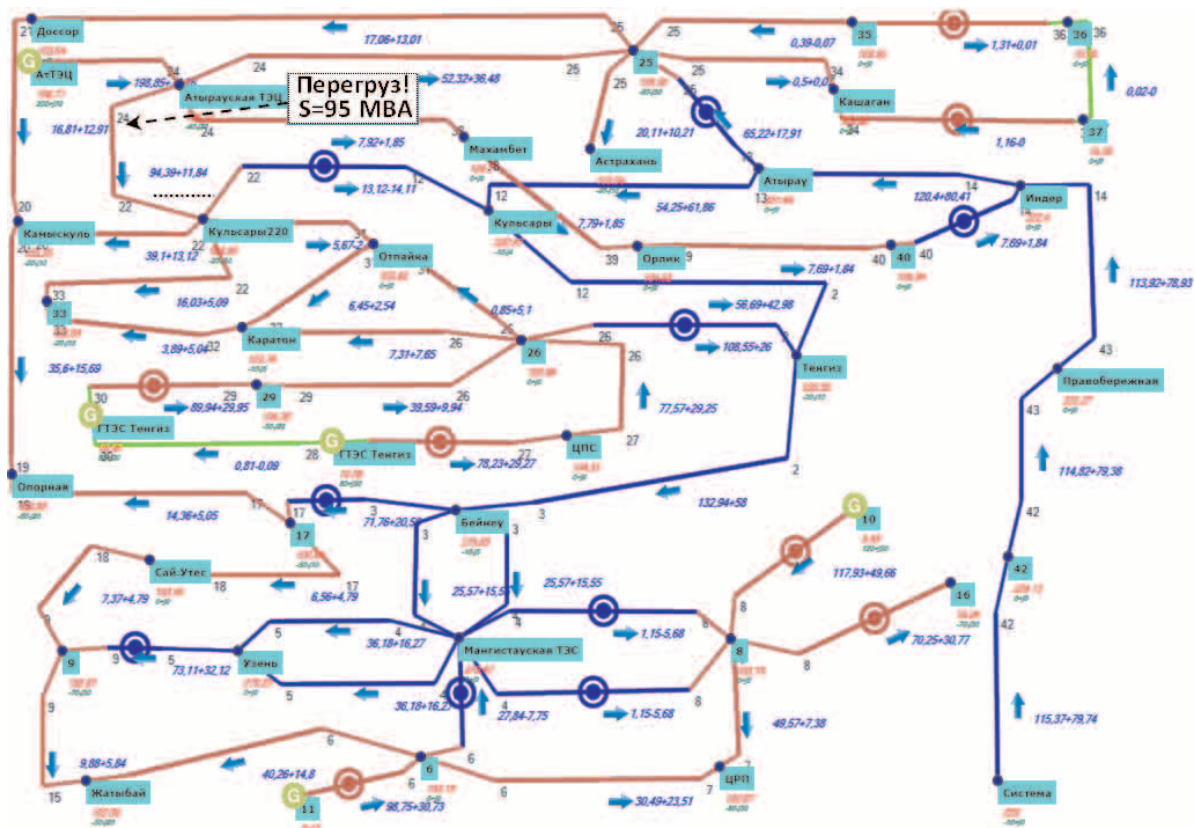


Рис. 5. Исходный режим ЭЭС

Fig. 5. Primary regime of the net

перетоков активной и реактивной мощностей, напряжения и нагрузки в узлах (со знаком «-» – потребление, «+» – выработка).

В исходной схеме перегружена воздушная линия (ВЛ) между узлами 22 и 24 (Атырауская ТЭЦ-ПС Кульсары). При работе МАС произведена реконфигурация, в результате которой на ПС Кульсары шины электрически разделены, а часть ВЛ была переключена на 1 СШ, другая часть – на 2 СШ. С учетом возможной комбинаторики по распределению нагрузок по шинам на 2 СШ была переведена минимально воз-

можная нагрузка (6 МВт из суммарной нагрузки 20 МВт) с сохранением связи с АТ ПС Кульсары. Результат реконфигурации показан на рис. 6.

Для наглядности работы МАС на рис. 7 представлен граф распространения сигналов МАС, а в таблице приведены основные фрагменты «переговоров» агентов, полученные из протокола работы цифровой модели в процессе реконфигурации.

Обменные потоки сообщений содержат данные об узле (ах), в котором произошел реконфигурация (в том числе один уникальный параметр, например

Таблица. Информационный обмен между агентами в процессе реконфигурации

Table. Information exchange between agents during the network reconfiguration

№ шага МАС MAS stages	Действия МАС Multi-agent system (MAS) actions	Примечания Note
1	<p>Начало работы МАС. Активация агентов узлов... Активированы агенты № 1–22 Перегрузка ВЛ, примыкающих к узлам 1–21, нет Активирован агент № 22. ВНИМАНИЕ! Имеется перегрузка ВЛ, примыкающих к узлу № 22 на связях с узлом № 24 Активирован агент № 23. Перегрузки ВЛ, примыкающих к узлу 23, нет Активирован агент № 24. ВНИМАНИЕ! Имеется перегрузка ВЛ, примыкающих к узлу № 24 на связях с узлом № 22 Активированы агенты № 25–43 Перегрузка ВЛ, примыкающих к узлам 25–43, нет</p> <p>MAS starts to work. Agents' node activation... No. 1–22 agents are activated. There are not overloads adjacent to 1–21 nodes lines No. 22 agent is activated. ATTENTION! There is an overload line, on the relations with the no. 24 node that adjacent to the node no. 22 No. 23 agent is activated. There is no overloaded line in adjacent to 23 node lines No. 24 agent is activated. ATTENTION! There is an overload line, on the relations with the no.22 node that adjacent to the node no. 24 No. 25–43 agents are activated There are no overloaded lines in adjacent to 25–43 nodes lines</p>	<p>На данном шаге все агенты анализируют ситуацию в контролируемом районе на наличие перегрузки Агентами № 22 и 24 обнаружена перегрузка ВЛ 22–24</p> <p>At this stage, all the agents analyze the situation in controlled area to find an overload No. 22 and 24 agents detected the overload of 22–24 line</p>
2	<p>ВНИМАНИЕ! Выполнена реконфигурация в узле 22 ATTENTION! Scheme of no. 22 node was reconfigured</p>	<p>Агент № 22 выполнил доступный ему вариант реконфигурации в своей схеме РУ No. 22 agent executed an available scheme reconfiguration option of substation</p>
3	<p>Имитация действия агента Imitation of agent action</p>	<p>Произведен расчет установившегося режима, имитирующий реконфигурацию, для последующего поиска перегрузок в новой схеме Power flow was calculated for simulating reconfiguration and to find overloads in the new net</p>
4	<p>МАС приступает к поиску перегрузок в новой схеме... Следующие узлы, которым будет передано сообщение от агента узла с изменившейся схемой РУ: 20.12.31.33. Начало распространения сообщений по сети...</p> <p>MAS starts looking overloads in the new scheme... The next nodes, which will be informed by the node agent that changed the scheme of substation: 20.12.31.33. Messages distribution on the network starts...</p>	<p>МАС приступает к анализу полученной в результате реконфигурации схемы сети на наличие перегрузок. Сообщения передаются от агента, который выполнил действие (№ 22), к соседним агентам, по связям с которыми произошло изменение перетока мощности более величины нечувствительности (в нашем примере это агенты № 20, 12, 31, 33). Данные агенты являются первыми агентами, вошедшими в зону принятия решений.</p> <p>MAS proceeds to analyze the reconfigured network to find overloads. Messages are sent from the agent which performed the action (no. 22), to neighbor agents, which adjacent lines power flow were changed more than insensitive power flow (in this example, agent number 20, 12, 31, 33). These agents are the first ones which entered the decision zone</p>

Окончание таблицы

Table

№ шага MAS stages	Действия MAS Multi-agent system (MAS) actions	Примечания Note
5	<p>Всего активных агентов = 4 Активирован агент № 20 Исключена из анализа ВЛ, связывающая с агентом, который отправил сообщение: 20–22 Перегрузки ВЛ, примыкающих к узлу 20, нет Следующие узлы № : 19.21. Всего активных агентов = 5 Активирован агент № 12 Исключена из анализа ВЛ, связывающая с агентом, который отправил сообщение: 12–44 Изменение мощности по ВЛ 12–13 меньше допустимой величины Перегрузки ВЛ, примыкающих к узлу 12, нет Следующие узлы № : 2. ... Активированы агенты № 31, 33, 19, 21, 2, 26, 32, 17, 25, 26, 3 ... Всего активных агентов = 5 Активирован агент № 2 Не подлежит ретрансляции сообщение от узла 26 в узле 2 Следующие узлы №: последующих узлов для передачи сообщений нет ... Активирован агент № 32, 26, 3 ... Всего активных агентов = 1 Активирован агент № 17 Не подлежит ретрансляции сообщение от узла 3 в узле 17 Следующие узлы № : последующих узлов для передачи сообщений нет</p> <p>Total active agent = 4 No. 20 agent is activated The line, connecting with the agent, which has sent the message, was excluded from the analysis: 20–22 There is no overloading lines, adjacent to the node 20 The next nodes no.: 19.21. Total active agents = 5 No. 12 agent is activated The line, connecting with the agent, which sent the message, was excluded from the analysis: 12–44 12–13 line power changing is less than the allowable value There are no overloaded lines in adjacent to no. 12 node The next nodes no.: 2. ... No. 31, 33, 19, 21, 2, 26, 32, 17, 25, 26, 3 agents are activated ... Total active agents = 5 No. 2 agent is activated There is no message from node no. 26 to node no. 2 The next nodes no.: there are no nodes to send messages ... No. 32, 26, 3 agents are activated ... Total active agents = 1 No. 17 agent is activated There is no message from node no. 3 to node no. 17 The next nodes no.: there are no nodes to send messages</p>	<p>Агентами производится отправка/прием запросов, на основании которых анализируется ситуация в контролируемом районе и принимается решение о разрешении или отказе. В случае отказа изменения схемы (в нашем примере выполненные агентом № 22) происходит процесс отмены выполненных действий</p> <p>Agents send/receive requests and take decision to allow or reject analyzing the controlled area situation. If the changes of scheme actions are rejected, all actions are canceled (in this example, actions performed by no. 22 agent)</p>
6	<p>Активных агентов нет. Работа MAS успешно завершена. There are no active agents. MAS work is successfully completed</p>	<p>Отсутствие агентов в зоне принятия решений означает, что необходимости в реконфигурации сети нет. Система переходит в режим циклического анализа (шаг № 1). The absence of agents in the decision zone means that the network do not need to be reconfigured. The system goes into the cyclic analysis mode (stage 1).</p>

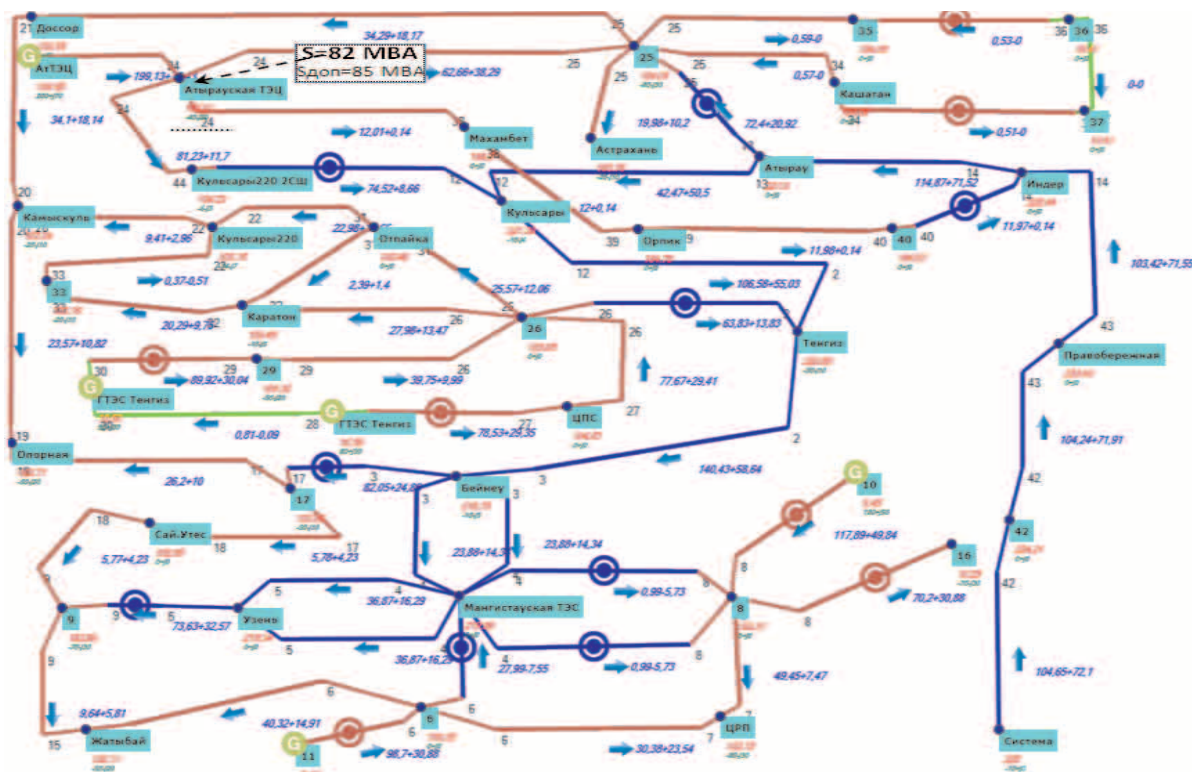


Рис. 6. Режим ЭЭС после реконфигурации

Fig. 6. Net mode after reconfiguration

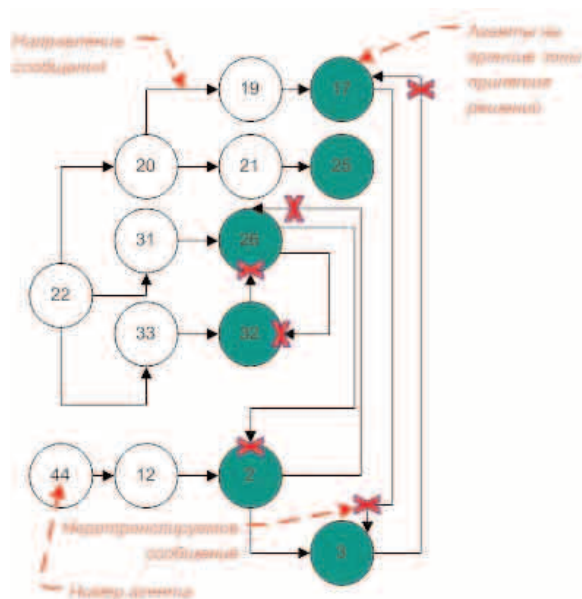


Рис. 7. Распространение сообщений МАС

Fig. 7. MAS messages distribution

его координаты), и время, когда закончилось изменение схемы РУ. Эти данные необходимы для исключения обработки агентами повторных запросов,

информирующих об одних и тех же изменениях, и прекращения их ретрансляции. Сообщения ретранслируются только тем соседям, по связям с которыми произошли изменения перетока мощности более заданного значения нечувствительности (в нашем случае 10 MVA), с исключением из анализа агента, от которого был получен сигнал.

При обнаружении нарушений ограничений обнаруживший это агент сообщает об отказе агенту, направившему ему запрос. Далее происходит передача сообщения-отказа агенту участнику, выполнившему действие. Приняв сообщение-отказ, участник отменяет выполненные действия и восстанавливает исходную схему сети или режим производства-потребления электроэнергии.

Выводы

Проведенные исследования по реконфигурации ЭЭС свидетельствуют о перспективности и работоспособности мультиагентного подхода.

Мультиагентный подход может позволить решить задачу реконфигурации ЭЭС в электрической сети при невозможности централизованного решения из-за недостатка информации о схемно-режимных параметрах. МАС обладает высокой надежностью, так как при потере любого из агентов она способна адекватно функционировать без учета потерянного элемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воропай Н.И. Интеллектуальные электроэнергетические системы: концепция, состояние, перспективы // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2011. – № 3 (20). – С. 4–11.
2. Воропай Н.И. Распределенная генерация в электроэнергетических системах // Международная научно-практическая конференция «Малая энергетика-2005» URL: <http://www.combi-energy.ru/stat983.html> (дата обращения 01.10.2014).
3. Бартоломей П.И., Паниковская Т.Ю., Чечушков Д.А. Анализ влияния распределенной генерации на свойства ЭЭС // Объединенный симпозиум в рамках проекта АТЭС «Энергетические связи между Россией и Восточной Азией: стратегии развития в XXI ВЕКЕ». – Иркутск, 2010. – С. 4–5.
4. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.
5. Фишов А.Г. Структурная адаптация электроэнергетических систем к режимам: дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1992. – 332 с.
6. Фишов А.Г., Ефремов И.А., Мукатов Б.Б. Исследование реконфигурации электрических сетей с распределенной генерацией в аварийных режимах // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2014. – № 4 (25). – С. 90–103. DOI: 10.17212/1727-2769-2014-4-90-103.
7. Zhenhua Jiang. Agent-Based Control Framework for Distributed Energy Resources Microgrids // Intelligent Agent Technology, 2006. IAT '06. IEEE/WIC/ACM International Conference. – Hong Kong, 2006. – P. 646–652. DOI: 10.1109/IAT.2006.27.
8. Sergio Rivera, Amro Farid, Kamal Youcef-Toumi. Coordination and Control of Multiple Microgrids Using MultiAgent Systems // EnergyPath 2013: Our Global Sustainable Energy Future. – Philadelphia, PA, USA, 2013. – P. 1–5.
9. Stephen McArthur, Phil Taylor. Distributed Smart Control. URL: <https://drive.google.com/file/d/0B2wnQuwdaa09V0hZOGRRMlQ0Rms/view?usp=sharing> (дата обращения 01.10.2014).
10. Dolan M.J., Davidson E.M., Ault G.W., Bell K.R.W., McArthur St.D.J. Distribution Power Flow Management Utilizing an Online Constraint Programming Method // IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID. – 2013. – V. 4. – P. 798–805. URL: <https://drive.google.com/file/d/0B2wnQuwdaa09aG1kUUR4bFM3aW8/view?usp=sharing> (дата обращения 01.10.2014). DOI: 10.1109/TSG.2012.2234148.
11. A Multi-Agent Framework for Operation of a Smart Grid / Ruchi Gupta, Deependra Kumar Jha, Vinod Kumar Yadav, Sanjeev Kumar // Energy and Power Engineering. – 2013. – V. 5. – P. 1330–1336.
12. Chatzivasiliadis S.J., Hatziargyriou N.D., Dimeas A.L. Development of an Agent Based Intelligent Control System for Microgrids // Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE. – P. 1–6. DOI:10.1109/PES.2008.4596481.
13. AuRA-NMS: An Autonomous Regional Active Network Management System for EDF Energy and SP Energy Networks / E.M. Davidson, M.J. Dolan, G.W. Ault, S.D.J. McArthur // Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE. – P. 1–6. DOI:10.1109/PES.2010.5590045.
14. Cohen D.A. Intelligent Agent Applications for Integration of Distributed Energy Resources within Distribution Systems // Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE. – P. 1–5. DOI: 10.1109/PES.2008.4596818.
15. Cohen D. Is Distributed Generation the Future of the Grid? // ACORE National Monthly Teleconference. – Denver, CO, January 17, 2007.
16. Nagata T., Sasaki H. A Multi-Agent Approach to Power System Restoration // IEEE transactions on power systems. – 2002. – V. 17. – № 2. – P. 457–462. DOI:10.1109/TPWRS.2002.1007918.
17. Hak-Man Kim, Tetsuo Kinoshita, Myong-Chul Shin. Multiagent System for Autonomous Operation of Isolated Microgrids Based on a Power Market Environment // Energies. – 2010. – V. 3. – Iss. 12. – P. 1972–1990. DOI: 10.3390/en3121972.
18. Operation of Microgrid Reconfiguration based on MAS (Multi-Agent System) / Chong Shao, Chen Xu, Shan He, Xiangning Lin // TENCON 2013 – 2013 IEEE Region 10 Conference (31194) – P. 1–4. DOI: 10.1109/TENCON – 2013.
19. Фишов А.Г., Мукатов Б.Б. Обеспечение живучести энергосистем при развитии распределенной генерации // Вестник Алматинского университета энергетики и связи. – 2013. – № 4 (23). – С. 6–15.
20. Фишов А.Г., Мукатов Б.Б. Использование превентивного деления электрической сети в режимах повышенного риска // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 4. – С. 215–219.

Поступила 18.06.2015 г.

UDC 621.311

RECONFIGURATION OF ELECTRIC NETWORKS WITH DISTRIBUTED GENERATION AND MULTI-AGENT CONTROL

Alexander G. Fishov,

Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: fishov@ngs.ru

Bekzhan B. Mukatov,

Branch of «KEGOC» JSC «National Dispatching Centre of System Operator», 37, Beibitshilik Avenue, Astana, 010000, Kazakhstan. E-mail: mukatov@kegoc.kz

The relevance of the discussed issue is caused by the need to ensure the functionality of power systems with the inevitable introduction of distributed generation sources in the distribution networks, as a rule, without centralized dispatching system. As a result, this increases the efficiency of energy production and distribution and leads to savings geo assets.

The main aim of the study is to develop a reconfiguration method for a power system with multi-agent control to reduce the overload of electric equipment and to ensure the survivability of power systems by network division and restoration.

The methods used in the study: system and object-oriented approaches, mathematical modeling of grid modes with multi-agent reconfiguration.

The results. The authors have developed the multi-agent grid reconfiguration method, the digital model of grid with multi-agent control; defined the principles of constructing the multi-agent system and the stages of its operation at the network reconfiguration. General and specific rules for the agents of the decentralized multi-agent system were stated. Awareness of these rules and regime parameters of the network adjacent to the agents is sufficient for making decision on dividing option of the network. The authors simulated the reconfiguration of the network with distributed generation at multi-agent control at test scheme. The paper introduces the results confirming the efficiency and effectiveness of the method.

Conclusions. Management of the distribution network should be decentralized, based on multi-agent technology, as this approach is most effective in observability modes absence. The studies on reconfiguration of power system indicate the prospects and performance of multi-agent approach. If the centralized power system reconfiguration is impossible or inappropriate, the multi-agent approach can effectively solve the problem of ensuring the functionality of the electric power system. The multi-agent system is highly reliable and it is able to function adequately even at loss of any of the agents.

Key words:

Distributed generation, power system functionality, power system survivability, reconfiguration of power grid, multi-agent system, agent, general and special rules.

REFERENCE

- Voropay N.I. *Intellektualnye elektroenergeticheskie sistemy: kontseptsiya, sostoyanie, perspektivy* [Intelligent power systems: the concept, status and prospects] *Avtomatizatsiya i IT v energetike*, 2011, no. 3 (20), pp. 4–11.
- Voropay N.I. *Raspredeleonnaya generatsiya v elektroenergeticheskikh sistemakh* [Distributed generation in power systems]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Malaya energetika-2005»* [International scientific conference. Small power engineering 2005]. Available at: <http://www.combienergy.ru/stat983.html> (accessed 1 October 2014).
- Bartolemei P.I., Panikovskaya T.Yu., Chechushkov D.A. *Analiz vliyaniya raspredeleynoy generatsii na svoystva EES* [Analysis of the impact of distributed generation on the properties of EPS]. *Obedinenny simpozium v ramkakh proekta ATEES «Energeticheskie svyazi mezhdu Rossiei i Vostochnoy Aziei: strategii razvitiya v XXI VEKE»* [Symposium. Power engineering relations between Russia and Eastern Asia: strategies of development in XXI century]. Irkutsk, 2010. pp. 4–5.
- Kobets B.B., Volkova I.O. *Innovatsionnoe razvitie elektroenergetiki na baze kontseptsii Smart Grid* [The innovative development of electric power industry on the basis of the Smart Grid concept]. Moscow, Publ. Center «Energia», 2010. 208 p.
- Fishov A.G. *Strukturnaya adaptatsiya elektroenergeticheskikh sistem k rezhimam*. Dokt. Dis. [Structural adaptation of electric power systems to regimes. Diss. Dr. Sc.] Novosibirsk, 1992. 332 p.
- Fishov A.G., Efremov I.A., Mukatov B.B. *Issledovanie rekonfiguratsii elektricheskikh setey s raspredeleynoy generatsiyey v avariynykh rezhimakh* [Study of reconfiguration of electric networks with distributed generation in emergency conditions]. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiiskoy Federatsii*, 2014, no. 4 (25), pp. 90–103. DOI: 10.17212/1727-2769-2014-4 90-103.
- Zhenhua Jiang. *Agent-Based Control Framework for Distributed Energy Resources Microgrids*. *Intelligent Agent Technology, 2006. IAT 06. IEEE/WIC/ACM International Conference*. Hong Kong, 2006. P. 646–652. DOI: 10.1109/IAT.2006.27.
- Sergio Rivera, Amro Farid, Kamal Youcef-Toumi. *Coordination and Control of Multiple Microgrids Using MultiAgent Systems*. *Energypath 2013: Our Global Sustainable Energy Future*. Philadelphia, PA, USA, 2013. pp.1–5.
- Stephen McArthur, Phil Taylor *Distributed Smart Control*. Available at: <https://drive.google.com/file/d/0B2wnQuwdaa09V0hZOGRRMIQ0Rms/view?usp=sharing> (accessed 1 October 2014).
- Dolan M.J., Davidson E.M., Ault G.W., Bell K.R.W., McArthur St.D.J. *Distribution Power Flow Management Utilizing an Online Constraint Programming Method*. *IEEE transactions on Smart Grid*, 2013, vol. 4, pp. 798–805. Available at: <https://drive.google.com/file/d/0B2wnQuwdaa09aG1kUUR4bFM3aW8/view?usp=sharing> (accessed 1 October 2014). DOI: 10.1109/TSG.2012.2234148.
- Ruchi Gupta, Deependra Kumar Jha, Vinod Kumar Yadav, Sanjeev Kumar. *A Multi-Agent Framework for Operation of a Smart Grid*. *Energy and Power Engineering*, 2013, vol. 5, pp. 1330–1336.
- Chatzivasiladis S.J., Hatzigiorgiou N.D., Dimeas A.L. *Development of an Agent Based Intelligent Control System for Microgrids*. *Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*. pp. 1–6. DOI: 10.1109/PES.2008.4596481.
- Davidson E.M., Dolan M.J., Ault G.W., McArthur S.D.J. *AuRANMS: an Autonomous Regional Active Network Management System for EDF Energy and SP Energy Networks*. *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*. pp. 1–6. DOI: 10.1109/PES.2010.5590045.
- Cohen D.A. *Intelligent Agent Applications for Integration of Distributed Energy Resources within Distribution Systems*. *Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*. pp. 1–5. DOI: 10.1109/PES.2008.4596818.
- Cohen D. *Is Distributed Generation the Future of the Grid?* *ACORE National Monthly Teleconference*. Denver, CO, January 17, 2007.
- Nagata T., Sasaki H. *A Multi-Agent Approach to Power System Restoration*. *IEEE transactions on power systems*, 2002, vol. 17, no. 2, pp. 457–462. DOI: 10.1109/TPWRS.2002.1007918.
- Hak-Man Kim, Tetsuo Kinoshita, Myong-Chul Shin. *Multiagent System for Autonomous Operation of Islanded Microgrids Based on a Power Market Environment*. *Energies*, 2010, vol. 3, Iss. 12, pp. 1972–1990; DOI: 10.3390/en3121972.
- Chong Shao, Chen Xu, Shan He, Xiangning Lin. *Operation of Microgrid Reconfiguration based on MAS (Multi-Agent System)*. *TENCON 2013 – 2013 IEEE Region 10 Conference (31194)*. pp. 1–4. DOI: 10.1109/TENCON – 2013.
- Fishov A.G., Mukatov B.B. *Obespechenie zhivuchesti energosistem pri razvitiy raspredeleynoy generatsii* [Ensuring power systems survivability when developing distributed generation]. *Vestnik Almatinskogo universiteta energetiki i svyazi*, 2013, no. 4, (23), pp. 6–15.
- Fishov A.G., Mukatov B.B. *Ispolzovanie preventivnogo deleniya elektricheskoy seti v rezhimakh povyshennogo riska* [Using preventive division of power grid in high-risk conditions]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka*, 2014, no. 4, pp. 215–219.

Received: 18 June 2015.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Принимаются статьи, подготовленные в MS Word-2003 (файл и распечатка). Статья должна быть подписана авторами и иметь сопроводительное письмо на бланке организации.

Объем статьи не менее 8 стр., но не более 20 стр., включая рисунки и таблицы, размещенные в тексте по упоминанию. Размер бумаги А4, поля по 25 мм. Текст в 1 интервал **без переносов, лишних пробелов и абзацных интервалов**, шрифт Times New Roman, 12 пунктов. Файлы рисунков (в градациях серого) в jpg, tif, cdr или иных форматах редакторов Photoshop, Corel Draw с разрешением 300 dpi прилагаются к статье. Рисунки и таблицы: **Рис. 1. Название; Таблица. Название.** Кавычки вида «...». Интервалы – 1,2...1,8 мм или 5–7 шт. Формулы – в MathType, настройка по умолчанию. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылка в тексте.

Курсивом – буквы латинского и греческого алфавита, кроме входящих в имена собственные, обозначения стандартных математических функций и химических элементов ($U_{пр.}$, Φ_i , но Al_2O_3 , $\cos\alpha_i$, max, lg, «BASF»). Векторы – полужирным курсивом. Список литературы – по ГОСТ Р 7.0.5–2008 (см. пример). Литература – по упоминанию: [1, 2], [2. С. 245], [3–7]. Список литературы должен включать не менее 20 источников.

УДК 621.37 (Пример оформления статьи)

АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ (название на английском языке)

Петров Иван Иванович, канд. техн. наук, доцент каф. обработки металлов давлением факультета стандартизации, химии и биотехнологии ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38. E-mail: vip111@yandex.ru

Иванов Андрей Андреевич, д-р хим. наук, профессор каф. химической технологии топлива и химической кибернетики Института природных ресурсов ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: iip@tpu.ru

Показана возможность расчета ... Установлено, что ... Сделан вывод о том, что ... (Аннотация, 10 кегль, не менее 200 слов).

Ключевые слова: (ниже ключевые слова на английском языке)

Усилительный каскад, регулировка тока

В [1, 2] показано, что усилительный каскад с автоматической регулировкой потребляемого тока (АРПТ) позволяет получить ...

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фамилия И.О. Название книги. – М.: Издательство, 2014. – 123 с.
2. Название книги / под ред. И.О. Фамилия. – М.: Издательство, 2014. – 123 с.
3. Фамилия И.О. Название статьи // Журнал. – 2014. – Т. 316. – № 1. – С. 71–77.
4. Фамилия И.О. Название диссертации: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2008. – 19 с.
5. Название изобретения: пат. 2000000 Рос. Федерация. № 2009129009/10; заявл. 27.07.13; опубл. 10.10.14, Бюл. № 4. – 3 с.
6. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование конференции: Труды VII Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. – Томск, 2014. – Т. 1. – С. 226–228.
7. Фамилия И.О. Название статьи // Наименование ресурса. 2013. URL: <http://www.tpu.ru/html/izvestia.htm> (дата обращения: 25.09.2014).

REFERENCES

Поступила 25.01.2013 г.

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Редактирование *А.С. Глазырин*
Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Перевод на англ. язык и корректура *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*


Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Подписано к печати xx.09.2015. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 17,91. Уч.-изд. л. 16,20.
Заказ xxx-15. Тираж 500 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
Тел./факс: 8(3822) 563-291, www.tpu.ru, izv@tpu.ru